

THESE

Pour l'obtention du grade de docteur de l'Université de Lille - Sciences et Technologies

Discipline : Science de l'Éducation, Didactiques des sciences, Épistémologie, Histoire des sciences et des techniques.

EVOLUTIONS DE QUELQUES CONCEPTS DE THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE ET SUPERIEUR EN FRANCE AU COURS DU 20^{EME} SIECLE

Présentée et soutenue publiquement le **Judi 04 Mai 2017** par

Maxime NAGELS

Composition du jury :

Abdelkader ANAKKAR (Directeur de thèse)

Maitre de conférences, HDR, à l'Université de Lille - Sciences et Technologies

Elena GHIBAUDI (Rapporteur)

Chercheur, Université de Torino, Italie

Mohammed Lhassane LAHLAOUTI (Rapporteur)

Professeur, Université Abdelmalek Essaadi Faculté des Sciences, Maroc

Mohamed SOUDANI (Examineur)

Maitre de conférences, Université Claude Bernard, Lyon 1

Raffaele PISANO (Examineur)

Professeur des Universités, Université de Lille - Sciences Humaines et Sociales

Maurice MONNERVILLE (Examineur)

Professeur des Universités, Université de Lille - Sciences et Technologies

Jean-François PAUWELS (Membre invité)

Professeur des Universités, Université de Lille - Sciences et Technologies

*A ma première fille Lucile,
A ma seconde fille qui viendra bientôt rencontrer son Papa,
A ma femme Adline,*

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu Abdelkader Anakkar, qui a su me faire partager sa passion insatiable pour la thermodynamique et qui a accepté de diriger ma thèse. Je lui suis reconnaissant pour son soutien scientifique, sa très grande disponibilité et sa bienveillance tout au long de mes recherches et de la rédaction de ce mémoire. Sans lui, cette formidable aventure humaine et scientifique n'aurait très certainement jamais abouti.

J'adresse mes remerciements également à Nicole Hulin qui m'a éclairé au début de mes travaux. Je remercie également celles et ceux qui m'ont apporté une aide précieuse dans la recherche des nombreux documents consultés : Vincent Parbellen, président de l'UDPPC, Marie-Blanche Mauhourat, IGEN ainsi que mes collègues enseignants : Jean Pierre Pruvot, Delphine Pouzin, Gaudeline Wagner et Xavier Cointault. En outre, je remercie Sébastien Fleuriel, directeur du Clersé pour sa disponibilité afin de résoudre les problèmes administratifs.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et notamment mes parents qui m'ont toujours encouragé et accompagné dans mes études. Une pensée toute particulière pour ma femme Adline qui a fait preuve d'une grande patience pendant la rédaction et la relecture de ce mémoire et qui a été d'une grande aide lors de la préparation de la soutenance.

Un clin d'œil encore, à l'équipe de la 6^{ème} conférence de l'European Society For The History of Science à Lisbonne dont faisaient partie Rémy Franckowiak et Evangelos Anzoulatos.

Pour terminer, je remercie les membres du jury Elena Ghibaudi, Mohammed Lhassane Lahlaouti, Mohamed Soudani, Raffaele Pisano, Maurice Monnerville et Jean-François Pauwels d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

**EVOLUTIONS DE QUELQUES CONCEPTS DE
THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE DANS
L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE ET SUPERIEUR
EN FRANCE AU COURS DU 20^{EME} SIECLE**

RESUME

La thermodynamique est née au 19^{ème} siècle grâce aux travaux de Carnot basés sur l'hypothèse du calorique. Par la suite, Clausius et Thomson proposent, en s'appuyant sur les travaux de Joule, une formalisation de la thermodynamique telle qu'on la connaît aujourd'hui. Ils introduisent ainsi les principes et les concepts qui lui sont liés comme l'énergie interne ou l'entropie. Ces travaux ont également permis de donner une interprétation mécanique du transfert thermique ou « chaleur » et d'aborder les prémices de la physique statistique. Mais à l'aube du 20^{ème} siècle, les théories énergétiste et atomiste s'affrontent et la thermodynamique est un des théâtres de ces confrontations.

Le début du 20^{ème} siècle coïncide également avec une grande réforme de l'éducation qui restera une référence jusqu'aux années 60, visant à mettre en place une structure nouvelle pour répondre à la question : l'enseignement convient-il toujours à la formation des couches dirigeantes alors que sciences et techniques sont en plein essor ?

Comme nous allons le voir, l'enseignement de la physique va bénéficier de cette réforme. En effet, ce travail étudie l'évolution de l'enseignement de la thermodynamique de 1902 à 2010 pour les classes du lycée et de l'enseignement supérieur. Il porte sur l'évolution et l'analyse didactique des concepts d'énergie, de transfert thermique ou « chaleur », de température, d'entropie et de système thermodynamique. Quatre grandes périodes concernant les programmes, manuels et épreuves officielles sont proposées. En résumé, il s'agit de mettre en lumière le pourquoi de telles réformes, les modifications qu'elles apportent et d'en tirer un bilan pour l'enseignement de la thermodynamique.

Mots-clés : Thermodynamique, Chaleur, Energie, Température, Transfert thermique, Système, Entropie, Principes, Histoire, Enseignement.

**EVOLUTIONS OF SEVERAL CLASSICAL
THERMODYNAMICS CONCEPTS IN THE
SECONDARY AND HIGHER EDUCATION IN
FRANCE DURING THE 20TH CENTURY**

ABSTRACT

Thermodynamics was born in the 19th century through the work of Carnot based on the assumption of caloric. Later on, based on the work of Joule, Clausius and Thomson proposed the formalization we know today, introducing related principles and concepts such as internal energy or entropy. Their work also gives a mechanical interpretation of thermal transfer or “heat” and addresses the beginnings of statistical physics. But at the dawn of the 20th century, the theories of atomism and energetism compete and thermodynamics is one of the theaters of these confrontations.

The early 20th century also coincides with a major education reform which will remain a reference until the 60s, to establish a new structure in order to answer the following question: is the method of teaching still adapted to the formation of the leading strata while science and technology are booming?

Physics will benefit from this reform. Indeed, this work studies the evolution of the teaching of thermodynamics from 1902 to 2010, for high school and higher education. This study focuses on the evolution of the concepts of energy, thermal transfer or “heat”, temperature, entropy and thermodynamical system. An analysis over four major periods, programs, textbooks and official events is proposed. This is to highlight the reason for such reforms, the changes they bring and draw conclusions for the teaching of thermodynamics.

Keywords: Thermodynamic, Heat, Energy, Temperature, Thermal transfer, System, Entropy, Principe, History, Education.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	5
Résumé.....	8
Abstract	10
Table des matières.....	11
Introduction	21
Partie I.....	27
La thermodynamique : de son émergence à son enseignement en France au début du 20ème siècle.....	27
Chapitre 1	29
Une brève histoire de la thermodynamique : naissance des concepts de température, chaleur, énergie et entropie	29
I. Les premières théories de la chaleur	29
1. Du chaud et du froid à la chaleur.....	30
a. <i>Les sensations de chaud et de froid dans l'Antiquité</i>	30
b. <i>La contribution des techniques</i>	34
c. <i>Les expériences sur l'air au 17^{ème} siècle</i>	35
d. <i>Les théories de la chaleur au 17^{ème} siècle</i>	37
2. Les apports du 18 ^{ème} siècle à la théorie de la chaleur	39
a. <i>Le perfectionnement des thermomètres</i>	39
b. <i>Premières mesures de « chaleur »</i>	40
c. <i>L'hypothèse du phlogistique</i>	41
d. <i>L'émergence du calorique et l'apport majeur de Black</i>	42
e. <i>Les contributions de Lavoisier et Laplace</i>	44
f. <i>La remise en cause du calorique</i>	48
3. La naissance de la « thermodynamique »	51
a. <i>Le développement des machines</i>	51
b. <i>L'apport de Carnot</i>	54
c. <i>L'apport de Clapeyron</i>	57
4. La naissance du concept d'énergie.....	58
a. <i>L'influence de la Naturphilosophie</i>	58
b. <i>Les travaux de Mayer et de Joule</i>	59
c. <i>Le principe de conservation de la force d'Helmholtz</i>	61
II. Principes de la thermodynamique et concepts de chaleur et de température.....	62
1. Interprétations du travail de Carnot et de Clapeyron	62

2.	Formalisation des principes de la thermodynamique	64
a.	<i>Energie et entropie</i>	64
b.	<i>La disgrégation de Clausius</i>	67
c.	<i>La formalisation de la thermodynamique selon Massieu</i>	68
d.	<i>La formalisation de la thermodynamique selon Gibbs</i>	69
3.	Une nouvelle hypothèse sur la chaleur et la température.....	71
a.	<i>Une définition atomiste de la température</i>	72
b.	<i>Les travaux de Rankine</i>	73
III.	Epilogue de la thermodynamique classique.....	74
1.	Une réponse statistique aux principes de la thermodynamique	74
a.	<i>L'introduction des probabilités dans la description des corps</i>	74
b.	<i>Interprétation statistique du deuxième principe</i>	76
2.	La thermodynamique science de l'énergie	77
a.	<i>Les contributions Duhem et de Oswald</i>	77
b.	<i>Le bouleversement du début du 20^{ème} siècle</i>	79
Chapitre 2		81
La thermodynamique dans la réforme de l'enseignement de 1902		81
I.	L'enseignement avant la réforme de 1902	81
1.	Science savante et science enseignée	82
2.	L'enseignement de la thermodynamique avant 1902.....	83
a.	<i>L'introduction de l'équivalent mécanique de la chaleur dans les programmes</i>	83
b.	<i>L'introduction de l'énergie dans les programmes</i>	87
II.	Le contexte de la réforme de 1902	88
1.	La commission d'enquête Ribot	88
a.	<i>Ordre primaire et ordre secondaire</i>	88
b.	<i>Un enseignement secondaire en crise</i>	89
2.	Organisation de l'enseignement secondaire à l'issue de la réforme de 1902	90
3.	L'enseignement de la physique dans la réforme de 1902	92
III.	La thermodynamique dans la réforme de 1902 dans le second cycle	95
1.	Les programmes officiels du 7 juin 1902	95
a.	<i>Le programme en classe de seconde</i>	95
b.	<i>Le programme en classe de terminale</i>	96
c.	<i>L'importance des travaux pratiques</i>	97
2.	Interprétation des programmes à travers quelques manuels.....	99
a.	<i>Le choix des auteurs</i>	99
b.	<i>Les concepts de température et de chaleur</i>	101
c.	<i>Introduction de la conservation de l'énergie et de l'équivalence chaleur travail</i>	102
d.	<i>Transformation de la chaleur en travail : Les machines thermiques</i>	104
IV.	L'enseignement de la thermodynamique dans le supérieur.....	107
1.	La thermodynamique dans les classes préparatoires aux grandes écoles.....	107
a.	<i>Les classes préparatoires au début du siècle</i>	107
b.	<i>Le programme de thermodynamique</i>	108
2.	L'enseignement de la thermodynamique dans la formation des enseignants.....	110

a.	<i>L'agrégation des sciences physiques</i>	110
b.	<i>La thermodynamique à l'agrégation des sciences physiques</i>	111
3.	La thermodynamique dans les ouvrages destinés aux études supérieures.....	114
a.	<i>Les ouvrages destinés aux classes préparatoires</i>	114
b.	<i>Les ouvrages de l'enseignement supérieur</i>	116
V.	Bilan de la réforme de 1902.....	119
1.	Un bilan pour les filières scientifiques.....	119
2.	Un bilan sur l'enseignement de la thermodynamique	120
Partie II.....		123
La thermodynamique : Evolutions de son enseignement en France de 1912 à la fin des années 60.....		123
Chapitre 3		125
L'enseignement de la thermodynamique de 1912 à 1947.....		125
I.	L'enseignement de la thermodynamique dans les années consécutives à la réforme de 1902	125
1.	Les éléments contextuels des réformes de 1912 à 1941	125
a.	<i>L'organisation de l'enseignement</i>	125
b.	<i>La réforme des sciences physiques dans le secondaire</i>	126
2.	La thermodynamique dans le second cycle	128
a.	<i>Le choix des auteurs</i>	128
b.	<i>La notion de température et de chaleur dans les manuels de seconde</i>	129
c.	<i>Le concept de chaleur en classe de terminale</i>	132
d.	<i>Le concept d'énergie : conservation</i>	135
e.	<i>Transformation de chaleur en travail : les machines thermiques</i>	137
f.	<i>Le concept d'énergie : dégradation</i>	138
3.	La place de la thermodynamique dans le supérieur	141
a.	<i>Les programmes des classes préparatoires</i>	141
b.	<i>La thermodynamique dans la formation des enseignants</i>	143
4.	L'évolution de l'enseignement de la thermodynamique à travers quelques manuels de l'enseignement supérieur	146
a.	<i>Le choix des auteurs</i>	146
b.	<i>Le concept de température</i>	146
c.	<i>Le concept de chaleur</i>	148
d.	<i>Du principe de conservation de l'énergie au premier principe</i>	150
e.	<i>Illustration des machines thermiques</i>	151
f.	<i>Le deuxième principe de la thermodynamique et dégradation de l'énergie</i>	153
II.	Les Réformes des années 1942-1947.....	155
1.	Le contexte politique des réformes	155
2.	Le contenu des réformes	155
III.	Un bilan de 1914 à la fin de la première moitié du 20 ^{ème} siècle	157
1.	L'avancée de la science.....	157
2.	Un bilan des réformes de l'enseignement	159

3. Les évolutions sur l'enseignement de la thermodynamique	160
Chapitre 4.....	163
L'enseignement de la thermodynamique de L'après-guerre aux années 1970	163
I. Le contexte des reformes des années 50-60	163
1. Refonder les valeurs de l'éducation de l'après-guerre	163
2. La mutation de l'enseignement des sciences.....	165
II. L'enseignement de la thermodynamique dans le second cycle.....	167
1. Contenu des réformes pour l'enseignement de la thermodynamique	167
2. La "thermodynamique" dans le second cycle.....	169
a. <i>Le choix des auteurs</i>	169
b. <i>Le concept de température en classe de seconde</i>	170
c. <i>La notion de chaleur en classe de seconde</i>	173
d. <i>Le concept d'énergie en classe de terminale</i>	176
e. <i>Le concept de chaleur en classe de terminale</i>	178
f. <i>L'introduction du concept de système en thermodynamique</i>	179
III. La thermodynamique dans le supérieur	180
1. La Réforme des études supérieures	180
a. <i>Une volonté de renforcer les filières scientifiques</i>	180
b. <i>La formation des maitres</i>	183
c. <i>Le programme de thermodynamique en classes préparatoires</i>	184
2. Etude de l'enseignement de la thermodynamique à travers quelques manuels	185
a. <i>Le choix des auteurs</i>	185
b. <i>Le langage de la thermodynamique</i>	186
c. <i>Le concept de chaleur</i>	188
d. <i>Le concept d'énergie interne</i>	191
e. <i>Les sources de chaleur</i>	192
f. <i>Chaleur et deuxième principe</i>	193
g. <i>Deuxième principe et entropie produite</i>	196
IV. Un bilan sur la période de l'après-guerre	198
1. Un bilan sur les réformes de l'enseignement	198
2. Un bilan pour la thermodynamique	200
a. <i>Un bilan dans le secondaire</i>	200
b. <i>Un bilan dans le supérieur</i>	201
Partie III	205
La rénovation de l'enseignement de la thermodynamique à compter des années 70.....	205
Chapitre 5.....	207
L'enseignement de la thermodynamique de la commission Lagarrigue au début des années 90	207
I. La réforme Lagarrigue	207

1.	Une commission pour réformer l'enseignement des sciences physiques	207
a.	<i>Une « dégradation » de l'enseignement des sciences physiques</i>	207
b.	<i>La constitution de la commission Lagarrigue</i>	210
2.	Les réponses données par la commission.....	212
II.	La thermodynamique dans la réforme du secondaire.....	215
1.	Le contenu des programmes du secondaire.....	215
2.	L'analyse du programme à travers quelques manuels	218
a.	<i>Le choix des auteurs.....</i>	218
b.	<i>Le concept de température</i>	219
c.	<i>La chaleur : énergie ou grandeur d'échange ?</i>	221
d.	<i>Interprétation des concepts de chaleur et d'énergie.....</i>	224
e.	<i>Le concept d'énergie interne</i>	226
f.	<i>Le concept de système</i>	227
III.	La réforme de l'enseignement supérieur.....	230
1.	La rénovation des programmes en classes préparatoires	230
a.	<i>Les classes préparatoires scientifiques</i>	230
b.	<i>La thermodynamique en classes préparatoires.....</i>	233
2.	Les documents à destination des études supérieures.....	236
a.	<i>Le choix des manuels et des documents d'étude.....</i>	236
b.	<i>Le concept d'énergie.....</i>	238
c.	<i>Le concept de chaleur.....</i>	241
d.	<i>Sources de chaleur et pompe à chaleur.....</i>	243
e.	<i>Le concept de système thermodynamique.....</i>	244
f.	<i>Bilan entropique et transformations quasistatiques</i>	246
IV.	Un bilan des réformes des années 1970-1990.....	250
1.	L'enseignement après la commission Lagarrigue.....	250
2.	Un bilan pour l'enseignement de la thermodynamique	252
a.	<i>L'énergie au cœur de l'enseignement des sciences</i>	252
b.	<i>Un bilan pour l'enseignement secondaire.....</i>	254
c.	<i>Un bilan pour l'enseignement supérieur.....</i>	255
	Chapitre 6	259
	L'enseignement de la thermodynamique à compter de 1993	259
I.	Le contexte des réformes des années 90.....	259
1.	Une refonte de l'enseignement	259
a.	<i>La seconde explosion scolaire</i>	259
b.	<i>Le baccalauréat scientifique.....</i>	261
2.	La rénovation pédagogique.....	261
a.	<i>Commissions de réflexions sur les programmes</i>	261
b.	<i>Les grands thèmes conducteurs.....</i>	264
3.	La réforme de la fin des années 1990.....	266
II.	La thermodynamique dans la réforme du secondaire.....	269
1.	Le contenu de la réforme dans le secondaire.....	269
a.	<i>La réforme 1993 - 1995</i>	269

b.	<i>La réforme de la fin des années 90</i>	272
2.	L'analyse des programmes de thermodynamique du secondaire.....	275
a.	<i>La méthode de recherche et d'analyse</i>	275
b.	<i>Le concept de température : une description microscopique</i>	276
c.	<i>Formes et sources d'énergie</i>	278
d.	<i>Transfert d'énergie et « chaînes énergétiques »</i>	280
e.	<i>Les machines thermiques et la dégradation de l'énergie</i>	282
f.	<i>L'ambiguïté du langage sur la chaleur</i>	284
III.	La réforme en classes préparatoires.....	292
1.	Une organisation par filière renforcée.....	292
2.	Le contenu des programmes.....	293
a.	<i>Les nouveaux programmes de 1995</i>	293
b.	<i>Le concept de chaleur en classes préparatoires</i>	296
IV.	Un bilan sur les années 90.....	297
1.	Un bilan sur l'enseignement dans le secondaire.....	297
a.	<i>Echec des réformes : quels sont les responsables ?</i>	298
b.	<i>La place des mathématiques dans l'enseignement secondaire</i>	300
2.	Un bilan sur l'enseignement supérieur.....	301
3.	Un bilan sur les recherches à mener.....	302
	Partie IV	305
	Etude de l'enseignement des concepts de système, de chaleur et d'entropie après les réformes des années 90	305
	Chapitre 7	307
	Le concept de <i>système</i> en thermodynamique à compter des années 1990	307
I.	La notion de <i>système</i> thermodynamique dans les programmes.....	307
1.	Nécessité du concept de système en thermodynamique.....	307
2.	Le <i>système</i> en classes préparatoires aux grandes écoles.....	311
3.	Le <i>système</i> dans le secondaire.....	312
a.	<i>Le système dans les programmes du secondaire</i>	312
b.	<i>Le système dans les manuels et articles destinés au secondaire</i>	315
II.	Les définitions de la notion de système.....	317
1.	Méthodologie d'analyse.....	317
2.	La diversité des définitions.....	320
a.	<i>Définir ou non ce qu'il y a dans un système</i>	321
b.	<i>Définir le système par son volume de contrôle</i>	323
c.	<i>Système simple ou système composite</i>	324
3.	Quelles propositions de définition pour le système thermodynamique ?.....	326
III.	Le choix du système en thermodynamique.....	329
1.	Choisir le système dans la résolution des problèmes de thermodynamique : illustration sur un sujet de concours.....	329
2.	La résolution d'un problème selon le système.....	332
a.	<i>Analyse des deux corrections suivant le système choisi</i>	332

b.	<i>Analyse des copies d'étudiants de CPGE et de Master enseignement.....</i>	337
c.	<i>Analyse du rapport de jury.....</i>	340
3.	Comment résoudre le problème du compresseur ?.....	341
a.	<i>Le compresseur un problème de mécanique.....</i>	342
b.	<i>Un autre choix de système pour résoudre le problème du compresseur.....</i>	344
c.	<i>Le compresseur un problème de thermodynamique.....</i>	346
d.	<i>Bilan sur le problème du compresseur.....</i>	347
IV.	Conclusion.....	348
Chapitre 8		351
Le concept de <i>chaleur</i> à compter des années 1990		351
I.	Un premier constat : confusion chaleur, température et énergie.....	351
1.	Un constat dans des documents d'accompagnement.....	352
a.	<i>Un constat dans les dictionnaires</i>	<i>352</i>
b.	<i>Un constat à travers certains supports à destination de l'enseignement de la thermodynamique</i>	<i>353</i>
2.	Un problème du langage quotidien.....	357
II.	Les définitions du concept de <i>chaleur</i>	359
1.	Méthodes de recherche	359
2.	Classements et analyses des définitions	361
a.	<i>Les définitions de la chaleur.....</i>	<i>361</i>
b.	<i>Les dénominations de la « chaleur ».....</i>	<i>365</i>
3.	Un premier bilan	368
III.	L'utilisation du mot <i>chaleur</i> dans le supérieur	369
1.	Etude des sujets de concours.....	369
a.	<i>Les concours d'entrée en école d'ingénieurs.....</i>	<i>369</i>
b.	<i>Le concours de l'agrégation.....</i>	<i>372</i>
2.	Un bilan sur l'introduction de l'expression « transfert thermique »	374
a.	<i>Le mot chaleur dans les concepts de thermodynamique</i>	<i>374</i>
b.	<i>L'introduction du « transfert thermique » dans le secondaire.....</i>	<i>375</i>
c.	<i>L'introduction du « transfert thermique » dans le supérieur.....</i>	<i>377</i>
Chapitre 9		385
L'enseignement du deuxième principe de la thermodynamique à compter des années 1990		385
I.	Sens de l'entropie et du deuxième principe.....	385
1.	Le contenu de la réforme des CPGE de 1995	385
2.	La place du deuxième principe en thermodynamique	386
a.	<i>Nécessité du deuxième principe</i>	<i>386</i>
b.	<i>Un constat sur le deuxième principe</i>	<i>390</i>
3.	Les notions de réversibilité et d'irréversibilité	392
a.	<i>Transformations par voies réversibles et par voies irréversibles</i>	<i>392</i>
b.	<i>Transformations par voie quasistatique et réversibilité.....</i>	<i>394</i>

4.	Les significations de l'entropie	396
a.	<i>La flèche du temps</i>	396
b.	<i>La signification statistique</i>	397
c.	<i>La notion d'ordre et de désordre</i>	398
d.	<i>La perte de l'information</i>	401
e.	<i>L'homogénéité</i>	403
5.	Quelles places pour les énoncés historiques du deuxième principe ?	405
II.	Les diagrammes thermodynamiques possédant une transformation « infinitherme »	409
1.	Les diagrammes thermodynamiques	409
a.	<i>Importance des représentations graphiques</i>	409
b.	<i>Intérêt pédagogique des diagrammes thermodynamiques possédant une transformation « infinitherme »</i>	410
c.	<i>Les différents cycles possédant une transformation « infinitherme »</i>	411
2.	Premier cas : étude du diagramme triangulaire moteur	412
a.	<i>Première approche du problème</i>	413
b.	<i>Deuxième approche du problème</i>	416
c.	<i>Calcul du rendement</i>	420
d.	<i>Application au cas particulier où $q=2$ et $k = 114$</i>	423
3.	Deuxième cas : étude du diagramme possédant une transformation « infinitherme » et adiabatique réversible	428
a.	<i>Conditions sur k et q pour la réalisation du cycle</i>	428
b.	<i>Calcul du rendement sur le cycle dans une première approche</i>	429
c.	<i>Calcul du rendement sur le cycle dans une seconde approche</i>	429
d.	<i>Application au cas où $q = 2$ pour un gaz parfait monoatomique</i>	431
III.	Conclusion	432
	Conclusion Générale	435
	Annexes	441
I.	Annexe n°1 : Les définitions de « système » en thermodynamique	441
1.	Ouvrages de Physique	441
2.	Ouvrages de Chimie	454
3.	Ouvrages de Biologie	457
II.	Annexe n°2 : Sujet et corrigés du concours CCP 2005	460
1.	Sujet du concours	460
2.	Correction n°1	462
3.	Correction n°2	464
III.	Annexe n°3 : Définition de la notion de « Chaleur »	468
1.	L'introduction via le gradient de température	468
2.	L'introduction via le travail macroscopique	469
3.	La référence au premier principe	471
4.	La référence au microscopique	473
a.	<i>Ordre et désordre</i>	473
b.	<i>Travail microscopique</i>	475

IV. Annexe n°4 : Questionnaire sur les concepts de température, de chaleur et de transfert thermique	477
Bibliographie	479
I. Sources primaires	479
II. Sources secondaires	502
Table des illustrations	503
I. Figures	503
II. Tableaux	507
Index	509

INTRODUCTION

La thermodynamique est l'un des thèmes des sciences physiques les plus ardues à apprendre et à enseigner. Il est possible pour moi de me placer sous ces deux angles de réflexion puisque j'ai été étudiant en classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques au début des années 2000 et je suis aujourd'hui, enseignant de physique dans ces mêmes classes. Le questionnement sur la thermodynamique est incessant. Lorsque l'on croit maîtriser une notion, il arrive fréquemment d'être confronté à une difficulté qui n'avait pas été anticipée. Or, ce problème ne semble pas récent. Dans son *Cours de Thermodynamique* paru en 1913, Henri Bouasse (1866-1953) précise en guise d'introduction : « *Les étudiants de nos Facultés ont horreur de la Thermodynamique, ils disent rien n'y comprendre.* »¹ Aussi, l'étude qui suit propose d'analyser l'évolution dans l'enseignement français de quelques concepts de la thermodynamique.

Pour se faire, il a tout d'abord fallu fixer la période sur laquelle nous nous proposons de travailler. Si la thermodynamique voit le jour avec les travaux fondateurs de Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), William Thomson (1824-1907, futur Lord Kelvin) et Rudolf Clausius (1822-1888), c'est notamment au cours du 20^{ème} siècle que « *l'industrie fille de la science du 19^{ème} siècle règne [...] en maître* »², comme le souligne, en 1908, Carlo Bourlet (1866-1913), mathématicien français et membre de la Commission internationale de l'enseignement mathématique. C'est également au début des années 1900 que les questions de l'enseignement scientifique se posent un peu partout en Europe et notamment en France. En effet, surtout à cette époque, la science et les évolutions technologiques sont omniprésentes dans le quotidien. Aussi, il paraît nécessaire de donner aux sciences une place importante dans l'enseignement. Notre étude va donc débiter dans les années 1900. Au cours de ces années, les réformateurs proposeront notamment des réflexions sur l'organisation, les objectifs, les contenus et les pratiques d'enseignement. Les sciences devront jouer un rôle important dans la formation de l'Homme aux mêmes titres que les humanités classiques. Car, aux travers de leur caractère expérimental, elles introduisent « *plus de vie et de sens du réel* »³, comme le souligne le mathématicien Emile Borel (1871-1956) en 1904.

¹ (Bouasse, 1913a) Introduction p.vii

² Dans une conférence intitulée « *La pénétration réciproque des mathématiques pures et des mathématiques appliquées dans l'enseignement secondaire* ». Citation extraite de (Belhoste, et al., 1996) p.1

³ Dans les « *exercices pratiques en mathématiques dans l'enseignement secondaire* », Conférence du Musée pédagogique. Citation extraite de (Belhoste, et al., 1996) p.2

Il faut également replacer cette étude dans le contexte scientifique de l'époque. Aussi, nous proposons de revenir dans une première partie sur l'émergence des concepts de la thermodynamique et notamment ceux de *température*, de *chaleur*, d'*énergie* et d'*entropie*. La thermodynamique et son enseignement semblent, plus que toute autre science, fortement marqués par l'histoire des notions qu'ils utilisent. En effet, comme le soulignent par exemple Médard et Tachoire dans leur *Histoire de la thermochimie* en 1994, « *quand un concept nouveau apparaît en sciences [...], les mots qui servent à le désigner sont initialement mal fixés. On retrouve des termes différents, non seulement chez des auteurs différents, mais parfois également chez un même auteur* »⁴. Ils ajoutent alors un exemple propre à la thermodynamique pour illustrer leur propos : « *on ne peut douter que, dans la pensée de Lavoisier⁵ et dans celle de Laplace⁶, chaleur et température n'aient été des notions différentes bien distinctes, mais il leur arrive d'employer le premier de ces mots à la place du second : à propos du thermomètre, Lavoisier et Laplace parlent, par exemple, des "points fixes de chaleur".*»⁷ Médard et Tachoire indiquent également les problèmes sémantiques qui sont présents dans les écrits des auteurs scientifiques : « *Quand on lit les auteurs scientifiques anciens, on a de la peine à bien comprendre le sens qu'ils donnaient aux termes et aux expressions employés ; ils n'en indiquaient pas toujours les définitions et, quand ils le faisaient, ils s'exprimaient parfois peu clairement [...]. En outre, d'un auteur à un autre, il pouvait y avoir des différences importantes de conception ; par exemple, l'expression « chaleur spécifique », que l'on rencontre pour la première fois sous la plume de Magellan⁸ (1781), n'avait pas, pour ce dernier, la même signification que lui donneront, trois ans plus tard, Lavoisier et Laplace dans le *Mémoire sur la chaleur* ; ceux-ci ont clairement indiqué le sens qu'ils donnaient à cette expression, sens qu'elle a conservé jusqu'à nos jours.* »⁹ Dans notre travail, nous nous efforcerons de mettre en évidence ces problèmes de définitions ainsi que leurs évolutions au cours des périodes étudiées. Nous insisterons notamment sur la multiplication des différentes terminologies pour désigner une même notion et tâcherons de montrer que cette richesse de vocabulaire est parfois source de grandes difficultés de compréhension.

En outre, nous limiterons notre étude à la thermodynamique classique liée à la physique, sans faire référence aux notions spécifiques rencontrées dans les cours de chimie notamment. Alors

⁴ (Médard, et al., 1994) p.33

⁵ Antoine Laurent de Lavoisier (1743 - 1794)

⁶ Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

⁷ (Médard, et al., 1994) p.33

⁸ Jean Hyacinthe de Magellan (1723-1790) est un philosophe et scientifique portugais résidant à Londres. Il contribua notamment à faire connaître en France les avancées et découvertes britanniques. Il commenta, notamment les travaux sur les chaleurs spécifiques du Docteur Aidair Crawford (1748-1794) qui défend ce que nous verrons plus tard comme la théorie substantialiste de la chaleur. Aussi, pour Magellan, la chaleur spécifique est la quantité de chaleur dite absolue (ou feu) qui appartient à chaque élément ou partie d'un corps quelconque dans un état donné. (Marivetz, et al., 1786)

⁹ (Médard, et al., 1994) p.33

qu'au début du 20^{ème} siècle la thermodynamique statistique voit le jour, notamment sous la plume de Josiah Willard Gibbs (1839-1903) qui publie en 1902 ses *Elementary Principles of Statistical Mechanics* (*Principes élémentaires de la mécanique statistique*), la thermodynamique classique reste une partie importante de la physique par les concepts qui lui sont liés et notamment ceux d'énergie et d'entropie. Aussi, cette science du 19^{ème} siècle, au-delà de son intérêt industriel évident, apparaît comme un pilier fondamental de la physique, dans laquelle l'énergie est une notion globalisante et fédératrice.

A travers notre étude, nous nous intéresserons à la thermodynamique classique dispensée dans l'enseignement secondaire et dans l'enseignement supérieur. Nous avons volontairement écarté l'étude du premier cycle, car comme le rappelle le bulletin officiel de 1999, « *une règle guide l'élaboration des programmes scientifiques (sauf en mathématiques) : L'enseignement [secondaire] du lycée doit être construit comme un tout, donc indépendant de l'enseignement [du premier cycle] fait au collège qui ne se place pas sur le même registre de modélisation et de formalisation.* »¹⁰ En outre, nous constaterons à travers l'étude des manuels et des programmes, que les notions relatives à la thermodynamique sont abordées dès la classe de seconde, comme si aucun enseignement de science n'avait été dispensé auparavant.

Notre analyse s'appuiera sur l'étude des documents officiels comme les programmes, les instructions, les référentiels d'accompagnement *etc.* Il s'agira notamment d'analyser le contenu proposé et leurs évolutions sur une période allant de 1902, suite à la réforme Leygues, jusqu'à la première décennie des années 2000. Pour étayer cette étude, nous proposerons de parcourir un certain nombre d'ouvrages et de manuels d'enseignement. Ceux-ci ont été choisis suivant divers critères que nous tenterons de justifier au cours de notre exposé. Il s'agit notamment d'auteurs célèbres et/ou qui ont pris part aux différentes réformes ou encore de collection d'ouvrages de référence. Enfin, nous compléterons notre réflexion en introduisant les témoignages des acteurs de l'époque que sont les enseignants, à travers des extraits de conférences ou d'articles parus notamment dans l'Union des Physiciens. Cette association créée en 1907 à la suite de la réforme de 1902 à l'initiative des professeurs de sciences physiques, publie chaque mois, un bulletin. Celui-ci deviendra un outil de communication efficace et incontournable permettant les échanges scientifiques et pédagogiques entre enseignants de toute la France.

Par ailleurs, l'étude que nous proposons de faire s'étale sur plus d'un siècle. Cette longue période va nous permettre d'analyser l'évolution progressive des concepts de la thermodynamique dans l'enseignement secondaire et supérieur français, à travers notamment le concours de l'agrégation et les classes préparatoires aux grandes écoles. Ceci en fait un travail original, dans la mesure où seules des études partielles ont été proposées sur la thermodynamique : étude de l'enseignement dans le premier cycle, étude du concept d'énergie et de sa conservation, étude des

¹⁰ (BO, 12 août 1999) p.5

significations de l'entropie... Nous proposons d'aller au-delà, en analysant de façon simultanée les concepts de température, chaleur, énergie et entropie, qui par leurs définitions parfois ambiguës peuvent engendrer de lourdes confusions pour les étudiants mais également pour les enseignants. On peut néanmoins citer des travaux de références sur l'enseignement de la thermodynamique, comme ceux de Nicole Hulin, Jacqueline Agabra, Martine Méheut, Chantal Duprez *etc.* Les analyses et conclusions de leurs articles serviront de base à notre réflexion.

Aussi, cette étude se veut être une réflexion sur les réformes d'hier, notamment en thermodynamique, pour mieux appréhender les questions d'aujourd'hui sur l'enseignement de cette science qui reste autant appréciée que redoutée.

Nous débuterons notre travail par une **première partie** portant sur l'émergence de la thermodynamique. En partant des considérations d'Aristote sur le *chaud* et le *froid* et le développement des premiers thermoscopes, nous mettrons en évidence l'apparition progressive des concepts de *température* et de « *chaleur* ». Les travaux notamment de Joseph Black (1728-1799), Lavoisier et Laplace poseront les bases de la calorimétrie sur l'hypothèse du *calorique*. Enfin, nous verrons comment la thermodynamique des principes a vu le jour au travers des développements de Carnot, Thomson et Clausius. Mais la fin du 19^{ème} siècle sera également marquée par une importante confrontation entre atomiste et énergétiste. Elle marquera profondément la thermodynamique et jettera les prémices de la thermodynamique statistique. Aussi, avant de présenter la réforme de l'enseignement de 1902 qui sera l'objet du deuxième chapitre, il nous a paru nécessaire de comprendre comment les développements de la thermodynamique classique se sont diffusés dans l'enseignement français. Nous présenterons notamment les raisons qui ont poussées les hommes politiques à réformer le système éducatif français en ce début du 20^{ème} siècle. Il s'agira d'exposer en quoi les *sciences* et notamment les sciences physiques deviennent des disciplines incontournables dans la formation de l'Homme. En ce qui concerne la thermodynamique, nous montrerons la place qu'ont les notions de température et de « *chaleur* » ainsi que le concept d'énergie, sa conservation et sa dégradation dans l'enseignement secondaire et supérieur.

La **deuxième partie** de notre étude portera sur l'enseignement de la thermodynamique classique dans le secondaire et le supérieur des années 1912 à la fin des années 1960. Cette longue période que nous découperons en deux chapitres, se justifie par la lente évolution de l'enseignement de la thermodynamique classique. En effet, comme le souligne en 1959 dans un article du Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP), Jean Mercier (1891-1962), ancien recteur de l'académie de Caen puis professeur à la faculté des sciences de Bordeaux, la thermodynamique n'a pas ou peu changé dans sa présentation depuis l'énoncé des principes : « *La Thermodynamique, telle qu'on l'enseigne, telle qu'elle est exposée dans les livres, apparaît comme une Science arrivée à son terme [...] Il suffit pour s'en convaincre d'ouvrir et de comparer les traités de la fin du XIX^o siècle et ceux de maintenant. La présentation en semble figée.* » Mercier rajoute également, et de manière imagée un sentiment que nombre de ses collègues ressentent à propos de cette science : « *La Thermodynamique classique m'est toujours apparue comme une*

*vieille dame respectable et dont la simple vue vous donnait « des complexes », toute compassée dans ses atouts de 1900, avec un bonnet à rubans, son flot de jupons superposés tombant jusqu'aux chevilles, avec de longues robes à traîne pour qu'on n'en puisse voir les dessous et avec son face à main pour vous voir venir et vous dire « Mon cher ami, pas droit de regard, les principes ne se démontrent pas ! »*¹¹ Il apparaît donc nécessaire de montrer les étapes de cette volonté de renouveau qui aboutira vers une refonte de l'enseignement de la thermodynamique. Nous présenterons dans un premier temps, la période allant des années 1912 à 1947. Elle sera notamment marquée par une prise de conscience de la difficulté sémantique pour aborder les notions de thermodynamique. Par la suite, dans un quatrième chapitre, sur une période allant des années 1950 à la fin des années 60, nous présenterons les volontés de réforme dans l'enseignement des sciences. En ce qui concerne la thermodynamique, il s'agira des premières innovations dans la présentation des principes, comme le suggère Mercier, toujours de façon très imagée : *« Mon ambition serait de vous présenter son arrière-petite-fille, une jeune fille moderne, toute guillerette, à allure sportive, avec des jupes courtes, au besoin en short et avec une queue de cheval. »*¹² C'est également au cours de cette période qu'émergera le concept de *système thermodynamique* qui prendra une place de plus en plus fondamentale dans l'enseignement de la thermodynamique.

Dans une **troisième partie**, allant des années 1970 au début des années 2000, nous étudierons les différentes réformes qui ont engendrées une réelle innovation dans l'enseignement de la thermodynamique. Dans le chapitre 5, il s'agira de présenter les avancées proposées par la commission Lagarrigue et leurs impacts dans les années qui suivent. Durant cette période, l'approche microscopique sera privilégiée et le concept d'énergie jouera un rôle fondamental dans l'enseignement de la thermodynamique, fortement imprégné du contexte de l'époque. Nous verrons, au chapitre 6, qu'au cours des années 90, dans la continuité des années précédentes, une réorganisation de l'enseignement de la thermodynamique sera proposée. Dans le secondaire tout d'abord où la température sera définie indépendamment du concept de chaleur. Puis, la thermodynamique dans le supérieur, sera plus que jamais une science des principes, basée sur les bilans. L'énergie et l'entropie deviennent les concepts de base pour la description du système thermodynamique. Nous montrerons en outre, que cette refonte est aussi marquée par un choix sémantique, puisque la chaleur devra officiellement porter le nom de *transfert thermique*.

Aussi, pour analyser cette période nous proposerons, dans une **quatrième partie**, une étude particulière sur trois chapitres, consacrée tout d'abord au *système thermodynamique* (chapitre 7), au *transfert thermique* ou « *chaleur* » (chapitre 8) et à l'*entropie* (chapitre 9) . Ces trois notions sont, comme nous allons le montrer, intimement liées. Tout d'abord, la notion de système thermodynamique apparaîtra comme incontournable pour comprendre la distinction

¹¹ (Mercier, 1959) p.452

¹² (Mercier, 1959) p.453

entre grandeurs caractéristiques d'un système donné et grandeurs de transfert. Nous nous intéresserons tout particulièrement au *transfert thermique*, encore appelé *chaleur*, qui est un concept difficile à présenter dans l'enseignement secondaire et supérieur. En outre, le transfert thermique étant présent à la fois dans le premier principe et dans le deuxième principe, il sera important de s'intéresser à la représentation d'une grandeur particulière à la thermodynamique : l'entropie. Nous aborderons notamment la possibilité de son introduction à travers les énoncés historiques, en s'intéressant tout particulièrement aux cycles thermodynamiques possédant une portion de droite, dans le diagramme de Clapeyron. Il s'agira de montrer l'intérêt de ces représentations dans l'approche des différents concepts de la thermodynamique que nous venons de mentionner.

De plus, dans ce travail, nous proposons de mettre en évidence la multiplicité des définitions de ces notions, en analysant un grand nombre d'ouvrages dédiés à la thermodynamique. Si, dans un premier temps, cette diversité peut apparaître comme une richesse, nous tâcherons de montrer qu'elle peut être la source de graves confusions. En outre, il s'agira de présenter à travers l'étude d'extraits de concours ou d'exercices, les incohérences ou les ambiguïtés dans les énoncés, dues généralement, à des problèmes de langage. Enfin, pour mettre en évidence les difficultés auxquelles peuvent être confrontés les étudiants, nous leur avons proposé de résoudre des problèmes particuliers de thermodynamique ou de répondre à des questionnaires ciblés que nous avons élaborés. Il s'agira de présenter l'impact de l'enseignement et/ou du vocabulaire quotidien sur la représentation de certaines notions de thermodynamique. Notre analyse se terminera par des pistes possibles de réflexions pour une meilleure appropriation de ces concepts.

PARTIE I

LA THERMODYNAMIQUE : DE SON EMERGENCE A SON ENSEIGNEMENT EN FRANCE AU DEBUT DU 20EME SIECLE

CHAPITRE 1

UNE BREVE HISTOIRE DE LA THERMODYNAMIQUE : NAISSANCE DES CONCEPTS DE TEMPERATURE, CHALEUR, ENERGIE ET ENTROPIE

Si l'on veut retracer l'histoire de l'introduction d'une idée de physique dans l'enseignement, il est nécessaire de connaître comment s'est construit et s'est diffusé le concept dans la communauté scientifique. Dans le travail que nous proposons, il s'agit de mettre en avant la naissance des concepts de chaleur, température et d'entropie jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle afin de comprendre dans quel contexte scientifique la réforme de l'enseignement de 1902 a pu voir le jour.

I. LES PREMIERES THEORIES DE LA CHALEUR

Les peuples de la préhistoire disposaient sans aucun doute d'un nombre considérable de connaissances auxquelles on pourrait accorder un caractère scientifique. En effet, savoir reconnaître des roches, choisir celles qui conviennent à la fabrication d'outils, d'armes et savoir les tailler, les polir *etc.* relève de ce qu'on appelle la *géologie*. Savoir reconnaître les plantes utiles à l'alimentation et parfois aux soins médicaux relève de la *botanique* et de la *pharmacologie*. La fabrication des armes, d'arcs, du tour de potier et l'utilisation du mouvement circulaire relève de connaissances qu'on pourrait qualifier de connaissances en *physique*. Reconnaître le matériau

approprié à l'utilisation et le préparer *etc.*, relève de *chimie*. Sans multiplier les exemples, on pourrait dire que c'est en partie sur ces « pré-géologie », « pré-botanique », « pré-physique », « pré-chimie » *etc.*, dont certaines étaient très élaborées, que se sont édifiées les sciences antiques, points de départ de plusieurs de nos sciences actuelles.

Un événement important concernant l'histoire du savoir est la fondation par Platon (427 av. J.C. - 347 av. J.C.) de l'Académie à Athènes. Platon est un intellectuel qui essaye d'élaborer une connaissance générale du monde : la *philosophie*. Nul doute que l'apport de Platon est très important, puisque l'Académie restera pendant des siècles le centre de pensée le plus prestigieux du monde. Même quand elle cessera de fonctionner, au premier siècle avant notre ère, les ouvrages de Platon seront encore une des bases de la formation de l'élite. Cependant, son apport à la physique reste très limité.

En 335 avant Jésus-Christ, Aristote (384 av. J.C. - 322 av. J.C.), ancien élève de Platon, fonde le Lycée à Athènes. Il s'agit également d'une école de philosophie concurrente de l'Académie. Elle jouira pendant toute l'antiquité d'un prestige aussi grand que celle de Platon. Evidemment, l'enseignement d'Aristote reprend beaucoup d'idées du maître. Cependant, il réoriente la pratique philosophique en consacrant beaucoup plus de place à l'observation. Si bien que l'apport d'Aristote à la physique est nettement supérieur à l'apport des platoniciens. Cet apport s'est traduit par la publication d'un copieux traité de physique en huit livres, traitant du mouvement.

C'est dans le cadre de la philosophie d'Aristote que nous commençons notre analyse.

1. Du chaud et du froid à la chaleur

a. Les sensations de chaud et de froid dans l'Antiquité

La philosophie grecque est caractérisée avant tout par un souci d'intelligibilité : on voulait comprendre les phénomènes en les insérant dans un *système* de pensées structurées. Ainsi la physique d'Aristote comporte :

1. Les quatre éléments d'Empédocle (490 av. J.C. — 435 av. J.C.) : la terre, l'eau, l'air et le feu, qui sont tous des aspects d'une substance première. Ces éléments se combinent suivant des principes d'attraction (*amour*) et de répulsion (*haine*) qui agissent en alternance et sont la source des changements multiples observés dans la nature. Mais ce changement n'affecte pas les éléments premiers.

2. Dans son traité sur les éléments et de leurs transformations "*De la génération et de la corruption*", Aristote associe à la matière quatre qualités fondamentales relatives au sens du toucher : le *chaud*, le *froid*, l'*humide* et le *sec*. Ces qualités agissent sur la matière première par combinaisons non contraires pour donner les quatre éléments. Ainsi, le Feu correspond au couple chaud-sec, l'Eau est froide-humide, la Terre est froide-sèche et l'Air est humide-chaud.

3. Les éléments peuvent se transformer l'un dans l'autre, de manière cyclique, une qualité changeant à la fois.
4. Les combinaisons d'éléments différents sont de trois types : un correspond au mélange mécanique (*Synthesis*), l'autre type représente l'analogie de nos combinaisons chimiques (*Mixis*) et le troisième l'analogie de nos solutions (*Krasis*).
5. L'univers est unique, limité et sphérique. Cet univers formé de sphères concentriques se compose de deux mondes. Le monde sublunaire fait des quatre éléments et comprenant la Terre et son atmosphère est un monde de changement et de corruption. La Terre, sphérique et immobile en occupe le centre et autour d'elle l'Eau, l'Air et le Feu se répartissent en couches concentriques. Le monde supralunaire, comprenant les planètes visibles (y compris la Lune et le Soleil) et fixées également sur des sphères concentriques et transparentes, est un monde de perfection¹³. Au-delà de ces dernières sphères célestes se trouve la sphère des étoiles fixes, et, au-delà de cette sphère c'est le néant : il n'y a même pas d'espace.
6. La notion de mouvement englobe tout type de changement : l'altération de la substance d'un objet, la dilatation et la contraction, le changement de qualité fondamentale et la translation.
7. Le monde supralunaire ne connaît que le mouvement circulaire uniforme. Le monde sublunaire connaît trois types de mouvement de translation : le *mouvement naturel* où chaque élément tend à rejoindre sa sphère, par exemple, la Terre descend et le Feu monte ; le *mouvement violent* où un objet peut subir l'influence d'une force et se déplacer de manière non naturelle tant que cette force est appliquée ; et enfin, le *mouvement volontaire*, effectué par les humains et les animaux. Selon Aristote, en langage moderne, la vitesse v d'un objet est proportionnelle à la force F appliquée, divisée par la résistance R du milieu : $F = Rv$.

Compte tenu de son immense popularité qui perdurera jusqu'au 17^{ème} siècle, ce système possède sans aucun doute une certaine cohérence. Cependant, beaucoup de points de rupture importants peuvent être soulevés entre cette physique ancienne et la physique qui émergera des travaux de Galilée (1564-1642) et de Isaac Newton (1642-1727) entre autres. Dans cette présente étude, nous allons nous restreindre à évoquer ou/et à analyser en détail uniquement les notions qui nous intéressent par la suite.

Tout d'abord, la loi du mouvement est en fait correcte pour les vitesses terminales dans les milieux visqueux, mais ignore complètement la phase d'accélération. De cette loi, Aristote déduit que le vide est impossible, car la résistance du vide ne pourrait être que nulle, ce qui impliquerait une vitesse infinie, ce qui ne pourrait être acceptable. Si le vide n'existe pas, alors les atomes n'existent pas non plus et donc la matière est divisible à l'infini.

¹³ On y trouve notamment le cinquième élément, appelé *quintessence* ou *ether*.

D'après ce système, la physique d'Aristote est qualitative et la sensation est la donnée immédiate et préférentielle de l'information. Aristote procède donc par induction ; c'est-à-dire à partir des faits, il élabore une théorie générale qui sera considérée par la suite comme étant bien établie. Il ne la vérifie ensuite plus et ne la confronte pas à de nouveaux faits. Ce sont au contraire, ces derniers qui devront se conformer à la théorie.

La première sensation connue est le *toucher*. Il se fait par contact direct de l'objet et de la peau. Il restera d'ailleurs longtemps le processus de base admis par les philosophes de la nature : *ne sera reconnu comme déterminant que ce qui sera touché*. Les autres sensations, l'ouïe, la vue et l'odorat sont également pris en compte mais avec beaucoup moins d'importance car susceptibles de provoquer des illusions et des erreurs. En référence au toucher, tout changement ou toute transmission d'un quelconque effet matériel ne peut donc se produire que s'il y a **contact**, soit direct, soit par le biais d'un intermédiaire entre le corps provoquant ledit effet et l'organe qui le reçoit. Ce système d'Aristote préconise que toutes les substances sont considérées comme des mélanges en combinaisons variables des quatre éléments. Or, les éléments sont issus de l'action des qualités sur la substance première ; et comme l'action en question est forcément de contact, on peut déduire que la physique d'Aristote véhicule, peut-être de manière implicite, l'idée de la matérialisation (ou substantialisation) de ces qualités, même si, pour Aristote, le froid correspond à l'absence de chaleur. Quoi qu'il en soit, on peut dire, de manière certaine, que, dans le système d'Aristote, toutes les substances possèdent les qualités du chaud ou/et du froid. Pour insister sur l'idée de la matérialisation de ces qualités, Pierre de Gassendi (1592-1655), connu pour son opposition à Aristote et qui connaît de ce fait parfaitement le système de ce dernier, envisage deux sortes de matière thermique, l'une correspond au chaud et l'autre au froid, comme le souligne Eustache Le Noble (1643-1711) en 1718 :

« II [Gassendi] n'est pas aussi d'accord avec Aristote, qui veut que la froideur ne soit qu'une privation de la chaleur, mais il veut que l'une et l'autre soient une entité réelle, puisque la chaleur se produit par l'action ou l'intromission des Atomes Calorifiques, et le froid par l'intromission des Atomes Frigorifiques ; car par exemple, lorsque autour d'une bouteille pleine d'eau on met un amas de charbons, il en sort des corpuscules qui entrent dans l'eau et l'échauffent ; et lorsque autour de la même bouteille on met de la neige ou de la glace pilée avec du nitre, du salpêtre ou du sel, ce salpêtre et cette neige poussent des Atomes Frigorifiques dans cette eau qui la gèlent. Or ce froid de l'eau gelée n'est point une simple privation de la chaleur, mais une entité réelle produite par les Atomes qui opèrent le froid. »¹⁴

Nous reviendrons sur ce point dans un prochain paragraphe.

¹⁴ (Le Noble, 1743) p.422

Parfois identifiée au feu, mais plus souvent à une émanation du feu dans l'antiquité, la *chaleur* est produite par le mouvement pour Platon et Aristote, et aussi par l'éther excité par le soleil et les étoiles chez ce dernier (ce qui explique l'ajout d'un cinquième élément dans le système d'Aristote). Dans l'approche d'Aristote, les éléments peuvent se transformer l'un dans l'autre, de manière cyclique en changeant une qualité à la fois. Autrement dit, il n'y a aucune asymétrie à soulever entre les qualités contraires et donc entre le chaud et le froid. Or, dans notre langage actuel, on dit plus couramment que la « chaleur » passe du feu à l'eau, et non que la « froideur » passe de l'eau au feu¹⁵. Il y a donc un transfert à sens unique et la manifestation d'une asymétrie très nette. Même si, dans la physique actuelle, les mots *chaud* et *froid* ne représentent aucun concept en science, ils sont encore utilisés dans le langage de tous les jours et dans beaucoup d'écrits y compris scientifiques. Il est utile de préciser que dans ces derniers, normalement, le froid ne représente pas une entité, mais plutôt un mot pour désigner l'absence de « chaleur » ; de même lorsqu'on dit qu'un corps est chaud (respectivement froid) c'est tout simplement pour indiquer que sa température est élevée (respectivement basse).

S'opposèrent à la théorie des quatre éléments, les philosophes Leucippe (vers 460 av. J.-C.- 370 av. J.-C) et son disciple Démocrite d'Abdère (vers 460 av. J.-C.-370 av. J.-C), appelés atomistes, car ils prétendaient plutôt que la matière est faite de particules éternelles et indestructibles appelées *atomes* (qui veut dire "insécable", en grec) : il n'y a dans la nature que des atomes et du vide. Ce vide rend possible le mouvement des atomes et par leur union ou leur séparation, ils forment la pluralité des choses. Ainsi, la philosophie d'Aristote n'est pas la seule à donner une conception du chaud et du froid. Dans la vision épicurienne du monde, l'idée du chaud et du froid est associée à la représentation d'un monde basée cette fois sur l'existence justement des atomes et du vide. Lucrèce (peut-être 98 avant J.-C. -55 avant J.-C.) au 1^{er} siècle avant J.-C. suggère, dans "*De la nature*", que « [...] la chaleur est un effluve de corpuscules, ou plutôt d'atomes ronds, éminemment mobiles et très petits. De ces trois circonstances résulte qu'ils arrivent vite aux corps, qu'ils y pénètrent aisément, qu'ils y circulent de tous côtés, au point même qu'ils tendent à dilater, à séparer, à dissoudre [...] Le froid, au contraire, est dû à un effluve d'atomes gros, anguleux, et lents à se mouvoir. [...] ils arrivent péniblement au corps y entrent lentement, y circulent peu.»¹⁶. D'après cette thèse atomiste, la forme des atomes peut expliquer certaines de leurs propriétés : les aliments sucrés, par exemple, sont formés d'atomes arrondis, alors que les aliments acides contiennent des atomes pointus ! Le froid et le chaud ont en outre une source qui leur est propre : « le froid émane des fluides, la chaleur émane du

¹⁵ Nous reviendrons au chapitre 8 sur cette conception de la chaleur et de la froideur.

¹⁶ (Lucrèce Trad. de Pongerville, 1829-1832b), p. 375

Soleil »¹⁷, « et le Soleil, lui-même, du sommet de la voûte azurée, précipite des torrents de chaleur et de lumière dont il inonde l'espace »¹⁸.

b. La contribution des techniques

L'intérêt de ces deux théories ou la prédominance de l'une sur l'autre, ne peut être basée uniquement, sur la subjectivité de la sensation en analysant quelques uns de phénomènes naturels. Il faut que la science apparaisse moins confondue à la philosophie. Autrement dit, une relative spécialisation doit s'opérer. C'est ainsi que Philon de Byzance et Héron d'Alexandrie vont jouer un rôle important par la suite puisqu'ils vont allier la "recherche théorique" et la pratique à travers la réalisation des premiers *thermoscopes*.

En effet, de 300 avant J.C., jusqu'au V^{ème} siècle de notre ère, l'école d'Alexandrie est un « centre de recherche » en science et en philosophie dont les développements rayonnent dans l'ensemble du monde antique. L'école d'Alexandrie est aussi un lieu où les expériences et les techniques connaissent un certain essor. Aussi, Philon de Byzance trois siècles avant J.C., développe un des premiers *thermoscopes*. Celui-ci comprend (Cf. Figure 1) un ballon de plomb (α) contenant de l'air, muni d'un bouchon étanche ; une des branches d'un tube de verre, en forme de U renversé (β), traverse le bouchon, tandis que son autre branche descend au fond d'un vase plein d'eau. Lorsque le dispositif est exposé au soleil, l'air se dilate dans le ballon de plomb et par l'intermédiaire du tube en U des bulles apparaissent dans l'eau du vase. Si l'appareil est placé par la suite, à l'ombre, l'air se refroidit dans le ballon, et l'eau du vase monte dans le tube de verre pour s'écouler dans le ballon. Elle sera refoulée de nouveau dans le vase si, le ballon de plomb est à nouveau placé au Soleil.

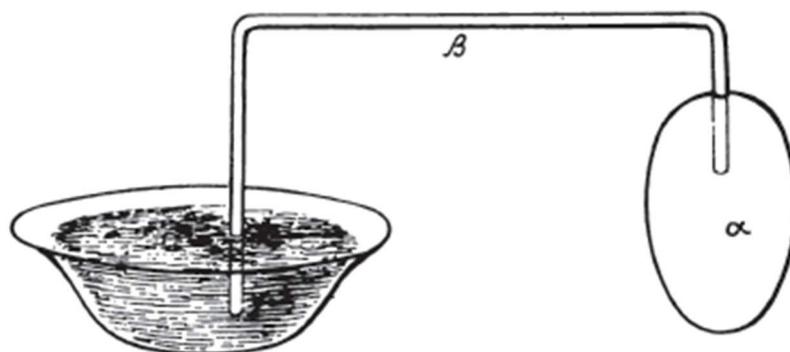


Figure 1 Thermoscope de Philon de Byzance¹⁹

¹⁷ (Lucrèce Trad. de Pongerville, 1829-1832b) p. 19.

¹⁸ (Lucrèce Trad. de Pongerville, 1829-1832a), p. 101

¹⁹ Schéma extrait de (Philon de Byzance trad. Le Baron Carra de vaux, 1902)

Au 1^{er} siècle, Héron d'Alexandrie ingénieur-technicien, s'intéresse aux effets de la vapeur d'eau et à l'air comprimé. Il construit entre autre, des automates à eau et un thermoscope, basé également sur la dilatation de l'air (Cf. Figure 2). Une boîte remplie d'eau, munie d'une ouverture la faisant communiquer avec l'atmosphère, est surmontée par un ballon partiellement rempli d'eau également. Un tube vertical plonge dans la boîte et débouche au-dessus du niveau de l'eau. Une branche d'un autre tube, en forme de U renversé, traverse le ballon par un joint étanche et descend jusqu'à la partie inférieure de celui-ci ; l'autre branche de ce tube surmonte un entonnoir placé sur l'ouverture de la boîte. Quand le dispositif est exposé au soleil, l'air contenu dans la partie supérieure du ballon refoule dans le tube en U de l'eau qui alimente l'entonnoir et tombe dans la boîte. Lorsque l'ensemble est placé à l'ombre, l'eau de la boîte peut alors remonter dans le ballon.

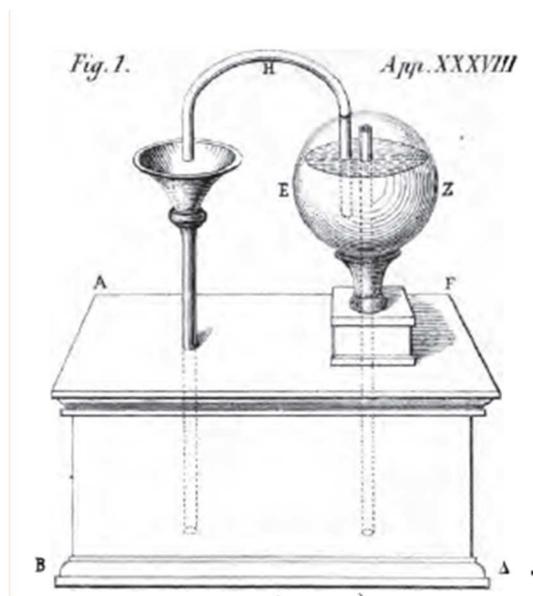


Figure 2 Thermoscope de Héron d'Alexandrie²⁰

Les vestiges de ses travaux ne connaîtront une diffusion en occident qu'au cours du 16^{ème} siècle où leurs traductions en latin et en italien seront réalisées. Ils serviront alors de point de départ aux recherches sur l'élasticité de l'air et l'émergence des thermomètres au 17^{ème} siècle. Nous nous proposons de traiter ces deux points dans les prochains paragraphes, qui par la suite vont jouer un rôle important dans l'élaboration de la thermodynamique.

c. Les expériences sur l'air au 17^{ème} siècle

En 1644, Evangelista Torricelli (1608-1647), élève de Galilée (1564-1642), est missionné par le grand-duc de Toscane pour répondre aux questionnements des fontainiers de Florence. En

²⁰ Représentation extraite de (Rochas d'Aiglun, 1882)

effet, ceux-ci constatent l'impossibilité de monter l'eau à plus de trente-deux pieds (environ dix mètres) de haut. Or, l'explication communément admise du fonctionnement des pompes est que "la Nature a horreur du vide" et que l'eau se précipite pour combler le vide créé par le mécanisme de la pompe.

Ce refus de l'existence du vide est notamment porté par la doctrine aristotélicienne dominante de l'époque, notamment incarnée par le père Etienne Noël (1581-1659). La vision d'un monde plein est aussi soutenue dans la vision cartésienne de René Descartes (1596 -1650), pour qui l'action créatrice de Dieu repose sur la matière qui doit nécessairement emplir tout l'espace. Ce monde plein et infini est composé de trois éléments : le premier subtil est fait de raclures extrêmement ténues, l'*éther* ; le second est fait de corpuscules ronds, le *feu* ; le troisième élément est la matière grossière qui entre dans la composition des planètes, la *terre*. Ces deux visions s'opposent en outre à la physique de Gassendi qui s'inspire, comme nous l'avons déjà signalé, de l'atomisme antique et pour qui, le monde, comme celui de Descartes, s'étend indéfiniment mais n'est pas plein.

Cette horreur que la Nature éprouverait pour le vide ne semble pas dépasser dix mètres d'eau. Comme il n'est pas aisé de manipuler un tube de dix mètres rempli d'eau, Torricelli remplace l'eau par du mercure, beaucoup plus dense, et constate que la colonne de mercure contenue dans un tube inversé ne dépasse pas environ soixante-seize centimètres. Il conclut alors que l'air est nécessairement pesant, ce qui permet d'équilibrer la colonne.

En 1646, Etienne (1588-1651) et Blaise (1623-1662) Pascal, qui admettent le vide, reprennent un certain nombre d'expériences de Torricelli mort prématurément, dans lesquelles ils voient la preuve irréfutable de l'existence du vide. Alors que selon le père Noël, le vide en haut du tube barométrique ne peut être qu'apparent ; un air subtil passerait par les pores du verre et remplirait le haut du tuyau. En septembre 1647, Descartes suggère à Blaise Pascal de faire une expérience en bas et en haut d'une montagne, afin de démontrer que c'est la pesanteur de l'air qui cause la montée du mercure dans le tuyau. L'expérience est réalisée par Florin Périer (1605-1672), au Puy de Dôme²¹ et les observations qu'il fait sont alors conformes aux attentes. En revanche seul Pascal conclut que cette expérience est la preuve de l'existence du vide.

L'apparition des thermomètres au cours du 17^{ème} siècle est le fruit de ces recherches expérimentales issues de la controverse sur le vide. En 1612, Santorio (1561-1636), ami de Galilée chez qui il trouve une inspiration pour son travail, améliore le thermoscope à air de Héron. Ce thermoscope ainsi que les instruments dérivés, seront appelés « thermomètre » par Jean Leurechon (1591-1670) en 1624 dans son ouvrage *Récréation mathématique*. Torricelli montrera

²¹ Pour obtenir davantage d'informations sur le sujet confère l'ouvrage de Robert Locqueneux, *Baromètres, machines pneumatiques & thermomètres - Chez & autour de Pascal, d'Amontons & de Réaumur*, Paris, édition L'Harmattan, 2015.

en 1644 que ces dispositifs sont tout autant sensibles aux variations de pression que de température, l'appellation thermomètre apparaît donc incorrecte pour ces dispositifs. L'instrument de Santorio est par la suite amélioré en emprisonnant un liquide (eau, alcool, puis mercure) dans un tube en verre hermétique. Les véritables premiers thermomètres voient alors le jour.

Entre 1657 et 1661, Robert Boyle (1627-1691) entreprend un certain nombre d'expériences quantitatives permettant de lier l'action de pression et le volume de l'air ; il aboutit à la conclusion qu'un volume d'air se comprime en proportion du poids qui le presse²². Atomiste convaincu, Boyle interprète ce phénomène en supposant que l'air est formé d'atomes qui se touchent ; le ressort de l'air résulte alors du ressort de chacun de ces atomes. Ces travaux permettront au début du siècle suivant, comme nous le verrons dans un prochain paragraphe, d'utiliser à nouveau l'air comme matériau thermométrique privilégié.

En définitive, l'ensemble de ces recherches au cours du 17^{ème} siècle ont contribué à améliorer les techniques permettant de repérer les intensités de *chaud* et de *froid* des corps, appelées *degrés de chaleur*, *tempéraments* ou *températures* du corps. Le but du prochain paragraphe est justement de résumer les courants de pensées sur la chaleur au 17^{ème} siècle, avant de passer au siècle suivant.

d. Les théories de la chaleur au 17^{ème} siècle

Le développement des études thermoscopiques au cours du 17^{ème} siècle, se fait notamment sous l'impulsion d'un certain nombre de physiciens fervents de l'aristotélisme scolastique. Mais, certains scientifiques s'éloignent de la conception aristotélicienne du chaud, du froid et de la chaleur.

Comme nous l'avons dit précédemment, Gassendi, fervent opposant de l'aristotélisme, considère que le chaud et le froid sont des entités physiques correspondant à deux sortes de matière thermique, comme on peut le lire dans l'*Abrégé de la philosophie de Gassendi*, édité en 1678 :

« Je passe sous silence que l'étendue des qualités étant presque divisible à l'infini, l'on peut véritablement bien distinguer un plus grand nombre de degrés ; mais la capacité et la subtilité humaine ne pouvant guère aller plus loin, nous remarquerons plutôt que chaque plante tire primitivement son tempérament de la semence dont elle naît, et que la semence tient le sien de la nature ou condition des corpuscules dont elle est formée ; puisque selon que ces corpuscules seront calorifiques, ou frigorigiques, et selon qu'à raison de leur mélange ils seront plus libres, ou plus contraints dans leur mouvement, ils pourront pénétrer dans le corps plus fortement, ou plus

²² Ces travaux seront repris en 1679 par Mariotte. Elle conduit à la loi connue aujourd'hui sous le nom de loi de Boyle-Mariotte, tel que le produit de la pression par le volume d'un gaz est constant à une température donnée.

faiblement, en plus ou moins grande abondance, plus ou moins longtemps, et ainsi faire sentir plus ou moins de chaleur, à savoir en remuant, agitant, dissolvant, comprimant, et resserrant diversement. »²³

Prenant en compte uniquement la chaleur, d'autres scientifiques la considèrent en revanche comme étant un fluide subtil qui emplit le vide, pénètre la matière et la dilate en écartant les parties qui la composent. C'est ce mouvement qui crée alors la sensation de chaud et de froid. Aussi, en 1620, Francis Bacon (1561,1620) dans *Novum Organum* explique que « l'étude de la chaleur et du froid, ou plutôt des degrés de chaleur et de froid, [...] échappent à nos sens, à cause de leur faiblesse. Ces degrés deviendront sensibles au moyen du tube thermométrique. »²⁴ Il donne alors une interprétation mécanique de la chaleur qu'il base sur la constitution de la matière : « La chaleur est un mouvement expansif, non pas d'ensemble et de la masse entière, mais de chacune des molécules [du corps] »²⁵. « [Le mouvement d'excitation] se montre surtout [...] dans les opérations de la chaleur et du froid. Si la chaleur se multiplie dans l'échauffement, ce n'est pas que la chaleur du foyer se transmette, à proprement parler ; c'est que l'excitation des parties du corps échauffé détermine en lui cette espèce de mouvement qui constitue la chaleur [...] c'est pourquoi la chaleur se développe beaucoup plus lentement et plus difficilement dans la pierre ou le métal que dans l'air, les parties de ces premières substances étant beaucoup moins disposées et moins propres au mouvement constitutif de la chaleur. »²⁶ L'interprétation mécanique de Bacon pose néanmoins problème. En effet, il existe dans les corps une compétition entre la capacité à stocker la chaleur (estimée par ce qu'on appelle aujourd'hui la *capacité thermique*, faible pour les métaux) et sa capacité à la restituer (coefficient de diffusion, fort pour les métaux). Aussi, l'on peut facilement se brûler avec un plat métallique sortant du four et dans le même temps ce plat se refroidira très vite.

En 1644, Descartes dans ses *Principes de la philosophie*, estime que notre compréhension du monde se fait par l'intermédiaire de nos sens, qui, lorsqu'ils reçoivent des stimuli de l'extérieur, engendrent une interprétation par l'âme. « Il y a [...] certaines choses que nous expérimentons en nous-même qui ne doivent pas être attribuées à l'âme seule, ni aussi au corps seul mais à l'étroite union qui est entre eux [...] tels [...] tous les sentiments, comme la douleur, le chatouillement, la lumière, les couleurs, les sons, les odeurs, le goût, la chaleur, la dureté et toutes les autres qualités qui ne tombent que sous le sens de l'attouchement. »²⁷

²³ (Bernier, 1678) pp.361-362

²⁴ (Bacon Francis trad. de Lorquet, 1857) p.159

²⁵ (Bacon Francis trad. de Lorquet, 1857) p. 110

²⁶ (Bacon Francis trad. de Lorquet, 1857), pp. 188-189

²⁷ (Descartes trad. Victor Brochard, 1886) p.84

Pour Descartes, la chaleur reste avant tout une sensation d'origine mécanique : Le chaud est dû à « *une agitation des petites parties des corps terrestres* »²⁸ capable de mouvoir assez fort les nerfs de notre main pour être sentie. Mais, cette connaissance sensible ne montre que les apparences de la chose et non pas leur nature propre.

2. Les apports du 18^{ème} siècle à la théorie de la chaleur

Le 18^{ème} siècle va se distinguer par l'opposition de l'esprit expérimental à l'esprit de système. Toutes les philosophies vont rencontrer une méfiance systématique dans les lieux où les sciences se font, les académies. La physique expérimentale de cette époque cherche à étudier les phénomènes de la nature à travers l'observation et l'expérience ; elle a aussi pour objet les instruments propres à cette recherche en incluant également le perfectionnement de ces instruments. Les effets de la chaleur et du froid sont des parcelles de ces phénomènes naturels et les thermoscopes, thermomètres et calorimètres sont des instruments propres à cette étude. Ce paragraphe va nous montrer comment le progrès réalisé dans ce domaine a rendu possible une étude scientifique du problème de la chaleur.

a. Le perfectionnement des thermomètres

En 1702, Guillaume Amontons (1663-1705) montre que la loi de Boyle sur l'air est valide à condition que la température reste constante au cours du temps de l'expérience. Comme le produit de la pression par le volume est fonction de la température, il devient possible de définir la température à partir de la valeur prise par ce produit. Aussi, Amontons considère-t-il que l'air peut être utilisé comme fluide thermoscopique de référence. Il construit alors des thermomètres à air, dont la mesure n'est pas basée sur la variation de volume d'air enfermé, mais déterminée par la variation de la force expansive de l'air à volume constant.

L'objectif de Amontons est en fait de construire des thermomètres dont les indications sont comparables entre elles. Mais le dispositif qu'il met en place ne répond pas à ce souhait, tant il est sensible à l'humidité ou à la pression atmosphérique.

Ce sont Fahrenheit et Réaumur qui réussissent à obtenir des thermomètres facilement reproductibles et fidèles.

Aussi, Daniel Fahrenheit (1686-1736) crée un thermomètre à mercure basé sur deux points fixes de référence : le point bas qui est la température la plus basse mesurée durant le rude hiver de 1708 à 1709 dans sa ville natale de Dantzig (Pologne) et un point haut qui correspond à la température du sang de cheval. La différence entre les deux températures de référence est dès

²⁸ (Descartes trad. Victor Brochard, 1886), p.38

lors fixée à quatre-vingt-seize degrés. Grâce à son thermomètre plus précis, il peut confirmer que la température de l'eau pure en ébullition reste constante au cours du processus, mais qu'elle dépend de la pression atmosphérique.

René-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757) développe quant à lui, un thermomètre à esprit de vin (mélange eau, alcool) car il estime que le mercure est trop peu dilatable. Il fixe comme référence la température de la glace fondante, facilement reproductible. En 1772, est introduite l'échelle de Réaumur : un intervalle de quatre-vingt parties entre la température de solidification et d'ébullition de l'eau.

En 1741, afin de réaliser des mesures météorologiques, Anders Celsius (1701-1744) choisit deux points fixes pour son échelle : 0 pour la température d'ébullition de l'eau et 100 pour la fusion de la glace. Cette échelle, inversée par Linné en 1745, est encore aujourd'hui l'échelle courante de relevé de la température à travers le monde (à l'exception notable des Etats Unis).

b. Premières mesures de « chaleur »

La température devient au cours du 18^{ème} une grandeur mesurable, du moins repérable et dont les relevés sont reproductibles avec une bonne fidélité. Alors que la nature même de la chaleur n'est pas tranchée, les premières mesures de la chaleur en lien avec la température voient le jour.

Aussi, en 1661 dans l'*Astrologia Gallica*²⁹, Jean-Baptiste Morin de Villefranche (1582-1656) donne un des premiers résultats expérimentaux de calorimétrie : deux masses d'eau, ayant chacune des degrés de chaud et de froid différents, évoluent vers une même température de mélange par un échange de degré extrême de chaud et de froid et dont la quantité globale reste inchangée.

Dans les années 1700, Newton propose dans le tome II des *Opuscules*, que lorsqu'un corps échauffé est soumis à un refroidissement, telle que l'action d'un courant d'air, il doit perdre à chaque instant, une quantité de chaleur proportionnelle à l'écart de température entre ce corps et l'air ambiant³⁰. George Wolfgang Krafft (1701-1754) puis Georg Wilhelm Richmann (1711-1753) réalisent plusieurs expériences confirmant la loi avancée par Newton. C'est dans ce cadre qu'en 1747, Richmann introduit dans son ouvrage *Dissertation sur la Chaleur*, le produit (masse, température) pour déterminer la réserve de chaleur que contient un corps. Cette réserve de chaleur contenue dans le corps avait déjà fait l'objet de propositions. En effet, Herman Boerhaave

³⁰ Newton introduit également une échelle de mesures de température, appelée échelle de Newton, à partir de points fixes (l'air en hiver ou les charbons du feu de cuisine).

(1668-1738) dont la réputation est à l'époque équivalente à celle de Newton, défend en 1732 dans *Eléments de chimie*, que des volumes égaux de substances différentes aux mêmes températures contiennent la même quantité de chaleur³¹. Aussi pour Boerhaave la chaleur est distribuée en volume et non pas par la masse des corps. Ainsi, si deux matériaux de volumes respectifs V_1 et V_2 sont mélangés à des températures différentes respectivement t_1 et t_2 , la température d'équilibre est donnée par la moyenne pondérée $t = \frac{V_1 t_1 + V_2 t_2}{V_1 + V_2}$.

Toutefois, la calorimétrie ne permet pas encore de trancher sur la nature de la chaleur. Le physicien allemand Christian Von Wolff (1679-1754) affirme que la chaleur est une matière. Cette idée est reprise par les tenants du phlogistique, qui l'admettent pondérable et formée d'atomes. C'est l'objet du prochain paragraphe.

c. L'hypothèse du phlogistique

Indépendamment des mesures de chaleur, la nature même de celle-ci reste toujours inconnue. Pour certains, comme John Locke (1632-1704), la chaleur est d'abord à la portée de nos sens. Aussi, considère-t-il que la chaleur (ou encore la couleur, la douleur...) est une puissance que les corps peuvent induire en nous et que nous percevons directement. La chaleur n'est pas réellement dans les corps, elle est uniquement perçue par un corps et une âme, son apparence varie avec la portée de nos sens.

Mais une nouvelle théorie voit le jour à partir des travaux de chimistes. La tentative de compréhension du mécanisme des réactions chimiques emprunte la règle des affinités plus ou moins implicitement acceptée depuis des siècles, selon laquelle « *le semblable attire le semblable.* »³² Cette règle trouve une argumentation dans les idées de Newton de la manière suivante. La démonstration de l'existence du vide issue des expériences de Torricelli et de Pascal conforte Gassendi dans son opinion atomiste. Cette idée d'une matière discontinue, formée de corpuscules, est reprise par Boyle et par Newton. Ce dernier, étendant aux réactions chimiques les idées développées dans sa mécanique et dans son optique, admet que les forces d'attraction, existant entre les particules microscopiques de matière comme entre les planètes et les astres, sont causes des dites réactions. Ainsi l'ancienne idée d'affinité trouve là une justification mécanique.

Les travaux du chimiste allemand Joachim Becher (1635-1682) en 1669 dans *Physica Subterranea* pour tenter d'expliquer les transformations que subissent les métaux quand on les chauffe, ont été repris par son disciple Georg Ernest Stahl (1659-1734). Recherchant un agent

³¹ (Locqueneux, 2009b) p.104

³² (Metzger, 1930)

commun à toutes les combustions, Stahl croit l'identifier. Mais, il ne s'agit pas, pour lui, d'une substance mais d'un principe, le « *principe du feu* » ou « *feu principe* ». Evidemment, l'influence de l'aristotélisme se fait sentir. Le « principe du feu », c'est quelque chose comme le « feu en puissance » d'Aristote, le feu réel, celui qu'on voit quand un corps brûle, étant alors le « feu en acte ». Stahl baptise ce principe *phlogistique*. Ainsi, tout corps susceptible de combustion contient du phlogistique et quand il brûle, le phlogistique s'échappe et devient feu accompagné de lumière et de chaleur.

La théorie du phlogistique est largement diffusée et popularisée par les chimistes français, car il intègre de manière satisfaisante les observations de l'époque. Pourtant, cette idée est mise à mal par les expériences de calcination des métaux, notamment celles de Pierre Bayen (1725 - 1798), qui montrent une augmentation de poids du corps³³.

En outre, la doctrine du phlogistique n'est pas la seule proposition des chimistes. Aussi, William Higgins (1763-1825) s'oppose à cette théorie et imagine en 1775 que les atomes ont une atmosphère de chaleur. Puis en 1779, William Cleghorn (1755-1783) propose que la chaleur est en fait formée de particules qui se repoussent et sont diversement attirés par la matière.

Cependant, toutes ces propositions seront remises en cause par la théorie du calorique qui va être abordée dans le paragraphe qui suit.

d. L'émergence du calorique et l'apport majeur de Black

Au cours des années 1760, le chimiste écossais Joseph Black réalise une série d'expériences et propose une alternative à la théorie du phlogistique : il fait l'hypothèse que la chaleur est un fluide impondérable et indestructible qu'il nomme *calorique* (*matter of heat or caloric*). Black débute ses expérimentations en réalisant des mélanges de diverses quantités d'eau à des températures différentes et met ainsi en évidence, comme Morin à son époque, **un terme d'échange qui se conserve : la chaleur**. Il introduit ensuite une caractéristique propre à chaque substance traduisant sa capacité pour la chaleur dite *chaleur spécifique* : « *le mercure a moins de capacité pour la matière calorifique que l'eau ; il réclame une moins grande quantité de chaleur pour élever la température d'un même nombre de degrés* »³⁴. Ainsi, Black met en évidence de façon quantitative que **tous les corps ne sont pas identiquement sensibles à la chaleur**.

³³ Pour adapter sa théorie aux remarques de Bayen, Stahl proposera un phlogistique à masse négative. Mais cette théorie sera progressivement abandonnée, notamment après la découverte de "l'air vital" (dioxygène) par Lavoisier et de l'Ecole Française qui apportent une nouvelle théorie de la combustion fondée sur l'oxydation.

³⁴ *Lectures on the elements of chemistry delivered in the University of Edinburgh* publié en 1803 par John Robison, citation extraite de (Agabra, 1985) p.5

Black étend ensuite ses recherches aux phénomènes de fusion et de vaporisation pour lesquels le concept de chaleur présente des difficultés considérables. Il était jusqu'alors communément admis que la chaleur nécessaire au changement d'état d'un corps est négligeable. Alors que selon Black « *s'il suffisait d'une très petite addition de chaleur apportée par l'air au printemps pour réduire en eau les immenses quantités de neige et de glace formées au cours de l'hiver, alors cette fusion s'opérerait en quelques minutes et il se produirait chaque fois des inondations catastrophiques* »³⁵. Ainsi, il paraît clair que « *quand la glace ou une autre substance est fondue, [...] elle reçoit une beaucoup plus grande quantité de chaleur qu'on ne peut le percevoir immédiatement après par le moyen du thermomètre. Une grande quantité de chaleur pénètre la substance dans cette occasion sans la rendre apparemment plus chaude d'après ce qu'on peut observer avec cet instrument. Cette chaleur doit être apportée à la substance pour la porter à l'état liquide et j'affirme que cette addition de chaleur est la cause principale et immédiate de la liquéfaction produite* »³⁶. Cette remarque est d'autant plus importante qu'elle insiste sur la **différenciation nette entre chaleur** (*quantity of heat*) **et température** (*intensity of heat*). Black utilise la méthode des mélanges pour mesurer la quantité de chaleur absorbée par la fusion de la glace et la quantité de chaleur dégagée par la solidification. Il met alors en évidence que la quantité de chaleur absorbée au cours de la fusion n'est pas détruite, mais elle reste latente et peut être complètement récupérée à partir du liquide en le congelant. Les travaux de Black constituent un apport essentiel à la chaleur et à la science de la calorimétrie. La distinction entre chaleur et température apparaît alors nettement.

Si les travaux de Black ne sont publiés qu'en 1803 dans l'ouvrage : *Lectures on the elements of chemistry delivered in the University of Edinburgh*, ses résultats sont déjà connus et diffusés en Europe dès la fin du 18^{ème} siècle (Cleghorn, était par exemple un de ses élèves). Enfin, les travaux de Black revêtent une importance particulière pour deux raisons principales : la première est la quantification des échanges et la seconde est l'introduction de concepts fondamentaux que sont la chaleur spécifique (aujourd'hui appelée capacité thermique) et la chaleur latente (aujourd'hui appelée enthalpie de changement d'état).

³⁵ *Lectures on the elements of chemistry delivered in the University of Edinburgh*, citation extraite de (Agabra, 1985) p.5

³⁶ *Lectures on the elements of chemistry delivered in the University of Edinburgh*, citation extraite de (Agabra, 1985) p.5

e. Les contributions de Lavoisier et Laplace

Les mesures de chaleur, connaissent un essor particulier sous l'impulsion de Lavoisier et Laplace qui publient en 1780, un mémoire intitulé *Mémoire sur la chaleur*. Lavoisier explique que l'objectif de ce mémoire est la *mesure de la chaleur* :

« *Ce mémoire est le résultat des expériences sur la chaleur que nous avons faites en commun, M. de Laplace et moi, pendant l'hiver dernier ; le froid peu considérable de cette saison ne nous a pas permis d'en faire un plus grand nombre. Nous nous étions d'abord proposés d'attendre, avant que de rien publier sur cet objet, qu'un hiver plus froid nous eût mis à portée de les répéter avec tout le soin possible, et de les multiplier davantage ; mais nous nous sommes déterminés à rendre public ce travail, quoique très-imparfait, par cette considération que la méthode dont nous avons fait usage peut être de quelque utilité dans la théorie de la chaleur, et que sa précision et sa généralité pourront la faire adopter par d'autres physiciens qui, placés au nord de l'Europe, ont des hivers très-favorables à ce genre d'expériences. Nous diviserons ce mémoire en quatre articles : dans le premier, nous exposerons un moyen nouveau pour mesurer la chaleur ; nous présenterons, dans le second, le résultat des principales expériences [...]* »³⁷

Lavoisier et Laplace admettent volontiers être « *dans l'ignorance sur la nature de la chaleur* ». En outre, ils admettent que « *les physiciens sont partagés sur la nature de la chaleur. Plusieurs d'entre eux la regardent comme un fluide répandu dans toute la nature, et dont les corps sont plus ou moins pénétrés, à raison de leur température et de leur disposition particulière à le retenir ; il peut se combiner avec eux, et, dans cet état, il cesse d'agir sur le thermomètre et de se communiquer d'un corps à l'autre, ce n'est que dans l'état de liberté, qui lui permet de se mettre en équilibre dans les corps, qu'il forme ce que nous nommons chaleur libre.*

D'autres physiciens pensent que la chaleur n'est que le résultat des mouvements insensibles des molécules de la matière. On sait que les corps, même les plus denses, sont remplis d'un grand nombre de pores ou de petits vides, dont le volume peut surpasser considérablement celui de la matière qu'ils renferment ; ces espaces vides laissent à leurs parties insensibles la liberté d'osciller dans tous les sens, et il est naturel de penser que ces parties sont dans une agitation continuelle, qui, si elle augmente jusqu'à un certain point, peut les désunir et décomposer les corps ; c'est ce mouvement intestin qui, suivant les physiciens donc nous parlons, constitue la chaleur. »³⁸

Mais leur objectif n'est pas de déterminer la nature de la chaleur. En effet ils veulent en « [...] observer ses effets, dont les principaux consistent à dilater les corps, à les rendre fluides, et à les convertir en vapeurs. »³⁹ Ils présentent alors un appareil que Lavoisier nomme « *calorimètre* »,

³⁷ (Lavoisier, 1780) p.283

³⁸ (Lavoisier, 1780) p.285

³⁹ (Lavoisier, 1780) p.288

(Cf. Figure 3) permettant de contrôler “parfaitement” les échanges de chaleur avec l’extérieur lors d’expériences de mélanges de substances à températures différentes ou lors de changement d’état.

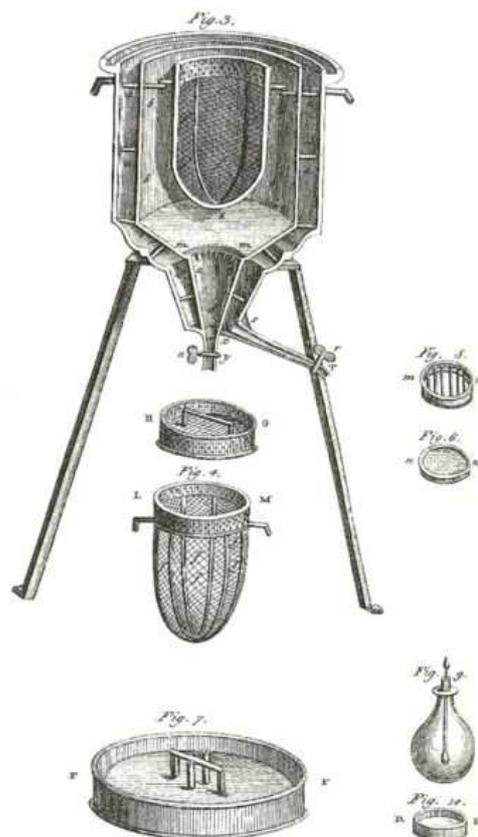


Figure 3 Calorimètre de Laplace et de Lavoisier⁴⁰

Ils présentent leur méthode de calcul pour déterminer, par la voie des mélanges, la chaleur spécifique des corps, basée sur la conservation de la chaleur :

« si l'on nomme m la masse du corps le plus échauffé, exprimée en parties de la livre prise pour unité ; a le degré du thermomètre qui indique sa température ; q la chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'une livre de cette substance ; si l'on désigne par m' , a' , q' , les mêmes quantités, relativement au corps le moins échauffé, et qu'enfin l'on nomme b le degré du thermomètre qui indique la température du mélange, lorsqu'elle est parvenue à l'uniformité ; il est visible que la chaleur perdue par le corps m est en raison de sa masse m , et du nombre de degrés $a - b$ dont sa température a été diminuée, multiplié par la quantité q de chaleur qui peut élever d'un degré la température d'une livre de cette substance ; on aura donc $m q . (a - b)$ pour l'expression de cette quantité de chaleur perdue. Par la même raison, la quantité de chaleur acquise par le corps m' est en raison de sa masse m' et

⁴⁰ (Lavoisier, 1793) planche VI

du nombre de degrés $b - a'$ dont sa température a été augmentée, multiplié par la quantité q' , ce qui donne $m' q' \cdot (b - a')$ pour l'expression de cette quantité de chaleur. Mais, puisque l'on suppose qu'après le mélange la quantité de chaleur est la même qu'auparavant, il faut égaler la chaleur perdue par le corps m à la chaleur acquise par le corps m' ; d'où l'on tire

$$m q \cdot (a - b) = m' q' \cdot (b - a')$$

Cette équation ne fait connaître ni q , ni q' , mais elle donne pour leur rapport,

$$q / q' = m' \cdot (b - a') / m \cdot (a - b)$$

On aura donc ainsi le rapport des chaleurs spécifiques des deux corps m et m' , en sorte que, si l'on compare les diverses substances de nature différente à une même substance, par exemple, à l'eau commune, ou pourra déterminer par ce moyen les chaleurs spécifiques de ces substances en parties de la chaleur spécifique de la substance à laquelle on les rapporte. »⁴¹

Aussi les mesures proposées par Lavoisier et Laplace ne correspondent pas réellement à une mesure de la chaleur comme ils l'avaient annoncé, mais à la mesure de *chaleurs spécifiques* relativement à un corps de référence. Néanmoins, tout comme Richmann, Lavoisier et Laplace affirment clairement que c'est la masse qui est le paramètre de pondération de la chaleur et non le volume, comme le suggérait Boerhaave.

Si, dans *Mémoire sur la chaleur*, Lavoisier et Laplace refusent de choisir entre la représentation substantialiste et mécaniste, « peut-être ont-elles lieu toutes deux à la fois. »⁴², Lavoisier expose en 1789 dans *son traité élémentaire de chimie*, sa prise de position pour le calorique. Laplace l'adoptera quelques années plus tard.

⁴¹ (Lavoisier, 1780) p.290

⁴² (Lavoisier, 1780) p.287

91 DES SUBSTANCES SIMPLES.
TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.

	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme des éléments des corps.	Lumière.	Lumière.
	Calorique.	Chaleur.
		Principe de la chaleur.
		Fluide igné.
	Oxygène.	Feu.
		Matière du feu & de la chaleur.
Air déphlogistiqué.		
Air empiréal.		
Air vital.		
Azote.	Base de l'air vital.	
	Gaz phlogistique.	
	Mofète.	
Hydrogène.	Base de la mofète	
	Gaz inflammable.	
Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.	Base du gaz inflammable.	
	Soufre.	Soufre.
	Phosphore.	Phosphore.
	Carbone	Charbon pur.
	Radical muriatique.	Inconnu.

Figure 4 Tableau des substances simples selon Lavoisier⁴³

Dans ce mémoire, le calorique y est décrit comme un fluide matériel indestructible qui s'écoule d'un corps à un autre lors d'un transfert de chaleur (comme de l'eau). Lavoisier qui a tenté d'isoler et de peser le calorique, le place dans une liste de « *substances simples [...] et qu'on peut regarder comme les éléments des corps.* »⁴⁴ (Cf. Figure 4)

Le calorique est alors présent dans le corps sous deux formes : le *calorique libre*, sensible au thermomètre : selon qu'un corps renferme plus ou moins de calorique libre, sa température est plus ou moins élevée ; et le *calorique latent* qui est le calorique combiné avec les molécules des corps. La quantité totale de calorique et sa répartition sous forme libre ou latente dans un corps dépendent uniquement de l'état de celui-ci.

Cette prise de position contraste néanmoins avec l'affirmation qu'ils défendaient quelques années plus tôt dans leur *Mémoire sur la chaleur* en 1780 : « *Sur la base du principe de conservation de la force vive, on peut exprimer ainsi cette définition : la chaleur est la force vive de ces vibrations, c'est-à-dire la somme des produits de la masse de chaque molécule par le carré de la vitesse.* »⁴⁵ Cette présentation fait alors de la chaleur une grandeur à caractère mécanique.

⁴³ (Lavoisier, 1793) p.192

⁴⁴ (Lavoisier, 1793) p.192

⁴⁵ (Lavoisier, 1780) p.286

f. La remise en cause du calorique

Malgré l'avantage du quantitatif et le soutien des travaux de Black et de Lavoisier, la théorie du calorique se voit remise en question au cours des années suivantes.

Au cours des années 1765 et 1766 Benjamin Thompson comte de Rumford (1753-1814), réalise une série d'expériences sur la propagation de la chaleur⁴⁶. Il réalise un thermomètre formé d'un thermomètre classique à mercure entouré d'une boule en verre de diamètre plus important et vide d'air. (Cf. Figure 5)

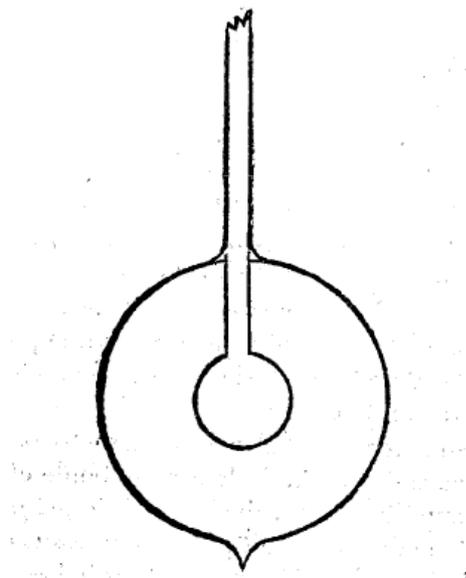


Figure 5 Thermomètre de Rumford⁴⁷

Rumford réalise alors l'expérience suivante :

« ... ayant exposé cet appareil dans un baquet d'eau à la température de 18° du thermomètre de Réaumur, jusqu'à ce que je fasse assuré (par le moyen de l'échelle de l'instrument) que la boule du thermomètre, remplie de mercure, que se trouvait au centre de la boule vide d'air, était à la température de $18^{\circ}R$, j'ôtai l'instrument du baquet, et je le plongeai dans un vase rempli d'eau bouillante, où je tins pendant plusieurs minutes ; l'eau dans le vase étant constamment entretenue en ébullition par le moyen d'une lampe. »⁴⁸

Rumford constate alors que le mercure monte dans le thermomètre, indiquant une élévation de température. Il conclut que la chaleur de l'eau bouillante passe « à travers le vide de Torricelli. » En 1787 et 1792, Rumford reproduit ses expériences et aboutit aux mêmes conclusions. Il

⁴⁶ Rumford a cherché à vérifier expérimentalement comme Kraft et Richmann à l'époque, la loi de refroidissement de Newton.

⁴⁷ (Rumford, 1804) *Notice historique* p. 13

⁴⁸ (Rumford, 1804) p.17

s'interroge alors à juste titre : « comment peut-on accorder [ces] résultats avec la théorie moderne du calorique ? J'avoue franchement qu'avec la meilleure volonté, je n'ai jamais pu le faire ... »⁴⁹

En outre, selon Rumford, la théorie du calorique n'est pas compatible avec certaines observations qu'il a pu faire lors de maniements d'armes⁵⁰. En 1798, dans son *Mémoire sur la chaleur*, il écrit :

« Tout le monde sait qu'un coup sec est beaucoup plus propre à exciter de la chaleur dans un corps dur qui est frappé ; qu'un coup moins rapide ; et s'il est vrai que la chaleur n'est autre chose qu'un mouvement continu et vibratoire (plus ou moins rapide), parmi les particules qui composent les corps, il serait facile de rendre raison de cette différence.

Il est évident que dans l'expérience en question, le coup que recevaient les parois du canon par l'explosion de la poudre était plus sec, ou plus prompt quand la charge était brûlée sans balle, que quand le fluide élastique généré dans la combustion de la poudre était obligé, pour échapper, de pousser lentement devant lui la masse pesante d'une ou de plusieurs balles : la considération de cette circonstance suffit, à ce qu'il me semble, pour expliquer d'une manière satisfaisante les résultats de l'expérience ; mais jamais je n'ai pu les accorder avec l'hypothèse du calorique. »⁵¹

Rumford interprète également les apports et retraits de chaleur d'un corps et donne une des premières interprétations de la température à l'échelle microscopique :

« Ceux qui ont adopté l'hypothèse d'une substance particulière calorifique, que l'on a nommée calorique, supposent que l'échauffement d'un corps est toujours le résultat d'une accumulation de cette substance dans le corps ; mais ceux qui considèrent la chaleur comme un mouvement vibratoire, qui est supposé exister toujours, avec plus ou moins de vitesse, parmi les particules de tous les corps, regardent l'échauffement comme l'accélération de ce mouvement.

Dans l'hypothèse du mouvement vibratoire, un corps qui se trouve refroidi, est censé n'avoir rien perdu, que du mouvement : dans l'autre hypothèse, il est supposé avoir subi une perte de quelque chose de matériel, c'est-à-dire du calorique. »^{52,53}

Enfin, Rumford juge sévèrement la prise de position de Lavoisier et autres savants en faveur du calorique sur la nature de la chaleur : « ces illustres savants français, qui proposèrent, il y a vingt-cinq ans, l'hypothèse moderne du calorique, loin de considérer l'existence de cet être comme démontrée, en parlent avec cette modeste réserve qui distingue toujours les hommes supérieurs. Ils proposent le mot, plutôt pour éviter les périphrases et raccourcir le langage de la science, que

⁴⁹ (Rumford, 1804) p.18

⁵⁰ Rumford participa notamment à la guerre d'indépendance des Etats unis d'Amérique, pendant laquelle il était chargé de combattre les insurgés.

⁵¹ (Rumford, 1804) *Notice historique* p. 10

⁵² (Rumford, 1804) p.131

⁵³ Les mots soulignés apparaissent en italique dans le texte original de Rumford

pour introduire une nouvelle opinion. »⁵⁴ Pour étayer son propos, Rumford montre au moyen d'innombrables expériences qu'il est possible d'enlever une quantité illimitée de chaleur d'un système à condition seulement qu'on lui fournisse du travail, notamment par frottement, en rapport avec la chaleur retirée. Le travail de Rumford se poursuit avec de nombreux travaux sur le rayonnement⁵⁵. Mais un autre apport notable de Rumford est le fait qu'il donne l'idée de ce qui deviendra le premier principe de la thermodynamique : « *La somme des forces vives dans l'univers doit rester toujours la même.* »⁵⁶

Les travaux de Rumford bien que conséquents sur la non réalité du calorique⁵⁷ et son interprétation mécaniste de la chaleur ne s'imposent pas. Les idées de Laplace et Lavoisier basées sur le calorique et la conservation de la chaleur, restent largement répandues en Europe notamment grâce aux succès que la théorie rencontre. L'une de ses premières grandes réussites est lorsque Laplace explique l'écart important qui apparaît entre la vitesse du son mesurée dans l'air et celle calculée théoriquement par Newton à partir de sa mécanique, en supposant que le son est une vibration de l'air. La valeur de Newton diffère d'environ vingt pour cent de celle observée. Laplace explique cet écart en invoquant un fait bien connu : l'air s'échauffe en se comprimant et se refroidit en se détendant. La propagation des ondes sonores augmentant et diminuant périodiquement la pression de l'air, les différences de température résultantes engendrent un flux de chaleur. Laplace détermine alors l'effet de ce flux sur la vitesse de propagation et obtient la valeur observée expérimentalement.

La théorie du calorique remporte un deuxième succès important grâce à Joseph Fourier (1768-1830) qui en 1822, formule les équations décrivant exactement les flux de chaleur à travers diverses substances et développe les techniques mathématiques permettant de résoudre ces équations. Aussi, écrit-il dans la *Théorie Analytique de la Chaleur* : « *On ne pourrait former que des hypothèses incertaines sur la nature de la chaleur, mais la connaissance des lois mathématiques auxquelles ses effets sont assujettis est indépendante de toute hypothèse ; elle exige seulement l'examen attentif des faits principaux que les observations communes ont indiqués, et qui ont été confirmés par des expériences précises.* »⁵⁸ Fourier se consacre à la « *question de la propagation de la chaleur [qui] consiste à déterminer quelle est la température de chaque point*

⁵⁴ (Rumford, 1804) p.131

⁵⁵ *Recherches sur la nature de la chaleur et la manière dont elle se propage* dans (Rumford, 1804) pp.1-128

⁵⁶ (Rumford, 1804) p.137

⁵⁷ Rumford réalisera également de nombreuses expériences montrant que le calorique s'il devait exister, n'a pas de masse.

⁵⁸ (Fourier, 1822) Chapitre I p.15

Une brève histoire de la thermodynamique : naissance des concepts de température, chaleur, énergie et entropie
*d'un corps, à un instant donné, en supposant que les températures initiales sont connues.»*⁵⁹ Ces équations et ces techniques sont encore en usage de nos jours.

Mais la plus intéressante réussite de la théorie du calorique est due au travail de Carnot concernant le rendement des moteurs thermiques et qui fait l'objet du prochain paragraphe.

3. La naissance de la « thermodynamique »

Durant plus de deux siècles, la mécanique newtonienne a été considérée comme l'exemple par excellence d'une science exacte. On croit d'ailleurs souvent que toute théorie physique emprunte, ou devrait emprunter, ses méthodes à la mécanique newtonienne qui, comme l'avait préconisé Descartes, étudie un système physique en le décomposant en ses constituants matériels élémentaires puis en déterminant le mouvement de chacun de ces constituants. Le 19^{ème} siècle a toutefois vu émerger, à travers l'étude des phénomènes liés à la chaleur, une nouvelle approche scientifique fondée sur des principes généraux permettant d'étudier des systèmes dans leur totalité. La théorie physique issue de cette nouvelle approche s'appelle la *thermodynamique*, d'un nom signifiant littéralement « *mouvement de la chaleur* ». En 1824, Carnot commence d'ailleurs son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* par la phrase :

« *Personne n'ignore que la chaleur peut être la cause du mouvement, qu'elle possède même une grande puissance motrice : les machines à vapeur, aujourd'hui si répandues, en sont une preuve parlante à tous les yeux.* »⁶⁰

Dans cette première phrase de Carnot, ainsi que dans l'ensemble de son ouvrage, la machine à vapeur est omniprésente. Afin de mieux comprendre l'origine de la thermodynamique, il est utile dans un premier temps de rappeler, même brièvement, la préhistoire de la machine à vapeur.

a. Le développement des machines

L'expérience que Otto de Guericke (1602-1686) réalise en 1654 devant la cour impériale d'Allemagne, connue aujourd'hui sous le nom des « *hémisphères de Magdebourg* », marque un progrès notable dans la connaissance de l'air, ce gaz dont on ne soupçonnait pas au préalable la matérialité et les possibilités d'utilisations énergétiques. Pour la première fois dans l'histoire, la science et la technique vont cheminer ensemble pour jeter les bases de la machine à vapeur, véritable moteur de la *révolution industrielle*. Ce terme de révolution industrielle peut laisser

⁵⁹ (Fourier, 1822) Chapitre I p.2

⁶⁰ (Carnot, 1824) p.1

entendre une évolution brusque faisant basculer tout à coup un monde rural et artisanal vers un monde urbain et industriel. Bien entendu, il n'en est rien dans le domaine des techniques, et cette révolution prend ses racines dès le 17^{ème} siècle pour préparer les profonds changements intervenant à la fin du 18^{ème} siècle en Angleterre et au 19^{ème} siècle pour les pays de l'Europe continentale.

Les prémices du développement des machines ont pourtant lieu notamment grâce aux travaux du français Denis Papin (1647-1714) exilé à Londres⁶¹. En 1690, Papin publie un article intitulé *Nouvelle manière de produire à peu de frais des forces mouvantes extrêmement grandes*. Il y décrit un dispositif qui consiste en un récipient résistant dans laquelle l'eau est amenée à ébullition, et une combinaison cylindre-piston permet alors d'utiliser la pression de vapeur pour soulever un poids de trente kilos. Dans le même temps, l'anglais Thomas Savery (1650-1715) dépose en 1698, le brevet d'une pompe à eau actionnée par la vapeur sous pression pour extraire l'eau d'infiltration présente dans les mines de charbon.

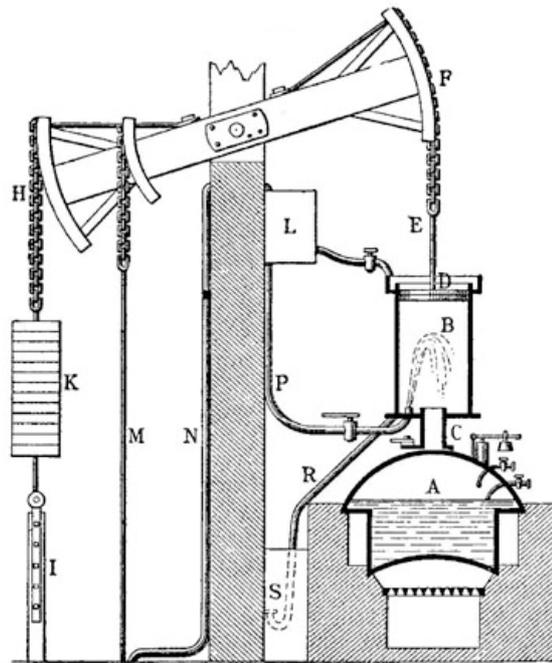


Figure 6 Représentation de la machine à vapeur de Newcomen⁶²

En 1712, Thomas Newcomen (1664-1729) perfectionne la machine à vapeur de Savery. (Cf. Figure 6) La machine de Newcomen est composée de deux tiges suspendues aux extrémités d'un balancier horizontal : d'un côté, celle d'une pompe aspirante (I-K) ; de l'autre, celle d'un piston (D)

⁶¹ Papin est de confession protestante. Il part en Angleterre en 1675, anticipant la révocation de l'Edit de Nantes. Il devient alors l'assistant de Boyle pour reprendre l'étude des propriétés de l'air. En 1679, il développe le *Digesteur* : un cylindre de fonte dont le couvercle est maintenu en pression grâce à des vis. En remplissant le cylindre avec de l'eau et des aliments, il est possible de les cuire plus rapidement. Il s'agit de l'ancêtre de la cocotte-minute. Papin crée dans le même temps la soupape de sureté qui évite l'explosion du dispositif en se soulevant lorsque la pression est trop forte.

⁶² Image tirée de Meyers Konversations-Lexikon

couissant dans un cylindre (B) disposé au-dessus d'une chaudière(A). Quand la vapeur soulève le piston, le balancier descend vers la pompe, entraînant la tige jusqu'à la nappe d'eau. Après injection d'eau froide et condensation de la vapeur dans le cylindre, la chute du piston relève le balancier ainsi que la pompe : l'eau est aspirée. Des robinets, tournés à la main, commandent alternativement l'admission d'eau froide et de vapeur. La pompe donne douze coups de piston par minute et puise ainsi, dans le même temps, 500 litres d'eau à 45 mètres de profondeur.

Néanmoins, la condensation de la vapeur dans la machine de Newcomen pose problème puisque refroidi par la condensation, le cylindre est nécessairement réchauffé quand la vapeur, admise de nouveau, soulève le piston. Ceci empêche l'énergie de la chaudière d'être exclusivement consacrée à l'effort moteur. Il faudrait en fait que le condenseur soit distinct du cylindre. Cette solution est proposée en 1769 par James Watt (1736-1819) qui place le condenseur dans l'eau froide au bas de la machine en le reliant au cylindre. Watt cherche à rendre toujours la machine à vapeur la plus efficace, c'est-à-dire à maximiser la puissance motrice produite pour une quantité donnée de charbon. Le perfectionnement de la machine à vapeur requiert de la part de Watt une suite d'observations scientifiques sur les propriétés de la vapeur en fonction de la pression et de la température (il travaille notamment avec Black sur la chaleur latente).

Watt introduit également un dispositif permettant de tracer un diagramme donnant la pression de la vapeur en fonction de la position du piston dans le cylindre : "l'indicateur de Watt" (Cf. Figure 7).

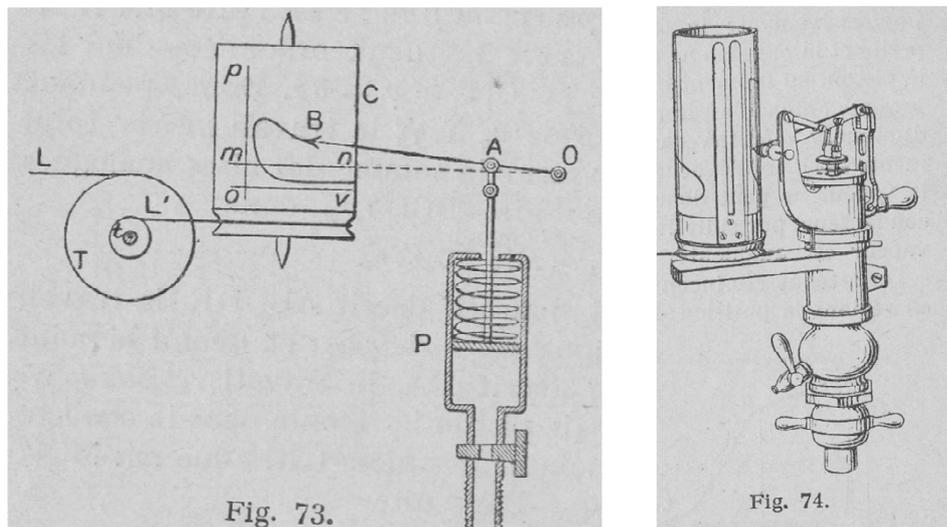


Figure 7 Modèle pratique de l'indicateur de Watt ⁶³

Le mouvement du piston est transmis à un crayon au moyen d'un système de tiges articulées. L'ensemble est agencé de telle sorte que le crayon puisse reproduire le déplacement du piston sur

⁶³ Image représentative de l'indicateur de Watt issue de (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) pp. 146-147

un rouleau en mouvement de rotation alternatif tel que ses déplacements angulaires soient proportionnels aux déplacements linéaires du piston de la machine. Ce diagramme, qui permet de montrer l'efficacité de la machine à laquelle il est associé, restera un secret industriel très bien gardé ("*England's best kept secret*") jusqu'au début du 19^{ème} siècle.

Aussi, la machine à vapeur ainsi que toutes les améliorations techniques apportées sont à l'origine de la révolution industrielle. Une importante mutation est née et elle jouera un rôle important dans les autres secteurs de la technique. La production de fer, la fabrication d'engrenages et de pièces mécaniques se trouvent d'autant sollicitées, de même que l'utilisation de la force motrice. Il devient aisé de mettre en mouvement des pièces mobiles d'un poids important, de scier, de forer des matériaux résistants, de pomper en profondeur, de modeler des blocs de métal de grandes épaisseurs, *etc.* A partir du milieu du 19^{ème} siècle, les chemins de fer apparaissent, les navires à voile sont progressivement remplacés par les navires à vapeur *etc.* Les conséquences sociales sont également importantes : urbanisation, apparition de la classe ouvrière *etc.*

b. L'apport de Carnot

Carnot fut l'un des premiers à percevoir l'importance de la technologie moderne. Prenant l'exemple de l'Angleterre, il affirme que la puissance militaire de ce pays repose sur deux facteurs : l'acier, nécessaire à la construction des navires et des canons, et le charbon, nécessaire au fonctionnement des hauts fourneaux fabriquant l'acier. Le charbon se trouvant au fond des mines inondées, son extraction exigeait, comme nous l'avons vu, un pompage de l'eau à l'aide d'une machine à vapeur. Celle-ci était donc un élément essentiel de la suprématie anglaise. En effet, Carnot écrit en 1824 :

*« L'étude des machines est du plus haut intérêt, leur importance est immense, leur emploi s'accroît tous les jours [...] Enlever aujourd'hui à l'Angleterre ses machines à vapeur [...] ce serait anéantir cette puissance colossale. »*⁶⁴

Si les travaux de Watt ont montré qu'on peut améliorer considérablement le rendement des moteurs thermiques, leur principe même ne reposait à l'époque sur aucune considération théorique. Les perfectionnements technologiques qui avaient accru le rendement des moteurs (telle l'introduction du condenseur) avaient tous été obtenus par tâtonnements empiriques. Mais, d'un point de vue théorique, il importait de savoir si ces améliorations pouvaient accroître indéfiniment ce rendement ou s'il existait une limite théorique à jamais infranchissable. C'est à cette tâche que s'attaqua Carnot. Selon lui :

⁶⁴ (Carnot, 1824) p.2

« *Le maximum de puissance motrice résultant de l'emploi de la vapeur est aussi le maximum de puissance motrice réalisable par quelque moyen que ce soit.* »⁶⁵

Aussi, Carnot cherche à déterminer le principe de production de puissance motrice grâce à la chaleur et ceci indépendamment de toute technologie ou agent particulier.

Le travail de Carnot ne réside pas dans la détermination de la nature de la chaleur mais il va s'appuyer sur l'hypothèse de l'existence du calorique pour montrer que la puissance motrice produite dans une machine est due « *non [pas] à une consommation de calorique mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid* »⁶⁶. Pour s'exprimer dans des termes et images simples, Carnot compare cette chute de calorique avec une chute d'eau :

« *On peut comparer avec assez de justesse la puissance motrice de la chaleur à celle d'une chute d'eau : toutes deux ont un maximum que l'on ne peut pas dépasser, quelle que soit d'une part la machine employée à recevoir l'action de l'eau et quelle que soit de l'autre la substance employée à recevoir l'action de la chaleur. La puissance motrice d'une chute d'eau dépend de sa hauteur et de la quantité du liquide ; la puissance motrice de la chaleur dépend aussi de la quantité de calorique employée et de ce qu'on pourrait nommer, de ce que nous appellerons en effet la hauteur de sa chute, c'est-à-dire la différence de température des corps entre lesquels se fait l'échange du calorique. Dans la chute d'eau, la puissance motrice est rigoureusement proportionnelle à la différence de niveau entre le réservoir supérieur et le réservoir inférieur. Dans la chute du calorique, la puissance motrice augmente sans doute avec la différence de température entre le corps chaud et le corps froid ; mais nous ignorons si elle est proportionnelle à cette différence.* »⁶⁷

Carnot a l'intuition de l'importance de l'écart de température dans les phénomènes qu'il décrit et l'ensemble de ses réflexions sont menées sur la base de cette notion. Ainsi pour Carnot, la température prend un nouveau statut et devient la grandeur pertinente dans les machines : l'écart de température entre deux corps est la source de l'action.

Pour exprimer l'importance de la température dans l'expression du rendement maximum, Carnot imagine une machine (Cf. Figure 8) dont l'agent thermique est un gaz permanent enfermé dans un cylindre avec piston. La mobilité de ce dernier permet de comprimer le gaz brusquement, engendrant une augmentation de température, ou permet de le dilater et d'engendrer ainsi une diminution de température. Ce cylindre peut être mis en contact avec la source chaude ou la source froide (corps A et corps B) permettant de réaliser des transformations à températures constantes (transformations isothermes) ou totalement isolé permettant de réaliser des transformations sans « échange de chaleur » (transformations adiabatiques). Carnot imagine alors le cycle suivant :

⁶⁵ (Carnot, 1824) p.22

⁶⁶ (Carnot, 1824) p.10

⁶⁷ (Carnot, 1824) p.28

- (1) Le piston est mis au contact du corps chaud et le gaz se détend à température constante (e-f)
- (2) Le piston est ensuite isolé et le gaz poursuit sa détente et sa température diminue (g-h)
- (3) Le piston est mis au contact du corps froid dès que le gaz a atteint sa température. Le piston comprime alors le gaz pour le ramener à son volume initial (c-d)
- (4) Le piston est à nouveau isolé et le gaz est à nouveau comprimé pour le ramener à la température du corps chaud (i-k)
- (5) Le piston est mis au contact du corps chaud et le gaz se dilate jusqu'à retrouver son volume initial (c-d)

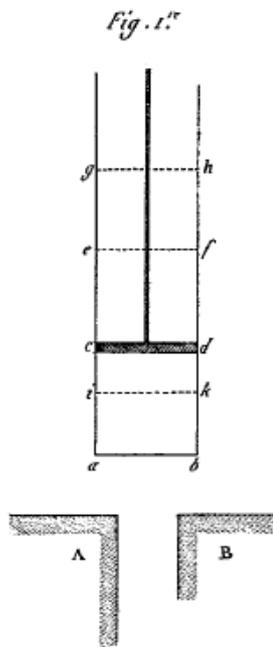


Figure 8 Illustration de la Machine idéale de Carnot⁶⁸

Les détente du gaz (étapes 1, 2 et 5) fournissant du travail, et les compressions (étapes 3 et 4) en cédant, le bilan de cette transformation est « *un excédent de puissance motrice [...] dont on pourra disposer pour des usages quelconques* »⁶⁹. Le rendement maximum de cette machine est proportionnel à la différence de température entre les sources et est d'autant plus petit que la température de la source chaude est élevée⁷⁰.

En outre, sur la nature de la chaleur, Carnot admet que le calorique n'est qu'une hypothèse : « *La loi fondamentale que nous avons en vue de confirmer nous semblerait exiger cependant, pour être mise hors de doute, des vérifications nouvelles; elle est assise sur la théorie de la chaleur*

⁶⁸ (Carnot, 1824) Fin d'ouvrage p.119

⁶⁹ (Carnot, 1824) p.35

⁷⁰ Cet énoncé constitue ce que l'on nommera *Théorème de Carnot*

telle qu'on la conçoit aujourd'hui, et il faut l'avouer, cette base ne nous apparaît pas d'une solidité inébranlable [...] Lorsqu'une hypothèse ne suffit plus à l'explication des phénomènes, elle doit être abandonnée. C'est le cas où se trouve l'hypothèse par laquelle on considère le calorique comme une matière, comme un fluide subtil. »⁷¹

c. L'apport de Clapeyron

Les travaux de Carnot ne sont pas pris en considération par la communauté scientifique, probablement à cause des mathématiques qui y sont trop présentes et au fait que les machines décrites sont non réalisables en pratique. Il faut attendre leur relecture par Émile Clapeyron (1799-1864) pour que le travail de Carnot soit exploité. Clapeyron, qui soutient la thèse du calorique, publie en 1834, un *Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur* qui reprend les écrits de Carnot en leur ajoutant un formalisme algébrique et une représentation graphique⁷².

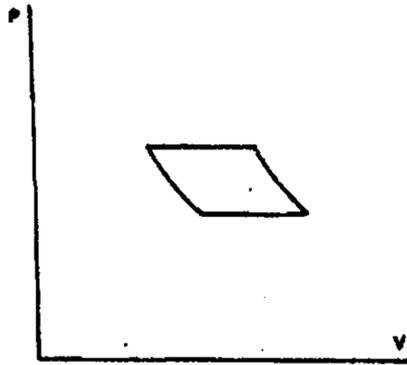


Figure 9 Cycle de Carnot d'une machine à vapeur (à son maximum de densité) idéale interprété graphiquement par Clapeyron⁷³

Clapeyron développe également la notion de transformation par voie réversible. Cette idée est alors inspirée par Carnot à propos des échanges de chaleur : « Puisque tout rétablissement d'équilibre dans le calorique peut être la cause de la production de la puissance motrice, tout rétablissement d'équilibre qui se fera sans production de cette puissance devra être considéré comme une véritable perte. [...] La condition nécessaire du maximum est donc qu'il ne se fasse pas dans les corps employés à réaliser la puissance motrice de la chaleur aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume. »⁷⁴. Dans son mémoire de 1833, Clapeyron reformule cette idée : « Dans tout appareil destiné à réaliser la force motrice que développe la

⁷¹ (Carnot, 1824) p.89

⁷² La forme de la courbe adiabatique a été obtenue par Jean-Baptiste Biot (1774-1862) vers 1820 mais elle était connue de Watt cinquante ans auparavant.

⁷³ Image extraite de (Locqueneux, 2009b) p.110

⁷⁴ (Carnot, 1824) p.23

chaleur, il y a perte de force toutes les fois qu'il y a communication directe de chaleur entre corps de température différente, et par suite, l'effet produit maximum ne pourrait être réalisé que par un appareil dans lequel il ne s'établirait de contact qu'entre corps de température égale. »⁷⁵ Ainsi, la machine possèdera un meilleur rendement si l'on opère par une infinité d'échange entre corps à des températures infiniment proches. Clapeyron donne alors la définition de ce que l'on nomme aujourd'hui une transformation par voie quasistatique, et *a fortiori* un critère pratique pour la réalisation de transformations par voie réversible.

Mais, la reprise par Clapeyron des travaux de Carnot va surtout permettre la diffusion de l'œuvre de ce dernier et notamment le porter à la connaissance de Thomson et Clausius qui vont jouer, comme on va le voir, un rôle fondamental dans l'émergence de la thermodynamique.

Les travaux de Carnot et Clapeyron ont montré qu'une machine peut fournir du travail à partir de chaleur et réciproquement, mais avec un rendement limité. Dans ce cadre fortement lié à la théorie substantialiste, la chaleur est un fluide qui n'est aucunement équivalente au travail ; ce dernier étant le produit d'une force par un déplacement. Travail et chaleur n'ont en commun qu'un rapport de causalité réciproque. Malgré les preuves apportées par les travaux de Rumford, ceux-ci n'ont pas été suffisants pour rejeter complètement la théorie du calorique.

C'est alors qu'en Allemagne dans un contexte différent, un nouveau concept va émerger : le concept d'énergie. Son principe de conservation va provoquer, en fin de compte, l'abandon de la théorie du calorique.

4. La naissance du concept d'énergie

a. L'influence de la *Naturphilosophie*

Entre 1790 et 1820, la philosophie allemande est marquée par la *Naturphilosophie* de Friedrich Wilhelm Joseph Von Schelling (1775 -1854) pour qui la nature est un grand tout procédant d'un même principe et tendant à une même fin : deux forces positive et négative, constituent la nature par opposition. La nature est un sujet actif gouvernée par trois forces : la lumière, l'électricité et le principe du magnétisme. Pour Schelling, l'organisation de l'Univers est faite de transformations de forces qui apparaissent comme des productions dynamiques. Aussi, les partisans de ce mouvement contestent la démarche cartésienne et professent une appréhension globale de la nature en identifiant la force comme un principe fondamental et unificateur de tous les phénomènes. En effet, cette force passant sans cesse d'une forme à une autre, en dépit de ses changements de propriétés, reste identique à elle-même. Une telle interprétation de la force tend à voir dans l'existence de divers équivalents de la chaleur l'expression de l'unité de la nature

⁷⁵ (Clapeyron, 1833) p.156

derrière ses multiples manifestations. La philosophie de la nature de Schelling marque la science de son temps car elle donne un rôle fondamental à l'électricité, au magnétisme et à la chimie. En outre, la *Naturphilosophie* dépasse les frontières de l'Allemagne car elle va notamment permettre à certains physiciens comme le danois Hans Christian Ørsted (1777 -1851) ou l'anglais Sir Humphry Davy (1778 -1829) de chercher des analogies entre les phénomènes des différentes composantes de la physique.

La *Naturphilosophie* va également avoir une influence significative dans l'édification des concepts de la thermodynamique. Aussi, en 1798, Davy s'attache à réfuter la théorie de matérialité de la chaleur de Lavoisier et de Black, lui substituant l'idée d'une force de répulsion. A partir d'une expérience qui consiste à produire la fusion de deux morceaux de glace en les frottant l'un contre l'autre, Davy propose une interprétation mécanique et conclut que la chaleur est un certain mouvement des particules du corps.

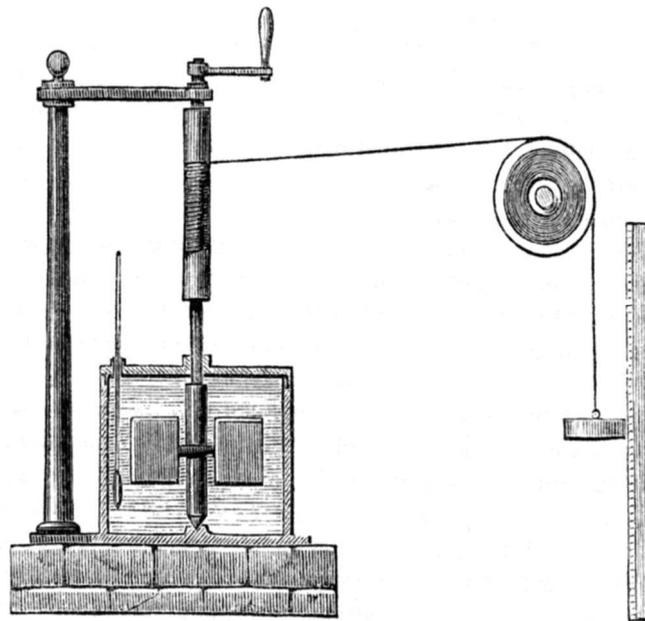
En outre, la *Naturphilosophie* va inspirer les travaux fondamentaux de Robert Von Mayer (1814-1878) et Hermann Helmholtz (1821-1894) en Allemagne et James Prescott Joule (1818-1889) en Angleterre, comme nous allons le voir.

b. Les travaux de Mayer et de Joule

Médecin sur un navire marchand de la Compagnie de Indes néerlandaise, Mayer constate que sous les tropiques le sang des marins européens est plus rouge qu'en Europe. Il conclut que cette coloration est due à un excès d'oxygène dans le sang. Il explique ce phénomène en comparant le corps humain à un moteur thermique. Les muscles du corps humain fournissent en effet, un travail mécanique et émettent de la chaleur. La différence de température entre le corps et l'air ambiant étant plus faible sous les tropiques qu'en Europe, le flux de chaleur libéré par le corps dans l'air est donc réduit. Cela signifie qu'une production de chaleur moindre suffit pour maintenir le corps à une température constante. Le corps ralentit alors son rythme d'activité et a besoin d'une moindre quantité d'oxygène pour opérer la combustion des aliments. Ainsi, le sang des cellules musculaires qui revient par les veines vers le cœur est davantage chargé en oxygène, ce qui explique sa couleur vive. L'interprétation que donne Mayer de ses observations concorde avec un fait bien connu, à savoir qu'un climat chaud diminue l'appétit. Il existe donc une relation entre la quantité de nourriture absorbée par un organisme et la quantité de chaleur qu'il produit. Mayer postule alors que cette relation s'exprime mathématiquement. Aussi pour Mayer, force musculaire et chaleur proviennent d'une force chimique latente dans les aliments et que dans l'inter-conversion de ces forces, leur quantité se conserve. Pour Mayer, les forces inanimées de la nature ont des formes diverses mais qui ne sont en fait que des manifestations d'une seule et même force élémentaire. L'influence de la *Naturphilosophie* est bien présente chez Mayer. Mais

là où cette dernière ne propose qu'une description purement qualitative, Mayer cherche à déterminer quantitativement l'équivalence entre la chaleur et le mouvement⁷⁶.

Aux débuts des années 1840, Joule, qui travaille sur le perfectionnement des électro-aimants notamment, constate que les circuits électriques dégagent de la chaleur. Il énonce alors une loi expérimentale reliant la chaleur dégagée à l'intensité du courant électrique⁷⁷. D'abord convaincu que l'électricité est un intermédiaire nécessaire dans la conversion du travail en chaleur, il se forge une autre conviction telle que la chaleur peut être engendrée par frottement. En 1842, Joule met en évidence la chaleur dégagée par le frottement de l'eau sur elle-même lorsque celle-ci est mise en mouvement par des palettes mobiles entraînées par la chute d'un poids. (Cf. Figure 10) Aussi, à travers ses expériences, Joule montre une unité entre les phénomènes de chaleur, de puissance mécanique, d'électricité... Ces grandeurs sont inter-convertibles et cela de manière quantitative. Aussi, retrouve-t-on chez Joule le même sentiment que chez Mayer : ces phénomènes sont diverses manifestations d'une même puissance naturelle qui sous ses diverses formes reste constante en quantité.



*Figure 10 Dispositif de mesure de l'équivalence entre chaleur et travail.*⁷⁸

⁷⁶ Au cours des années 1840, Mayer déterminera la valeur de l'équivalent mécanique de l'unité de chaleur en comparant la chaleur à apporter à un gaz pour l'élever d'un degré selon que l'on maintienne la pression ou le volume constant. (Locqueneux, 2009a) p.114

⁷⁷ James Prescott Joules, *On the heat evolved by metallic conductors of electricity*, *Philosophical Magazine*, 19, 1841, p.260-277

⁷⁸ Image extraite de *Harper's New Monthly Magazine*, No. 231, August, 1869

Ces expériences vont permettre à Joule de déterminer quantitativement l'équivalence entre la chaleur et le travail avec des résultats, toutefois assez imprécis⁷⁹. Néanmoins, ces travaux marquent un tournant important dans la conception de la chaleur et progressivement, le premier principe de la thermodynamique va émerger.

c. Le principe de conservation de la force d'Helmholtz

En 1847, Hermann Ludwig Ferdinand Von Helmholtz (1821 -1894) introduit dans *Über die Erhaltung der Kraft*, la « loi de conservation des forces ». Il entame ses recherches afin de contrer l'opinion courante en Allemagne selon laquelle une force vitale inépuisable et sans cesse renouvelée, entretient l'activité des êtres vivants. Convaincu de l'impossibilité du mouvement perpétuel en mécanique, Helmholtz étend ce principe à la nature toute entière et affirme que l'existence des phénomènes physiques est liée à l'inter-conversion des forces : la force mécanique ou l'action chimique peut générer de la chaleur *etc.* Il énonce alors le principe de conservation :

« *La quantité de force capable d'agir, qui existe dans la nature inorganique, est éternelle et invariable, tout aussi bien que la matière.* »⁸⁰

Les forces (forces vives et forces de tensions) sont les causes des phénomènes de la nature. Le concept de force est donc fondamental dans l'esprit de Helmholtz, tout comme l'idée de matière. L'une ne va pas sans l'autre, elles sont des représentations figuratives de la réalité.

En outre, Helmholtz, comme Joule, réfute l'idée du calorique pour appréhender la nature de la chaleur : « *la quantité de chaleur peut être augmentée d'une manière absolue par des forces mécaniques et [...] l'apparition de la chaleur ne peut être due à une substance existant préalablement, mais [...] elle est engendrée par des modifications, par des mouvements...* »⁸¹.

Aussi la quantité de chaleur n'est qu'une façon d'exprimer une quantité de force vive du mouvement au sein de la substance (chaleur sensible) et une quantité de force de tension de l'état intérieur de la substance (chaleur latente).

Aussi, à partir de 1840, presque tous les savants ne mentionnent plus l'hypothèse du calorique : les idées de Rumford ont triomphé.

Si Helmholtz n'emploie pas le mot *énergie*, qui sera introduit en 1850 par Thomson, il pose les bases, comme l'ont fait Mayer et Joule, du principe d'équivalence et plus généralement du principe de conservation. Ce dernier prendra forme quelques années plus tard sous la plume de

⁷⁹ Les valeurs obtenues par Joules ont été répertoriées par Verdet, dans les *Annales de Chimie et de Physique* de 1852, p.504-508 (Locqueneux, 2009a)p.131-134

⁸⁰ *Mémoire sur la conservation de la force*, Herman Helmholtz, citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p. 115

⁸¹ *Mémoire sur la conservation de la force*, Herman Helmholtz, citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p. 115

Clausius et Thomson inspirés des travaux de Carnot. Effectivement, ces deux hommes vont, comme nous allons le voir dans le prochain paragraphe, jouer un rôle primordial dans la constitution de la thermodynamique. D'ailleurs, c'est encore une fois Thomson qui en 1849, proposera le terme *thermodynamique*.

II. PRINCIPES DE LA THERMODYNAMIQUE ET CONCEPTS DE CHALEUR ET DE TEMPERATURE

1. Interprétations du travail de Carnot et de Clapeyron

En 1848, Thomson met en évidence l'intérêt d'une échelle de température dont le rapport est indépendant du matériau thermométrique utilisé. L'idée d'une échelle absolue de température était naturelle depuis la découverte de la loi⁸² de Jacques Charles (1746-1823) et les expériences sur les gaz⁸³ de Louis-Joseph Gay-Lussac (1778-1850) à la fin du 18^{ème} siècle. Mais, pour la définir en pratique, il faut utiliser des thermomètres à base de ces gaz dits *parfaits*. Or, les gaz réels montrent des écarts à la loi de Charles quand la température est suffisamment basse ou quand la pression est suffisamment élevée. L'idée de Thomson est alors de définir cette échelle seulement en fonction du cycle de Carnot⁸⁴. En effet, en retenant que le rendement maximal de Carnot est indépendant de l'agent thermique et en s'appuyant sur les travaux de Clapeyron, Thomson arrive à obtenir une échelle absolue de température : c'est l'échelle des kelvins.⁸⁵ Aussi, la température T en kelvin s'identifie à la quantité inverse du travail maximal obtenu avec une unité de chaleur cédée par la source chaude à la température T , à la source froide à la température $T - 1$.⁸⁶

Parallèlement aux travaux de Thomson, Clausius va entreprendre une relecture des écrits de Carnot et Clapeyron. Dans son mémoire *Sur la puissance motrice de la chaleur*, paru en 1850, Clausius défend le travail de Carnot car il a, selon lui, clairement apporté la preuve que la production d'une puissance motrice s'accompagne d'un transfert d'une quantité de chaleur d'un

⁸² La loi de Charles stipule qu'à pression P constante, le volume d'un gaz « parfait » est directement proportionnel à la température.

⁸³ Gay Lussac travaille notamment sur la dilatation des gaz et énonce les lois volumétriques qui stipulent que les gaz se combinent entre eux selon des rapports volumétriques simples.

⁸⁴ Thomson est au faite des expériences de Joule qu'il a rencontré en juin 1847 à Oxford. Mais il en fait abstraction dans un premier temps dans son travail.

⁸⁵ Thomson devient Lord Kelvin en 1892

⁸⁶ Dans notre notation actuelle : le rendement $\rho = \left| \frac{W}{Q_c} \right| = \frac{T_c - T_f}{T_c}$, Q_c est la chaleur cédée par la source chaude à la température T_c et W est le travail développé par le moteur thermique pendant un cycle. En remplaçant T_c par T , T_f par $T - 1$ et en imposant à Q_c d'être égale à l'unité on obtient effectivement $T = \frac{1}{|W|}$.

corps chaud à un corps froid. En revanche, il estime que ce transport de chaleur s'accompagne toujours d'une consommation de chaleur et que le travail ainsi produit s'estime selon deux points :

- la relation d'équivalence de Joule entre chaleur et travail.
- la relation entre le travail produit et la chaleur transportée pour une machine à rendement maximum de Carnot.

Mais, Clausius propose d'appuyer sa réflexion sur un nouvel axiome : *la chaleur ne passe jamais d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud*^{87,88}.

Cet axiome est pourtant critiqué par Thomson, qui y voit une simple généralisation des constatations expérimentales. Il estime que la production de la puissance motrice par ce transfert irréversible de chaleur de corps chauds aux corps froids, reflète l'idée que l'énergie de l'Univers, bien que constante⁸⁹, n'a de cesse de se dégrader irrémédiablement. En 1867, est publié le *Treatise on Natural Philosophy* de Thomson et Peter Tait (1831-1901). Cet ouvrage devient rapidement en Angleterre un ouvrage de référence dans les universités faisant de l'énergie et de la matière des constituants fondamentaux de la nature. La chaleur perd ainsi son rôle prédominant. Thomson est clairement persuadé que c'est l'énergie et non la chaleur qui est conservée lors d'une transformation. Thomson et Tait présentent que : « *lors du fonctionnement des machines, [...] l'effet mécanique n'est pas perdu comme le pense Carnot, il est gaspillé, il devient inutile, impropre au fonctionnement d'une machine.* »⁹⁰

En 1852, Thomson présente dans l'article *On the Dynamical Theory of Heat*, une nouvelle formulation des idées de Carnot : « *Il est impossible, au moyen d'agents matériels inanimés, de tirer aucun effet mécanique d'une substance quelconque, en abaissant sa température au-dessous de la température des corps qui sont les plus froids, parmi tous ceux qui environnent cette substance.* »^{91,92} En 1854, Thomson propose une écriture formalisée du cycle de Carnot, et montre qu'il peut exister une relation simple entre les échanges Q_A , Q_B avec les corps A et B au cours du cycle et les températures (en kelvin) T_A et T_B de ces derniers :

$$\frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B} = 0$$

⁸⁷ Citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p.145

⁸⁸ Axiome connu aujourd'hui sous le nom d'énoncé historique de Clausius du second principe.

⁸⁹ Pour Thomson c'est une conviction d'ordre théologique : « *la puissance de détruire n'appartient qu'au Créateur* » (Locqueneux, 2009b) p.144

⁹⁰ Muriel Guedj, *L'émergence du principe de conservation de l'énergie et la construction de la thermodynamique*, Thèse de doctorat, 2000 université Paris 7 p.170 citation extraite de (Méheut, et al., 2004) p.35

⁹¹ *On the Dynamical Theory of Heat*, Thomson 1852, Citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p.146

⁹² Connue aujourd'hui sous le nom d'énoncé du second principe historique de Thomson.

Cette relation, Thomson la généralisera par la suite à n sources.

Clausius et Thomson s'accordent sur le fait qu'il n'y a pas de contradiction entre la conservation de l'énergie et la dégradation de la puissance motrice d'une machine du fait de la conduction. Ils estiment que le principe de bilan d'énergie n'est pas suffisant à décrire le phénomène de propagation de la chaleur. D'où la nécessité d'une autre hypothèse qui par la suite donnera naissance au concept d'entropie.

2. Formalisation des principes de la thermodynamique

a. Energie et entropie

En 1850, Clausius introduit une fonction d'état, que Thomson désignera plus tard sous le nom d'*énergie interne*⁹³, qui n'est autre que la somme du travail et de la chaleur. Cette proposition donne à la chaleur et au travail une approche énergétiste et permet de concevoir un principe de conservation qui englobe les propositions de Joule sur l'équivalence chaleur-travail. Ainsi Clausius énonce en 1865 :

$$\ll \qquad \qquad \qquad dQ = dU + AdW$$

U représente la quantité que j'ai introduite pour la première fois dans la théorie de la chaleur en 1850 (Mémoire I, p.36) et que j'ai définie comme la somme de la chaleur libre introduite et de la chaleur consommée par le travail intérieur. W. Thomson a proposé plus tard pour cette quantité le nom d'énergie du corps ; je me suis rallié à cette dénomination que j'ai considérée comme très-heureuse ; toutefois je pense qu'on peut se réserver, dans les cas où l'on veut indiquer séparément les deux parties de U, l'emploi de l'expression le contenu de chaleur et d'œuvre, qui reproduit ma définition originale sous une forme un peu plus simple. W représente le travail extérieur effectué pendant un changement d'état du corps, et A l'équivalent de chaleur pour l'unité de travail, ou plus brièvement l'équivalent calorifique du travail. D'après cela AW est le travail extérieur mesuré en calories, ou, d'après une dénomination plus brève que j'ai proposée, l'œuvre extérieur.»^{94,95}

⁹³ Selon Pierre Duhem (1861-1916), la grandeur U a reçu un nombre important de dénomination mais c'est celle donnée par Thomson qui s'est imposée : « *La quantité U a été pour la première fois considérée par Clausius dans le mémoire que nous avons cité; elle n'a reçu de lui aucune dénomination particulière les autres physiciens n'ont pas imité sa réserve, car cette fonction a reçu un grand nombre de noms différents; celui qui a prévalu est le nom d'énergie interne du système, qui lui a été donné par Sir W. Thomson, et qui a été ensuite adopté par Clausius* » (Duhem, 1893) chapitre II p.17

⁹⁴ (Clausius, 1865) p.362

⁹⁵ En outre Clausius introduit en 1865, la grandeur *Œuvre* (Werk), qui correspond à « *un travail mesuré en unités calorifiques ou calories.* » Clausius justifie l'utilisation de cette notion car juge « *très*

Ce texte montre clairement le succès de la physique mathématique et expérimentale dans l'élaboration du premier principe de la thermodynamique. En outre, l'énoncé selon lequel « *L'énergie totale d'un système isolé reste constante* » devient ainsi évident. En effet, considérons un système isolé, c'est-à-dire supposé être enfermé dans une enceinte idéale et ne pouvant rien échanger avec le milieu extérieur : $Q = 0$ et $W = 0$. Le bilan énergétique global est alors nul : l'énergie d'un système isolé est une grandeur qui ne peut être ni diminuée ni augmentée par aucun des phénomènes qui se passent à l'intérieur de ce système. Donc, les événements qui s'y produisent ne se traduisent que par des transformations de certaines formes d'énergie en d'autres formes d'énergie.

Clausius estime qu'il est nécessaire de représenter mathématiquement tous les types de transformations. Si la formulation de la conservation de l'énergie semble acquise, il faut désormais exprimer mathématiquement que toutes les énergies n'ont pas toutes la même « valeur ». En s'appuyant sur le travail de Carnot, il propose une formulation analytique du deuxième principe de la thermodynamique, qu'il nomme le *second théorème principal de la théorie de la chaleur*. Aussi en 1855, Clausius exprime, dans l'article *Sur une nouvelle forme du second théorème principal de la théorie mécanique de la chaleur*⁹⁶, que pour les processus cycliques, la quantité $\frac{dQ}{T}$ vérifie l'inégalité⁹⁷ :

$$\int \frac{dQ}{T} \geq 0$$

L'égalité étant réservée pour le cas où tous les changements du cycle sont réversibles, c'est-à-dire capables d'être effectués dans le sens contraire.

Puis en 1865, Clausius introduit la fonction S telle que dS soit une différentielle totale exacte. Il nomme la fonction S *entropie* à partir du mot grec « *τροπος* » signifiant *transformation*. Il estime que ce mot se doit d'être proche du mot « *énergie* », tant il conçoit que ces deux quantités ont une analogie dans leur signification physique⁹⁸. Aussi pour un processus non cyclique, l'inégalité s'exprime⁹⁹ :

incommode, dans toute exposition de la théorie mécanique de la chaleur que la chaleur et le travail mécanique soient évalués au moyen d'unités différentes » (Clausius, 1865) p.363

⁹⁶ (Clausius, 1855) p.79

⁹⁷ Clausius inversera en 1865 le sens de l'inégalité : « Dans mon *Mémoire* « *sur une nouvelle forme du second théorème principal de la théorie mécanique de la chaleur* », où j'ai donné pour la première fois la forme la plus générale de ce théorème, relative à des séries circulaires de changements, j'ai choisi le signe de la différentielle dQ autrement qu'ici, en ce que là un élément de chaleur est regardé comme positif lorsqu'il passe du corps variable dans un réservoir de chaleur, et négatif lorsqu'il est fourni par ce réservoir. » En 1865, Clausius choisit les éléments de chaleur reçus par le corps comme positifs et négatifs ceux qui lui sont soutirés ; aussi il inverse l'inégalité : $\int \frac{dQ}{T} \leq 0$ (Clausius, 1865) p.364

⁹⁸ (Clausius, 1865) p.391

⁹⁹ (Clausius, 1865) pp.397-398

$$\Delta S \geq \int \frac{dQ}{T}$$

Pour conclure son article de 1865, se référant à un système isolé, Clausius livre, avec une certaine réserve néanmoins sur l'application de sa première et deuxième lois à l'ensemble de l'univers, la fameuse devise suivante (Cf. Figure 11) :

« *L'Énergie de l'Univers est constante, l'Entropie de l'Univers tend vers un Maximum* »

Vorläufig will ich mich darauf beschränken, als ein Resultat anzuführen, das, wenn man sich dieselbe GröÙe, welche ich in Bezug auf einen einzelnen Körper seine *Entropie* genannt habe, in consequenter Weise unter Berücksichtigung aller Umstände für das ganze Weltall gebildet denkt, und wenn man daneben zugleich den anderen seiner Bedeutung nach einfacheren Begriff der *Energie* anwendet, man die den beiden Hauptsätzen der mechanischen Wärmetheorie entsprechenden Grundgesetze des Weltalls in folgender einfacher Form aussprechen kann.

1) Die Energie der Welt ist constant.

2) Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Pour le moment, je me bornerai à indiquer un résultat que l'on peut exprimer comme suit : Si l'on suppose qu'en tenant compte de toutes les circonstances, on ait formé pour l'univers entier la grandeur que j'ai nommée *entropie* relativement à chaque corps particulier, et si l'on applique en même temps l'autre idée plus simple de l'*énergie*, on pourra exprimer comme suit les deux lois fondamentales de l'univers, qui correspondent aux deux théorèmes principaux de la théorie mécanique de la chaleur :

1. L'énergie de l'univers est constante.

2. L'entropie de l'univers tend vers un maximum.

Figure 11 Conclusion de l'article de Clausius de 1865 se référant à un système adiabatique isolé. En haut le texte original en allemand, en bas la traduction de Bessart¹⁰⁰

Cette généralisation à l'Univers a provoqué beaucoup de débats et de critiques. En effet, l'Univers se trouve actuellement dans un état de déséquilibre thermique entre des étoiles en fusion (très « chaudes ») et l'espace ambiant (très « froids »). Selon le deuxième principe, son entropie augmente et les différences de température tendent donc à s'estomper. L'Univers parviendra un jour dans un état d'entropie maximale marqué par la fin de production d'énergie dans les étoiles, celles-ci ayant atteint l'équilibre thermique avec le reste de l'espace. Ces étoiles seront alors presque totalement refroidies, la température de l'Univers sera uniforme et les processus liés à

¹⁰⁰ (Clausius, 1865) p.400

l'ordre et l'information¹⁰¹ (telle la vie) ne seront plus possibles. Ainsi, si l'on accepte la généralisation de Clausius, l'Univers s'avance inéluctablement vers ce qu'on appelle sa « *mort thermique* ». Par ailleurs, pour élégante qu'elle soit, cette généralisation à l'Univers entier du principe de conservation de l'énergie doit cependant être considérée avec prudence : les systèmes isolés qu'étudie ordinairement le physicien sont des systèmes finis¹⁰², et l'état actuel de nos connaissances ne permet pas d'affirmer que l'Univers n'est pas un système infini. Dans un tel système, le concept d'énergie totale et, donc, celui de conservation de l'énergie n'ont peut-être aucun sens.

b. La disgrégation de Clausius

La théorie de Carnot et de Clapeyron sont des théories substantialistes de la chaleur, basées sur le calorique et son déplacement d'un corps à l'autre. Même si Clausius s'accorde à montrer l'importance du travail de Carnot, il n'en reste pas moins que son appréhension de la chaleur, soit basée, comme nous allons le voir, sur une toute autre conception qui l'amènera au concept d'entropie.

En 1857, Clausius interprète les différents états de la matière en imaginant différents agencements et mouvements des atomes et des molécules. La chaleur consiste dans un mouvement des molécules en les rapprochant ou en les éloignant les unes des autres. Pour comprendre le rôle de la chaleur dans les transitions entre les états, Clausius introduit en 1865¹⁰³, la notion de *disgrégation*, dont il en donne une interprétation microscopique en 1868 :

« J'ai introduit le mot disgrégation, qui accuse jusqu'à quel point cette dissociation et cet écartement des plus petites particules d'un corps sont consommés sous l'influence de la chaleur. En considérant les trois états des corps, la disgrégation sera par conséquent la plus petite dans les corps solides, plus grande dans les corps liquides, et encore plus grande dans les corps gazeux. Dans le dernier cas, elle peut encore augmenter, parce que les molécules s'éloignent davantage les unes des autres, c'est-à-dire le gaz se dilate. [...] à l'aide de cette conception, on peut exprimer simplement l'action de la chaleur en disant : La chaleur tend à augmenter la disgrégation des corps »¹⁰⁴.

Cette hypothèse de la disgrégation permet à Clausius d'exprimer le fait que la chaleur pour augmenter la disgrégation doit lutter contre les travaux intérieurs mais aussi extérieurs : ainsi

¹⁰¹ Cf. Chapitre 9 sur les différentes significations de l'entropie.

¹⁰² Nous reviendrons sur la signification de la notion de système en thermodynamique dans le Chapitre 7 de ce travail.

¹⁰³ (Clausius, 1865) p.390

¹⁰⁴ (Clausius, 1868a) p.159

une augmentation de la disgrégation entraîne une transformation¹⁰⁵ du travail (ou œuvre) en chaleur et une diminution de disgrégation, une transformation de la chaleur en travail. Clausius classe ensuite les transformations en deux catégories : les transformations *positives* et les transformations *negatives* chacune étant réalisées dans deux cas :

Transformations <i>positives</i>	Transformations <i>negatives</i>
Augmentation de disgrégation	Diminution de disgrégation
Transformation du travail en chaleur	Transformation de chaleur en travail

Tableau 1 Classification des transformations selon Clausius

Clausius en s'appuyant sur les constatations expérimentales et sa définition de la disgrégation énonce alors : « *des transformations negatives ne peuvent avoir lieu qu'avec compensation, mais des transformations positives peuvent avoir lieu sans compensation* » et conclut :

« *[Le travail] que peuvent effectuer les forces naturelles, et qui est contenu dans les mouvements des différents corps de l'univers, se transforme successivement et de plus en plus en chaleur. La chaleur, tendant constamment à passer des corps plus chauds sur les corps plus froids, et par conséquent à rendre les températures égales de part et d'autre, se répartira peu à peu toujours d'une manière plus égale, et il s'établira un équilibre déterminé entre la chaleur rayonnante, et la chaleur qui se trouve dans les corps. Enfin, les molécules des corps tendront à prendre une disposition, telle que, eu égard à la température régnante, la disgrégation totale soit aussi grande que possible* »¹⁰⁶

Ces textes de Clausius qui aboutiront comme nous l'avons vu à l'introduction de l'entropie, nous permettent également de comprendre que même si, d'après la loi de Joule, chaleur et travail sont *quantitativement* des grandeurs équivalentes, mais ne sont pas *qualitativement* équivalentes. En effet, l'idée de la dégradation de l'énergie présentée ici fait de la chaleur une grandeur dégradée du travail.

c. La formalisation de la thermodynamique selon Massieu

Le travail des physiciens va se poursuivre dans la mise en forme des principes afin de permettre une application concrète de ces derniers grâce à l'introduction d'outils mathématiques élaborés. Ainsi, dans la continuité de Clausius, François Massieu (1832-1896) va proposer dans un article, *Sur les fonctions caractéristiques des divers fluides et sur la théorie des vapeurs*, paru

¹⁰⁵ Clausius nomme transformation ce qui se passe quand le travail est généré par consommation de chaleur et inversement. Il extrapole le mot transformation au changement de disgrégation c'est-à-dire « *transformation de la disposition primitive des petites particules d'un corps en un autre* »

¹⁰⁶ (Clapeyron, 1833) p.159

en 1869, de décrire les fluides par une fonction qu'il nomme *fonction caractéristique* (qu'il est possible de rapprocher comme nous le verrons des potentiels thermodynamiques). Ainsi, Massieu estime que si la fonction caractéristique d'un corps est connue, alors la théorie thermodynamique de ce corps est faite : *toutes ses propriétés physiques peuvent être déduites à partir de cette fonction caractéristique*. Ainsi, en choisissant les variables volume V et inverse de la température $1/T$, Massieu construit à partir des expressions analytiques et synthétiques des principes : $TdS = dU + APdV$, la fonction $\Psi\left(\frac{1}{T}, V\right)$ telle que sa variation :

$$d\Psi = -Ud\left(\frac{1}{T}\right) + A\frac{P}{T}dV$$

Il en découle l'expression de l'entropie S et de l'énergie interne :

$$S = \frac{d}{dT}(T \cdot \Psi) \quad U = -\frac{d\Psi}{d\left(\frac{1}{T}\right)}$$

Soit :

$$\Psi = S - \frac{U}{T}$$

Se déduisent également les chaleurs spécifiques, les coefficients de dilatation et de compressibilité, ainsi que l'équation d'état sous la forme $P = \frac{T}{A} \frac{d\Psi}{dV}$.

Une deuxième fonction caractéristique de Massieu peut être construite de la même façon en choisissant les variables pression P et inverse de la température $1/T$ telle que :

$$\Psi'\left(\frac{1}{T}, P\right) = S - \frac{U'}{T}$$

Où $U' = U + APV$

En 1876, Massieu rédige sur ce sujet un mémoire¹⁰⁷ qui reprend en grande partie l'étude développée dans son traité mais en y apportant quelques mises en forme supplémentaires. Le travail de Massieu reste longtemps méconnu, peut-être parce que, comme Carnot, il travaillait à l'écart de la communauté scientifique. Pourtant, Massieu était au courant des progrès les plus récents, puisqu'il s'est appuyé sur le concept d'entropie que Clausius venait d'élaborer en 1865 et adhérait à la théorie moléculaire qui commençait alors à émerger.

d. La formalisation de la thermodynamique selon Gibbs

La formalisation de la thermodynamique se poursuit dans les années qui suivent avec la contribution majeure de Gibbs, inspirée fortement des fonctions caractéristiques¹⁰⁸. Gibbs pose

¹⁰⁷ *Thermodynamique, Mémoire sur les fonctions caractéristiques des divers fluides et sur la théorie des vapeurs*, François Massieu 1876.

¹⁰⁸ L'œuvre de Massieu peut être vue comme une inspiration pour Gibbs. En effet, en 1876, Gibbs rédige dans son article *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances (Part I)*, une note faisant référence au travail de Massieu : « *Massieu semble avoir été le premier à résoudre le problème de la représentation*

entre autre la fonction énergie interne U comme fonction de l'entropie et du volume $U = U(S, V)$ faisant comme le suggère Massieu, du volume et de l'entropie, deux variables indépendantes. La contribution de Gibbs apparait également par l'introduction de nouveaux diagrammes de représentation au côté des traditionnels diagrammes (pression, volume) et (pression, température). On peut lire dans son article *Diagrammes et surfaces thermodynamiques* de 1903 : « dans la pratique courante, les diagrammes qui donnent en coordonnées rectangulaires le volume et la pression. Le but de ce mémoire est d'attirer l'attention sur des diagrammes différents, qui sont supérieurs, dans bien des cas, en clarté et en commodité »¹⁰⁹. Gibbs justifie par exemple l'intérêt des diagrammes (Température, entropie) (Cf. Figure 12) pour l'étude de la machine parfaite de Carnot : « Remarquons que l'espèce la plus simple de machine thermique parfaite, telle qu'elle est décrite dans les ouvrages de thermodynamique, sera représentée dans le diagramme entropie-température par une figure d'une extrême simplicité par un rectangle, dont les côtés sont parallèles aux axes des coordonnées. Ainsi dans la figure 4 le cycle ABCD représente la série des états que parcourt un fluide dans une semblable machine et le travail est représenté par la surface enfermée ; tandis que la surface ABFE représente la chaleur reçue de la source chaude à la température la plus élevée AE, et la surface CDEF la chaleur transmise au condenseur à la température plus basse DE. »¹¹⁰

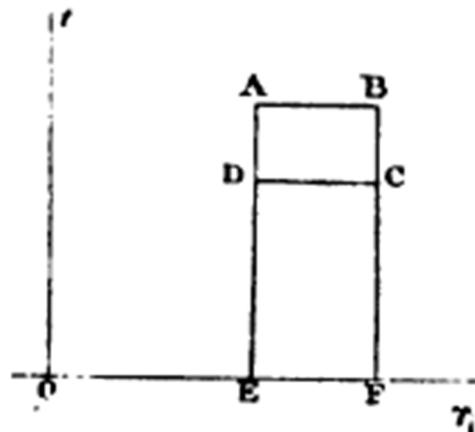


Fig. 4.

Figure 12 Diagramme (T,s) de la machine parfaite selon Gibbs

Gibbs est également le précurseur d'une méthode de représentation géométrique des propriétés thermodynamiques des substances au moyen de surfaces. Selon Gibbs, « les propriétés thermodynamiques fondamentales d'un fluide sont déterminées par les relations qui existent entre le volume, la pression, la température et l'entropie d'une certaine quantité de fluide en équilibre

de toutes les propriétés d'un corps de composition invariable qui interviennent dans les processus réversibles au moyen d'une seule fonction. » (Gibbs, 1874-1878) p.142

¹⁰⁹ (Gibbs, 1903) p.17

¹¹⁰ (Gibbs, 1903) p.29

thermodynamique. »¹¹¹ Ainsi, il propose que la relation entre *volume*, *entropie* et *énergie interne* soit donnée par une surface, qu'il nomme *surface thermodynamique*, dans un diagramme tridimensionnel (U, S, V) . Selon Gibbs, d'autres diagrammes tridimensionnels ont déjà été proposés, notamment reliant le volume, la pression et la température. Mais ces diagrammes donnent « *une connaissance moins générale des propriétés du corps que celle qui existe entre le volume, l'entropie et l'énergie, car tandis que la [relation volume, pression et température] est déterminée par la [relation volume, entropie et énergie] et peut en être dérivée, la [relation volume, entropie et énergie] n'est aucunement déterminée par la [relation volume, pression et température].* »¹¹²

Le travail de Gibbs se poursuit ensuite en posant les fondements de ce qui deviendra la thermochimie. Dans son article de 1878, *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances (Part II)*, Gibbs exprime le critère d'équilibre et de stabilité d'un système isolé. Il généralise ensuite l'expression de la variation de l'entropie, pour les systèmes qui sont sièges de réactions chimiques ou de changement d'état :

$$TdS = dU + PdV - \sum_i \mu_i dn_i$$

Où i désigne les constituants du milieu en quantité n_i de potentiel chimique μ_i .

Il introduit par la suite plusieurs fonctions caractéristiques formées d'autres variables indépendantes :

$$F(T, V, n_i) \quad G(T, P, n_i) \quad H(S, P, n_i)$$

Ces fonctions, proches de celles de Massieu, contiennent naturellement toutes les informations nécessaires sur le système, et jouent donc selon Gibbs, le rôle de potentiels thermodynamiques¹¹³.

3. Une nouvelle hypothèse sur la chaleur et la température

Si la thermodynamique depuis les travaux de Carnot a connu un développement important sur la relation entre les causes et les conséquences (responsable de la force motrice, s'écoulant spontanément d'un corps chaud vers un corps froid...), les différentes théories n'ont pas pour l'instant donné une définition convergente de la chaleur. Or, dans cette seconde moitié du 19^{ème} siècle, deux courants de pensée, l'énergétisme et l'atomisme, vont s'affronter et la conception de la thermodynamique en sera directement affectée.

¹¹¹ (Gibbs, 1903) p.59

¹¹² (Gibbs, 1903) p.61

¹¹³ Le travail de formalisation de la thermodynamique réalisé par Gibbs va en outre se poursuivre en mécanique statistique avec la publication en 1902 des *Elementary Principles of Statistical Mechanics*. Il établira une correspondance formelle entre celle-ci et la thermodynamique.

a. Une définition atomiste de la température

En 1856, August Krönig (1822-1879) propose une modélisation du gaz. Les molécules constitutives du gaz de Krönig se déplacent toutes à la même vitesse, parallèlement aux arrêtes d'une boîte en forme de pavé. Il justifie sa proposition par le fait que « *le parcours de chaque molécule doit être si irrégulier qu'il défie tout calcul. Cependant suivant les lois de la théorie probabiliste, nous pouvons supposer un mouvement absolument régulier au lieu d'un mouvement complètement irrégulier.* »¹¹⁴ Il propose alors une expression de la pression, qui résulterait des chocs des molécules sur les parois du réservoir¹¹⁵ :

$$P = \frac{Nmu^2}{V}$$

La quantité $\frac{N}{V}$ représentant la densité volumique de molécules dans la boîte, m la masse d'une molécule et u sa vitesse. Cette expression de la pression, mise en relation avec l'équation du gaz parfait, lui permet de donner une définition microscopique et atomique de la température absolue liée à l'énergie cinétique des molécules :

$$T \propto mu^2$$

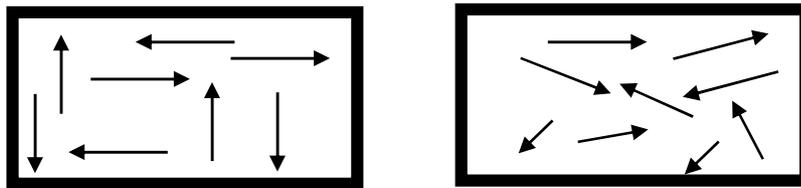


Figure 13 Représentations du gaz de Krönig (à gauche) et du gaz de Clausius (à droite)

Le travail de Krönig est quelque peu repris par Clausius en 1857 qui donne du gaz une image assez proche. Mais l'un des problèmes de cette théorie est que, d'après les calculs les plus élémentaires, chaque molécule d'un gaz devrait se déplacer à une vitesse gigantesque dans les conditions ambiantes. Ceci serait alors contradictoire avec les observations de la diffusion des substances qui est un phénomène relativement lent. Pour Clausius, même si les molécules se déplacent la plupart du temps en ligne droite et à vitesse constante, elles subissent énormément de collisions, de sorte que la trajectoire d'une molécule en particulier est très irrégulière, ce qui explique le temps relativement long pour la diffusion. Clausius fait un calcul approximatif de la distance moyenne qu'une molécule parcourt avant d'entrer en collision avec une autre molécule

¹¹⁴ *Grunzügeiner Theorie der Gase*, Annalen der Physik, 1856. Citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p.262

¹¹⁵ Daniel Bernoulli (1700-1782) avait proposé en 1738 l'explication de la pression d'un gaz qui est due aux collisions de ses molécules avec les parois de son contenant.

appelé *libre parcours moyen*. Si chaque molécule est comparée à une sphère de diamètre d , alors le libre parcours moyen s'écrit :

$$l \approx \frac{V}{Nd^2}$$

la quantité $\frac{N}{V}$ représentant la densité volumique de molécules.

Mais, si le gaz de Clausius est capable de se déplacer librement dans toutes les directions de l'espace, les molécules le constituant peuvent également tourner sur elle-même et les atomes formant ces molécules peuvent vibrer. Pour Clausius ces mouvements traduisent la *chaleur*¹¹⁶ que contient un gaz. En revanche, les mouvements finissent par s'équilibrer du fait des chocs (même si le gaz est très dilué). En conséquence, le mouvement de translation n'est pas augmenté ni diminué. Il est alors possible de définir une *vitesse moyenne* de ces molécules, et la pression qu'elles engendrent du fait des chocs sur les parois :

*« Il existe certainement, dans la réalité, la différence la plus variée dans la vitesse des diverses molécules. Mais dans notre analyse, nous pourrions attribuer à toutes les molécules une certaine vitesse moyenne. Comme on le verra par les formules suivantes, il faudra, pour obtenir la même pression, choisir cette vitesse de telle sorte que la force vive de toutes les molécules soit la même pour cette vitesse moyenne que pour les vitesses réelles »*¹¹⁷

Clausius aboutit alors à l'expression exacte de la pression, proche de celle de Krönig :

$$P = \frac{1}{3} \frac{Nmu^2}{V}$$

La quantité $\frac{Nmu^2}{2}$, que Clausius nomme *force vive du mouvement*, peut, grâce à l'équation des gaz parfaits se ramener à une définition similaire de la température :

$$T \propto \frac{Nmu^2}{2}$$

Il s'agit là d'une première relation liant le comportement microscopique du gaz et de son comportement macroscopique lié aux grandeurs macroscopiquement repérables de pression et de température.

b. Les travaux de Rankine

En 1856, William Rankine (1820-1872) développe une théorie sur l'élasticité de la matière solide, liquide et gazeuse. Il postule pour cela que la matière est faite de noyaux dispersés qui

¹¹⁶ Nous reconnaissons dans la *chaleur* de Clausius ce qui dans un langage moderne, représente la partie cinétique de l'énergie interne. Nous reviendrons plus tard sur cet amalgame entre les deux concepts, notamment dans le chapitre 8.

¹¹⁷ (Clausius, 1868b) p.205

interagissent à distance. Leur environnement direct est alors constitué d'une atmosphère de fluide élastique agitée de vibrations et de tourbillons. La présence de cette substance en plus ou moins grande quantité, fait de la matière davantage un gaz, un liquide ou un solide. Il attribue alors à la chaleur, la capacité d'engendrer des mouvements au sein de cette atmosphère atomique, jouant le rôle de force vive microscopique. Il cherche alors à relier les grandeurs microscopiques telles que la vitesse de révolution w au cœur des tourbillons, à la température du milieu. Il propose alors que la température T est une fonction de w^2 divisée par le coefficient d'élasticité des atmosphères atomiques :

$$T = f \left(\frac{w^2}{b} \right)$$

Dans son développement, Rankine persuadé de la relation de proportionnalité entre chaleur et température, donne l'expression de la quantité de chaleur par unité de poids :

$$Q = k \frac{w^2}{2g}$$

Où k est un facteur dépendant de la nature chimique de la substance. Mais cette hypothèse de Rankine montre la confusion qui est faite entre la température liée à l'énergie d'agitation thermique à l'échelle moléculaire, *i.e* l'énergie cinétique microscopique et la quantité de chaleur. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 8 de ce travail.

Basée notamment sur les travaux de Rankine et Clausius, la description microscopique de la matière et son lien avec les concepts énergétiques et entropiques vont prendre un nouvel essor avec les contributions de James Clerk Maxwell (1831-1879) et Ludwig Boltzmann (1844 -1906) à la fin du 19^{ème} siècle. C'est l'objet du dernier paragraphe de ce chapitre.

III. EPILOGUE DE LA THERMODYNAMIQUE CLASSIQUE

1. Une réponse statistique aux principes de la thermodynamique

a. L'introduction des probabilités dans la description des corps

En 1860, Maxwell publie un article intitulé *Illustrations de la théorie dynamique des gaz*, dans lequel il propose une description du gaz constitué : « *[de] particules [qui] sont des centres de forces, dont l'action est insensible sauf à une certaine distance très petite où elle apparaît soudain comme une force répulsive de très grande intensité.* »¹¹⁸ Cette hypothèse, Maxwell s'en

¹¹⁸ *Illustrations of the dynamical Theory of Gases*, James Clerk Maxwell, 1860, Philosophical Magazine, citation extraite de (Barberousse, 2002) p. 83

sert exclusivement de base pour résoudre un problème mécanique, sans pour autant croire en l'existence des atomes et des molécules. A la différence de Clausius qui considérait que toutes les molécules du gaz avaient une vitesse égale à la vitesse moyenne des particules, Maxwell introduit la notion de probabilité dans la distribution des vitesses. En revanche, il accorde que toutes les directions de l'espace sont équiprobables. Le développement de Maxwell réside alors dans les lois des chocs de la mécanique pour établir l'expression de la pression P exercée par les molécules d'un gaz sur une paroi :

$$P = \frac{1}{3}NM\overline{v^2}$$

N désigne le nombre de molécules du milieu et M la masse d'une molécule et $\overline{v^2}$ valeur moyenne des vitesses au carré. La quantité $1/3$ qui apparaît, est une conséquence de l'équiprobabilité des directions de l'espace. En rapprochant cette expression de l'équation d'état des gaz parfaits, Maxwell en déduit alors que la température absolue T du gaz est proportionnelle à la valeur moyenne du carré des vitesses¹¹⁹ :

$$T \propto \overline{v^2}$$

Maxwell définit alors l'énergie cinétique moyenne d'une molécule par la quantité $\frac{1}{2}M\overline{v^2}$. Mais il s'accorde, comme Clausius, à admettre que les molécules ont un mouvement interne. Ainsi l'énergie totale devient proportionnelle à l'énergie d'agitation : $\frac{1}{2}\beta M\overline{v^2}$, avec β un coefficient plus grand que 1. Maxwell aboutit au fait que l'énergie cinétique des N molécules du milieu sera égale à :

$$\epsilon = \frac{1}{2}\beta NM\overline{v^2}$$

En rapprochant les équations de pression et d'énergie, Maxwell en déduit que l'énergie cinétique par unité de masse, notée ici e vaut :

$$e = \frac{3}{2}\beta PV$$

Ainsi Maxwell énonce le théorème de l'équipartition de l'énergie : « *puisque le produit PV est proportionnel à la température absolue, l'énergie est proportionnelle à la température.* »¹²⁰

¹¹⁹ Dans le même travail, Maxwell calcule la viscosité d'un gaz à partir du libre parcours moyen de Clausius et montre qu'elle est indépendante de la pression. Connaissant la viscosité mesurée, Maxwell peut en déduire le libre parcours moyen l .

¹²⁰ *La chaleur*, James Clerk Maxwell, 1891, citation extraite de (Locqueneux, 2009a)p.317

b. Interprétation statistique du deuxième principe

La théorie cinétique des gaz ainsi établie, permet d'interpréter l'énergie d'un gaz en fonction de l'énergie cinétique microscopique des molécules qui le composent. Le premier principe de la thermodynamique est alors estimé en fonction des principes de la mécanique. Mais une telle interprétation est plus difficile à réaliser pour le deuxième principe : l'entropie ne s'exprime pas en fonction de quantités mécaniques simples. En outre, se pose le problème que les lois de la mécanique sont réversibles, elles restent identiques par inversion du temps, alors qu'il en est différemment pour les phénomènes thermodynamiques. Le problème conceptuel lié au deuxième principe de la thermodynamique est alors de chercher à interpréter en fonction des lois de la mécanique l'irréversibilité des processus complexes.

Les travaux de Maxwell sont repris quelques années plus tard par Boltzmann qui tente notamment de traiter le cas de l'évolution d'un gaz qui n'est pas initialement en état d'équilibre thermique. Pour traduire l'évolution de la fonction de distribution des vitesses des molécules du gaz, Boltzmann introduit une fonction d'évolution notée H dépendant des positions et des vitesses des particules supposées totalement désordonnées. Cette fonction doit remplir deux conditions pour un gaz isolé :

- Elle doit être strictement décroissante : $\frac{dH}{dt} < 0$
- Elle doit être minimale lorsque le système atteint l'équilibre : $\frac{dH}{dt} = 0$

Cette proposition de Boltzmann, fervent défenseur des atomes, montre qu'il est attaché au fait qu'un système, en l'occurrence gazeux, évolue nécessairement vers un état d'équilibre et que cette évolution se base sur des lois purement mécaniques. De plus, cette fonction H comme la fonction entropie, indique l'évolution d'un système physique.

La réponse que doit apporter Boltzmann réside dans l'aspect contradictoire entre l'irréversibilité des phénomènes thermodynamiques et leurs descriptions par une mécanique réversible. Mais, puisqu'il est illusoire de penser connaître l'état mécanique de chaque molécule d'un gaz pour décrire son évolution, il suffit d'estimer pour les états initial et final, le nombre de configurations possibles pour le gaz. Ainsi, l'état final d'équilibre réellement observé sera le plus probable car il correspondra au plus grand nombre de configurations possibles. Cette analyse permet à Boltzmann d'aboutir à un résultat, traduisant le caractère statistique de l'entropie. Formulée par Max Planck (1858-1947) en 1900, l'entropie s'exprime comme une fonction du nombre de configurations ω correspondant à la distribution la plus probable :

$$S = k \log \omega$$

En conséquence pour un système isolé, l'état d'équilibre atteint par voie irréversible correspond à l'entropie la plus grande.

Pourtant, à la fin du 19^{ème} siècle la mécanique statistique n'a pas bonne réputation. Car, si elle permet d'amorcer la compréhension de la structure microscopique de la matière, la complexité

des développements de Boltzmann et certaines faiblesses¹²¹ de la théorie pèsent sur l'intérêt que portent les physiciens à son égard. Ils préfèrent se laisser porter « *par l'air du temps* » aux colorations plutôt anti-atomistes.

2. La thermodynamique science de l'énergie

Le développement de la thermodynamique est intimement lié à la réflexion sur les méthodes employées en physique. Parallèlement à l'émergence de la mécanique statistique, la fin du 19^{ème} siècle va voir deux visions se confronter. La première, phénoménologique, se base sur une représentation continue de la matière et aborde les problèmes de manière macroscopique. La seconde se base sur une discrétisation de la matière et a recours à la statistique. Alors que les défenseurs de l'énergétisme opposeront ces points de vue, certains comme les fervents de l'atomisme, vont considérer ces visions comme complémentaires. D'ailleurs c'est par le biais de l'un deux que l'énergétisme va en définitive voir le jour.

En effet, l'apport de Rankine va au-delà de sa contribution à la théorie cinétique des gaz. Dans un article intitulé *Outlines of the Sciences of Energetics*, publié dans *The Edinburgh New Philosophical Journal* en 1855, Rankine va proposer une vision originale de la physique. Ce point de vue, fortement influencé par les idées d'Helmholtz, sera un point de départ de la pensée énergétiste qui émergera dans les années 1880.

Aussi, Rankine souhaite établir une généralisation d'un concept que l'on retrouvera dans toutes les hypothèses de la physique, comme la mécanique, la théorie ondulatoire *etc.* évitant, comme il le suggère, de s'égarer dans de fausses hypothèses, comme celle de l'existence du calorique. Il substitue alors aux notions courantes de forces mécaniques, chaleur, lumière, électricité *etc.* une grandeur générale : l'énergie qu'il classe en deux catégories ; l'énergie actuelle et l'énergie potentielle pour lesquelles une inter-conversion est complètement acceptable.

a. Les contributions Duhem et de Oswald

L'approche que propose Pierre Duhem (1861-1916), au début du 20^{ème} siècle, est similaire à celle de Rankine dans la mesure où il estime que les théories physiques peuvent se réduire à un ensemble restreint de principes. Duhem cherche à remplacer l'approche mécanique pure de la physique par une énergétique nouvelle dans laquelle l'ensemble des branches de la physique peuvent se fondre. Pour Duhem, c'est la thermodynamique qui doit jouer ce rôle primordial car

¹²¹ Selon le théorème de l'équipartition de l'énergie, chaque degré de liberté de chacune des molécules d'un système a une même énergie. Or, pour rendre compte du rapport des capacités thermiques à pression et à volume constants, Boltzmann est obligé d'admettre que les molécules diatomiques n'ont pas sept mais uniquement cinq degrés de liberté.

elle rassemble une quantité de caractéristiques du corps (état physique, combinaison chimique, aimantation...), ainsi énonce-t-il dans son *Traité d'énergétique* de 1911 :

« *Le code des lois générales de la physique est connu aujourd'hui sous deux noms : le nom de Thermodynamique et le nom d'Energétique.* »¹²²

En outre, selon Duhem, il serait « *vain et illusoire* » de chercher une quantité analogue à l'entropie dans les exemples fournis par la mécanique. Duhem vise directement par ce constat les physiciens qui cherchent à réduire la thermodynamique à la mécanique. Dans un article consacré à la méthodologie scientifique publié en 1892, *Quelques réflexions au sujet des théories physiques*, Duhem illustre ainsi les limites d'une méthode qui repousse toute théorie non mécanique : « *prenez [un] artiste, à qui vous interdisez tout autre procédé que le trait, et demandez-lui de rendre la couleur de l'objet qu'il a devant les yeux : il ne pourra le faire. N'est-ce pas pour une raison analogue que les théories mécaniques les plus complexes n'ont pu, jusqu'ici, rendre un compte satisfaisant du principe de Carnot ? Aussi, bien loin que la théorie mécanique nous apparaisse comme la théorie idéale, nous la regardons comme une théorie gênée par des entraves qui lui imposent une forme étriquée et parfois même rendent son développement impossible.* »¹²³ Aussi, Duhem considère-t-il que l'entropie, n'est pas susceptible d'être symbolisée par une combinaison, même très complexe, des seuls concepts mécaniques. On voit donc s'affirmer chez Duhem une hostilité à l'égard des théories qui cherchent à réduire les phénomènes physiques aux mouvements moléculaires. Ainsi la théorie des potentiels thermodynamiques développée par Gibbs semble suggérer une alternative à ces hypothèses mécaniques en privilégiant une description macroscopique et globale des phénomènes, ce qui implique accessoirement une approche plus mathématique et plus abstraite. Dans la suite de ses recherches, Duhem, pour valoriser cette approche, décide de la soumettre aux diverses applications de la physique et de la chimie. Mais il échouera néanmoins à tirer de ces convictions des lois générales de toutes ces branches.

L'énergétisme est également porté par Ernst Mach (1838-1916) ou encore par Wilhelm Ostwald (1853 -1932). Ce dernier estime notamment nécessaire de brider l'imagination créatrice des théoriciens¹²⁴ en la soumettant aux seules phénomènes sensibles. Aussi pour Ostwald, l'énergie est un invariant de l'Univers, régissant l'ensemble des phénomènes physiques ; pour Ostwald tout est énergie. Dans son article paru en 1895, *La déroute de l'atomisme contemporain*, Ostwald défend l'idée que le modèle mécanique et atomiste est un échec et est en contradiction avec des vérités universellement acceptées :

¹²² *Traité d'Energétique ou thermodynamique générale*, Pierre Duhem, 1911, Citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p. 369

¹²³ (Duhem, 1892) pp. 156 –157.

¹²⁴ Ils vont ainsi à l'encontre de la pensée de Boltzmann qui propose des hypothèses expliquant les phénomènes avant d'en déduire les conséquences testables empiriquement.

« L'erreur saute aux yeux dans le fait suivant : dans toutes les équations mécaniques, le signe de la variable représentant le temps peut changer ; en d'autres termes, les phénomènes de la mécanique rationnelle peuvent suivre le cours du temps ou le remonter. Dans le monde de la mécanique rationnelle, il n'y a ni passé ni avenir, au même sens que dans le nôtre : l'arbre peut redevenir rejeton et graine ; le papillon, chenille, le vieillard, enfant. Pourquoi ces faits ne se produisent-ils pas dans la réalité ? La théorie mécanique ne l'explique pas ; et en vertu même des propriétés des équations, elle ne peut l'expliquer. Le fait que, dans la Nature réelle, les phénomènes se sont pas réversibles, condamne sans appel le matérialisme physique »¹²⁵

Ainsi la science de l'énergie de Ostwald va au-delà de celle de Duhem car elle réfute la réalité même de la matière : « la matière est une invention, assez imparfaite d'ailleurs [...] la réalité effective, c'est-à-dire celle qui fait effet sur nous, c'est l'énergie. »¹²⁶

b. Le bouleversement du début du 20^{ème} siècle

L'énergétisme et l'anti-atomisme comptent de nombreux fervents parmi les scientifiques car certaines observations et certains phénomènes ne semblent pas être en faveur de la composition microscopique de la matière.

Pourtant, à la fin des années 1880, l'interprétation du mouvement brownien¹²⁷ apporte un argument majeur en faveur de la théorie atomiste de la matière. En effet, les mouvements incessants des particules qui n'empruntent aucune énergie au milieu extérieur peut s'expliquer par le fait d'une conversion de chaleur en mouvement et inversement. Mais, la renaissance perpétuelle de ce mouvement à partir d'une seule source de chaleur met à mal le principe de Carnot. Ainsi Jean Perrin¹²⁸ (1870-1942) s'exprime dans son article *Mouvement Brownien et réalité moléculaire* de 1909 :

« Voici une agitation qui se poursuit indéfiniment sans cause extérieure. Il est clair que cette agitation n'est pas en contradiction avec le principe de la conservation de l'énergie. Il suffit que tout accroissement de vitesse d'un grain s'accompagne d'un refroidissement du fluide en son voisinage immédiat, et de même toute diminution de vitesse d'un échauffement local, sans perte ni gain d'énergie. Nous nous apercevons simplement que l'équilibre thermique n'est, lui aussi,

¹²⁵ *La déroute de l'atomisme contemporain*, Wilhelm Ostwald, 1895, citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p.327

¹²⁶ *La déroute de l'atomisme contemporain*, Wilhelm Ostwald, 1895, citation extraite de (Locqueneux, 2009a) p.329

¹²⁷ Le mouvement brownien, nommé ainsi par le naturaliste Robert Brown (1773-1858), en 1827, traduit le fait que des parcelles en suspension s'agitent d'autant plus vivement qu'elles sont plus petites.

¹²⁸ Perrin s'appuie notamment sur les travaux et interprétation de Louis Georges Gouy (1854-1926) en 1888.

qu'un équilibre statistique. Mais, on doit observer, et cette idée très importante est encore due à M Gouy, que le mouvement brownien n'est pas conciliable avec les énoncés tranchants que l'on donne souvent au principe de Carnot. »¹²⁹

Seule l'analyse à l'échelle microscopique et le recours à la statistique permettent d'expliquer que les éléments de taille les plus infime se meuvent car aucune interaction à cette échelle peut y être parfaitement compensée. Les travaux de Perrin, puis ceux de Albert Einstein (1858-1920), sur les suspensions de particules dans les fluides au repos apparaissent ainsi comme une conséquence de la théorie cinétique moléculaire.

« Mais tant qu'on se bornait à faire intervenir des molécules invisibles il demeurait possible, en niant leur existence, de croire à la rigueur parfaite du principe de Carnot. [...] L'importance pratique du principe de Canot n'est d'ailleurs pas atteinte, et je crois n'avoir pas besoin d'affirmer longuement qu'il serait imprudent de compter sur le mouvement brownien pour élever les pierres destinées à construire une maison. Mais la compréhension de ce principe si important devient par-là plus profonde ; on saisit mieux comment il est lié à la structure de la matière, et l'on conçoit qu'on pourrait l'énoncer en disant que la coordination spontanée de mouvements moléculaires devient d'autant moins probable qu'elle porte sur un plus grand nombre de molécules et s'étend sur une durée plus grande.»¹³⁰

Une explication qui n'aurait pas fait appel aux atomes aurait été extrêmement compliquée. Aussi, en 1909, Ostwald lui-même admet que Jean Perrin a apporté la preuve expérimentale de la structure atomique de la matière.

Les multiples expériences qui se déroulent au cours du 20^{ème} siècle vont mettre clairement en évidence l'existence des atomes. Néanmoins, l'empreinte de la thermodynamique phénoménologique reste présente et les querelles entre atomistes et énergétistes se poursuivent en ce début du 20^{ème} siècle. La thermodynamique des principes, grâce à un formalisme développé va rester, comme nous allons le voir, une approche privilégiée dans l'enseignement de cette science alors que s'amorce une profonde réforme de l'éducation.

¹²⁹ (Perrin, 1909) p. 11

¹³⁰ (Perrin, 1909) p. 12

CHAPITRE 2

LA THERMODYNAMIQUE DANS LA REFORME DE L'ENSEIGNEMENT DE 1902

A l'aube du 20^{ème} siècle, une réforme importante du système éducatif français va avoir lieu. Elle marquera profondément l'enseignement par la structure organisationnelle qu'elle impose mais aussi par les orientations pédagogiques qu'elle suggère. Dans ce chapitre, nous nous proposons de donner les éléments pour comprendre en quoi cette réforme constitue un tournant majeur dans l'histoire de l'éducation française. En outre, il s'agira de montrer comment les concepts de la thermodynamique y sont présentés. Pour cela nous analyserons les programmes et manuels des classes allant de la seconde aux classes préparatoires.

Mais avant cela, il nous est paru nécessaire de faire un bref rappel sur l'état de l'enseignement et notamment celui de physique avant la réforme de 1902.

I. L'ENSEIGNEMENT AVANT LA REFORME DE 1902

Les sciences physiques ont été introduites assez tardivement dans l'enseignement français. En effet, on ne trouve pas trace d'un enseignement de la physique dans les écoles avant le 17^{ème} siècle. A une époque où, après Descartes et Newton, la physique expérimentale, popularisée par l'abbé Nollet (1700-1770), se répandait dans les salons, la science du temps pénètre difficilement dans les universités françaises où règnent les études classiques ; les théories de Descartes, puis celle de Newton sur le mouvement et la gravitation supplantent difficilement la scolastique d'Aristote dans l'enseignement universitaire des 17^{ème} et 18^{ème} siècles. Cet état de fait s'explique par les vives oppositions des défenseurs des *humanités classiques* au nom de la culture. Ils ont toujours élevé

de solides barrières contre la pénétration dans l'enseignement de disciplines dites *modernes*, telles les langues vivantes ou les sciences.

Les idées nouvelles relatives à une éducation plus utilitaire et plus tournée vers les sciences s'incarnent finalement dans les réalisations de la révolution de 1789. Après cette date, l'enseignement scientifique subit diverses éclipses selon les régimes politiques au pouvoir. Cependant, les variations observées ne dépendent pas uniquement des oscillations politiques, la querelle des « Anciens » et des « Modernes » est toujours vivace et se ranime périodiquement. Finalement, l'université napoléonienne, d'où les institutions scolaires sont issues, faisait à l'enseignement des sciences une place, malheureusement, assez réduite.

Mais, les grands changements sociaux du 19^{ème} siècle en Europe ne peuvent manquer d'avoir des répercussions sur les systèmes éducatifs. La révolution industrielle amorcée dès la fin du 18^{ème} siècle entraîne peu à peu la spécialisation des professions et leur multiplication, elle appelle des remaniements importants dans les structures éducatives et la formation de la jeunesse. Cependant, comme nous allons le voir, la science enseignée reste en décalage par rapport à la science savante.

1. Science savante et science enseignée

A la fin du 19^{ème} siècle, l'organisation de la recherche scientifique est en pleine mutation. Le savant non salarié, travaillant seul dans son cabinet privé laisse petit à petit place à des équipes dans des laboratoires d'enseignement et de recherche financés en partie par les Etats. Ils apparaissent d'abord en Allemagne puis progressivement dans le reste de l'Europe¹³¹.

Comme l'a montré Nicole Hulin dans son article de 1997¹³², un décalage se crée entre la science savante des laboratoires et la science enseignée dans les premier et second cycles mais également dans les programmes des concours comme celui de l'agrégation. Ce décalage est d'autant plus marqué car un intermédiaire existe entre les deux mondes : le programme officiel. Celui-ci impose les bornes et définit les grandes lignes de l'enseignement qui doit alors être dispensé. Ces programmes élaborés par des savants, des inspecteurs généraux, des membres de comités scientifiques *etc.* deviennent alors le reflet d'une science particulière parfois partie prenante et en décalage vis-à-vis des concepts introduits.

Ce décalage se justifie en outre par les objectifs de ces deux sciences : si la démarche importe peu dans l'élaboration de la science pourvu que celle-ci progresse, il en est différemment

¹³¹ En 1871, Maxwell devient professeur à Cambridge et a pour tâche de construire et de gérer le premier grand laboratoire de Physique expérimental du Royaume Uni : le Laboratoire Cavendish.

¹³² *Décalages entre science enseignée et science savante : la physique en France*, (Hulin, 1997)

dans l'enseignement de celle-ci puisque la méthode est aussi importante que le contenu. Ainsi, en 1873 Éleuthère Mascart (1837-1908) dans *Les théories chimiques dans l'enseignement* expose :

« Autant le savant doit être libre d'entraves dans ses spéculations et ses hypothèses autant le professeur doit être circonspect quand il s'adresse à de jeunes intelligences. On serait mal venu de reprocher à un inventeur les méthodes qu'il a suivies et les idées préconçues qui l'ont guidées dans ses recherches ; ce qui importe, c'est le progrès de la science, et l'on pourrait citer les plus brillantes découvertes obtenues par des théories absolument condamnées. Le contraire est vrai pour l'enseignement : la méthode y importe autant que la science elle-même. »¹³³

Comme la thermodynamique s'est élaborée à travers le second et le premier principes, il est donc important de savoir comment les concepts qui y sont rattachés comme la température, la chaleur ou l'énergie *etc.* ont été introduits dans l'enseignement.

2. L'enseignement de la thermodynamique avant 1902

Dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, la thermodynamique, comme nous l'avons précédemment montré, s'élabore et de nombreux résultats s'accumulent malgré la persistance d'au moins deux points de vue sur la nature de la chaleur. Pourtant, dans l'enseignement, c'est l'hypothèse du calorique qui reste privilégiée. René Just Haüy (1743-1822), professeur au Muséum d'Histoire naturelle de Paris, justifiait ce choix dans son traité au début du 19^{ème} siècle par le fait que l'hypothèse du calorique est « la plus propre à aider la conception des phénomènes et plus commode à les exprimer »¹³⁴, sans pour autant en être totalement convaincu : « Le calorique n'est-il que l'effet d'un mouvement intestin en vertu duquel les molécules des corps soient sollicitées à s'écarter ou à se rapprocher les unes des autres, selon les circonstances ? Ou bien est-ce une matière réellement existante qui écarte les mêmes molécules, ou leur permette de se rapprocher, suivant que sa quantité augmente ou diminue dans les corps ? Sans rien décider entre ces deux opinions, nous emploierons le langage qui est conforme à la seconde »¹³⁵. C'est ce choix qui reste privilégié dans la seconde moitié de ce siècle car ne fait pas appel à la description de la matière qui n'est pas « dans l'air du temps » à cette époque.

a. L'introduction de l'équivalent mécanique de la chaleur dans les programmes

¹³³ *Les théories chimiques dans l'enseignement*, Revue des cours scientifiques, E. Mascart, 1873, citation extraite de (Hulin, 1997) pp.2-3

¹³⁴ (Haüy, 1806) p.80

¹³⁵ (Haüy, 1806) p.80

Entre 1852 et 1864, Emile Verdet (1824-1866) alors maître de conférences de physique à l'École normale supérieure, publie dans les *Annales de chimie et de physique* un certain nombre de résumés des principaux articles scientifiques parus dans les journaux étrangers. Il porte notamment à la connaissance des scientifiques français, les travaux de Joule de 1843 ainsi que le mémoire de Clausius de 1850. Dans une correspondance entre Tait et Verdet datant du 6 août 1866, on constate l'admiration qu'éprouve Verdet pour les travaux de Joule et de Mayer et affirme que son travail de retranscription correspond parfaitement aux idées de Joule :

« ... dès 1852, lorsque j'avais inséré dans les *Annales de Chimie et de physique*, un extrait du premier travail de Joule, j'avais terminé cet extrait par une traduction du passage dont il s'agit. Au reste une lettre que M Joule voulut bien m'écrire lorsque je lui envoyai il y a deux ans un tirage à part de mes *Leçons* me fait croire qu'en somme il a été satisfait de la manière dont j'ai parlé de ses travaux. Personne ne les admire plus que moi et je n'hésiterais pas à signer tout ce que vous en dites de ses articles. Permettez-moi après cette déclaration de conserver mon opinion sur Mayer et croire qu'une aussi grande découverte que celle de la Conservation de l'Énergie peut suffire à la gloire de deux [...] inventeurs. »¹³⁶

En février 1862, Verdet présente pour la première fois dans la sphère scientifique française, la théorie mécanique de la chaleur devant la Société chimique de Paris et diffuse ainsi les nouvelles théories physiques sur la thermodynamique de Joule, Clausius, Helmholtz et Thomson. Devenu professeur à la Sorbonne, il y enseigne cette théorie au cours des années 1864 et 1865, en présentant notamment les expériences et les résultats de mesures de Joule avec une grande précision.

D'autres traducteurs et écrivains scientifiques participent à la diffusion des avancées anglaises et allemandes. Aussi François Moigno, dit l'abbé Moigno (1804-1884), publie en 1864 une traduction des leçons du physicien irlandais John Tyndall¹³⁷ (1820-1893). Puis en 1874, le belge, François-Jacques-Philippe Folie (1833-1905) publie la traduction française d'une série de mémoires de Clausius, parus de 1850 à 1865 et rassemblés dans un ouvrage intitulé *Théorie mécanique de la chaleur*.

Aussi la réécriture des programmes en 1874, doivent nécessairement tenir compte de ces travaux. Il n'est plus question comme dans les programmes de 1852¹³⁸, de traiter de la chaleur

¹³⁶ Lettre de correspondance extraite de (Knott, 1911) p.210

¹³⁷ Tyndall y présente la chaleur comme un mode de mouvement.

¹³⁸ La réforme de 1852, proposée par Hippolyte Fortoul (1811-1856), ministre de Louis-Napoléon (1808-1873), instaure la bifurcation des études dans le secondaire. Il existe alors deux filières, une littéraire (dit classique) et une « scientifique » (futur enseignement moderne) de durée équivalente et qui s'achèvent toutes deux par un baccalauréat de lettres ou de sciences. La tentative est un échec, dès 1859 la bifurcation est remise en cause devant l'hostilité quasi générale des parents et des enseignants ; la société est mal préparée à cette innovation et en 1863 l'enseignement littéraire fait son retour. De multiples plans d'études

dans la rubrique des « *fluides impondérables* ». Aussi, voit-on apparaître dans l'enseignement secondaire à la suite de la section « chaleur » qui regroupe la thermométrie, la calorimétrie et les changements d'état, une partie consacrée à l'équivalent mécanique de la chaleur. Les instructions jointes aux programmes officiels proposent :

« *Quelques lacunes ont été comblées [...] on a introduit dans le cours la notion de l'équivalent mécanique du travail et de la chaleur ; c'est là un fait d'une telle importance dans toutes les sciences qu'il est impossible de ne pas lui donner une place dans l'enseignement. [...] La notion d'équivalent mécanique de la chaleur se trouve [...] introduite pour la première fois dans l'enseignement. Cette addition est indispensable.* »¹³⁹

On constate pourtant que l'apparition de concepts nouveaux dans les programmes se fait généralement après leur introduction dans les ouvrages d'enseignement. On peut le voir par exemple à travers le *Traité de physique*, de Adolphe Ganot (1804-1887). L'ouvrage de Ganot a eu un succès considérable¹⁴⁰ en s'adressant à un large public et en proposant différents niveaux de lecture. La particularité de Ganot est qu'il n'a *a priori*, jamais fait de recherches lui-même ; aucun de ses ouvrages ne présente de résultats de ses propres travaux et Ganot présente volontiers les sources bibliographiques qui lui ont servies d'inspiration¹⁴¹. Aussi son œuvre, régulièrement actualisée, se veut représentative des courants de pensée de chaque époque à laquelle le tirage est fait. A travers les éditions successives de son ouvrage, il est possible de suivre l'évolution de l'interprétation du concept de chaleur. En 1866, la chaleur est présentée dans la partie intitulée « *Calorique* ». Mais dans la 14^{ème} édition de 1870, Ganot signale que :

« *Plusieurs théories nouvelles ont été introduites. La théorie dynamique de la chaleur a été exposée sous forme succincte et élémentaire. L'hypothèse des fluides impondérables, abandonnée de toutes parts, a été remplacée par celle d'un fluide unique. C'est une hypothèse substituée à une autre, il est vrai ; mais l'hypothèse nouvelle est plus simple et représente les idées dominantes aujourd'hui. Ajoutons que ces modifications ont été présentées avec la plus grande réserve, et de façon à ne pas troubler les habitudes de l'enseignement*¹⁴² »¹⁴³.

Dans l'édition de 1872, soit deux ans avant la réforme de 1874, la partie « *calorique* » devient, « *Chaleur* » avec un paragraphe supplémentaire intitulé « *Historique de la théorie*

se succéderont jusqu'à la fin du siècle, comme la réforme de 1880 qui introduit les sciences du cours préparatoire au baccalauréat, mais sur les 22 heures réglementaires seules 3 à 4 leur sont consacrées.

¹³⁹ Citation extraite de (Hulin, 1997) p.11

¹⁴⁰ L'œuvre de Ganot est traduite dans de nombreuses langues et sert à l'enseignement de la physique dans le monde entier. En 1882, Ganot cède son œuvre à Hachette, après 30 ans d'exploitation, 18 éditions et 204 000 exemplaires vendus. La collection sera alors reprise par Georges Maneuvrier (1849-1933), Maître de conférence adjoint à la faculté des sciences de Paris.

¹⁴¹ (Langlois, 2006) p.3

¹⁴² Habitude qui consiste à accorder la chaleur à l'hypothèse du calorique.

¹⁴³ *Traité de Physique*, Ganot 1870, citation extraite de (Langlois, 2006) p.7

dynamique de la chaleur ». Cette référence à la théorie mécanique de la chaleur est également présente chez d'autres auteurs. Aussi dans son cours de physique de 1859, Jules Jamin (1818-1886) fait clairement référence au lien entre la chaleur et le travail :

« *La chaleur se transforme en travail et réciproquement [...] Il faut par conséquent que pour une calorie détruite ou créée, il y ait un nombre constant de kilogrammètres créés ou détruits. Ce nombre est ce que l'on nomme l'équivalent mécanique de la chaleur [...] Les expériences suivantes sont dues à M. Joule.* »¹⁴⁴

Mais l'approche du concept de chaleur dans les ouvrages de thermodynamique n'est pas unique. Aussi, dans la description que donne Jamin de la chaleur dans l'introduction de son cours, on peut lire :

« *Les sensations que nous éprouvons nous font voir que les corps, sans changer de nature, peuvent devenir chauds ou froids. Ils se modifient par conséquent sous l'influence d'une cause spéciale. Sans nous préoccuper aujourd'hui de cette cause et sans rien préjuger sur sa nature, nous lui donnons un nom, nous l'appelons chaleur et, pour nous conformer au langage adopté, nous disons qu'elle s'accumule dans les corps quand ils s'échauffent et qu'elle les abandonne quand on les refroidit. Puisque les corps reçoivent ou perdent de la chaleur suivant les circonstances et que leurs conditions thermiques changent d'un moment à l'autre, on désigne en général par le mot température l'état calorifique essentiellement variable avec le temps mais déterminé à un moment donné, dans lequel se trouve le corps* »¹⁴⁵

Aussi, Jamin utilise-t-il un vocabulaire qui laisse suggérer que la chaleur est quelque chose qui s'accumule dans le corps, comme le ferait le calorique.

Puis, plus tardivement, Jamin aborde le concept de chaleur à travers une description microscopique en présentant la chaleur comme une vibration :

« *[la chaleur] pénètre dans les corps, [sous forme de] vibrations auxquelles prennent part les molécules pondérables [...] La quantité de cette chaleur qu'un corps absorbe peut donc être considérée comme une somme de forces vives, [qui] se transforme en travail mécanique ou inversement, c'est-à-dire que cette somme de forces vives d'une infinité de molécules se transporte aux mouvements d'ensemble d'un organe mécanique ou inversement.* »

Aussi coexistent dans l'enseignement la matérialité de la chaleur et sa description en termes de vibrations. Comme le souligneront en 1894, Augustin Boutan (1820-1900) et Joseph-Charles d'Almeida (1822-1880) dans leur *Traité de physique*, cette persistance du langage ancien au côté du langage moderne est récurrente dans la science : « *depuis le jour où ces deux hommes de génie [Lavoisier et Laplace] ont écrit ces mots*¹⁴⁶, le langage adopté par les savants n'a cessé de

¹⁴⁴ (Jamin, 1859) p.436

¹⁴⁵ (Jamin, 1859) pp.1-2

¹⁴⁶ Boutan et d'Almeida font alors référence au *Mémoire sur la chaleur* de Lavoisier et Laplace de 1780.

concorde avec l'hypothèse de matérialité du calorique. On parle de chaleur absorbée, de chaleur latente, de chaleur dégagée. La langue ne s'est pas encore mise en harmonie avec les idées. »¹⁴⁷

b. L'introduction de l'énergie dans les programmes

Dans les vingt-cinq ans qui suivent, la théorie mécanique de la chaleur reste présente dans l'enseignement avec un emplacement et un développement plus ou moins importants selon les filières. Le terme *énergie* quant à lui met davantage de temps à apparaître dans les programmes. Il est présenté pour la première fois, en classe de philosophie, le 22 janvier 1885. Puis en 1891, le principe de conservation de l'énergie est introduit à la suite de l'équivalent mécanique de la chaleur en classe de mathématiques élémentaires.

Pourtant, là encore le programme ne fait qu'officialiser une pratique déjà répandue dans les ouvrages d'enseignement. En effet, dans le *Traité de Physique élémentaire* de 1881 de Charles-Alfred Angot (1848-1924), la conservation de l'énergie y est présentée comme un principe fondateur de la physique moderne, au même titre que la conservation de la masse :

« On peut formuler pour l'énergie une loi analogue à celle que Lavoisier a indiqué pour la matière. [...] Telle est la loi de la conservation de l'énergie qui forme la base de la physique moderne et qui permet seule d'en relier les différentes parties. C'est une notion capitale sur laquelle nous aurons fréquemment à revenir pour la préciser et en montrer toutes les conséquences [...] la physique étudie l'énergie et les phénomènes qui accompagnent les transformations. »¹⁴⁸

Ce concept d'énergie, comme nous le verrons plus tard, va notamment permettre d'appréhender différemment le concept de chaleur dans l'enseignement. Mais, il sera dans le même temps, un point délicat à introduire en thermodynamique.

C'est à partir de l'ensemble de ces éléments que nous allons approfondir nos recherches sur l'enseignement de la thermodynamique au cours du 20^{ème} siècle. Le point de départ est la rénovation de 1902 née de nombreux débats qui, comme nous allons le voir dans le prochain paragraphe jalonnent la dernière décennie du siècle. Des pédagogues réformateurs vont alors suggérer de nouvelles méthodes d'enseignement fondées sur l'approche expérimentale au détriment du formalisme théorique et du travail de mémorisation pure. L'importante réforme de 1902, constituera pour l'enseignement de la physique un tournant majeur dont nous allons présenter le contenu.

¹⁴⁷ *Cours élémentaire de physique suivi de problèmes*, Boutan et d'Almeida, 1874, citation extraite de (Hulin, 1997) p.11

¹⁴⁸ (Angot, 1881) pp.6-7

II. LE CONTEXTE DE LA REFORME DE 1902

1. La commission d'enquête Ribot

a. Ordre primaire et ordre secondaire

A la fin du 19^{ème} siècle, l'enseignement n'est pas divisé comme aujourd'hui en cycles mais en *ordres* : l'ordre primaire et l'ordre secondaire. L'ordre primaire est l'école du peuple. L'élève y reçoit un enseignement lui permettant d'arriver rapidement à la vie active vers douze ou treize ans. L'ordre secondaire payant, est dispensé dans les lycées ou les collèges.¹⁴⁹ Il est réservé aux élèves issus du monde des notables, grands ou petits, et les débouchés sont naturellement le service de l'Etat, l'armée, la magistrature, la médecine, le professorat *etc.* L'élève y suit un enseignement élémentaire et primaire puis un enseignement secondaire à proprement dit qui conduit au diplôme du *baccalauréat*. Cet enseignement doit donner un savoir et un savoir-faire important dans une perspective culturelle : « les humanités » assurant une certaine unité de pensée de classe ; mais également, utilitaire : les lycées doivent préparer l'entrée à l'université et à quelques grandes écoles.

Néanmoins, aux « meilleurs élèves » de l'enseignement primaire est proposée l'entrée dans les Ecoles Primaires Supérieures (E.P.S.) ou dans les Cours Complémentaires (C.C.). Le cursus de ces voies d'enseignement se termine soit par le *Brevet élémentaire* qui permet l'accès aux carrières de base de l'administration ainsi qu'à l'Ecole Normale d'Instituteurs soit par le *Brevet supérieur*¹⁵⁰, permettant l'accès aux Écoles Normales primaires supérieures. L'objectif de cette filière est un enseignement utilitaire permettant l'accès à une classe sociale plus élevée.

En 1898, la Commission de l'enseignement de la Chambre des députés, présidée par Alexandre Ribot (1842-1923), lance une grande enquête sur l'état de l'enseignement secondaire des garçons¹⁵¹ qui ne représente alors que 6% de la population masculine scolarisable à ce niveau¹⁵².

La commission est notamment créée suite à l'inquiétude de plus en plus présente chez les députés, de la concurrence de l'enseignement privé (dont le nombre d'établissements correspond au double du public, 328 contre 761). En effet, depuis quelques années, le nombre des élèves inscrits dans les établissements libres ne cesse d'augmenter alors que ceux du public diminuent. Mais, comme l'a montré Antoine Prost dans son analyse de 2008, *De l'enquête à la réforme. L'enseignement*

¹⁴⁹ La distinction entre collège et lycée ne dépend pas au début du siècle du niveau d'enseignement dispensé mais de leur dépendance administrative : les lycées dépendent de l'état, les collèges des villes.

¹⁵⁰ Le Brevet supérieur est aussi l'examen final des lycées de jeunes filles qui n'ont pas officiellement le droit de préparer au baccalauréat jusqu'en 1924.

¹⁵¹ L'enseignement des filles étant renvoyé à plus tard

¹⁵² Soit environ 140000 élèves (Prost, 2008) p.32

secondaire des garçons de 1898 à 1902, les résultats du rapport Ribot vont présenter des résultats non attendus. Ces conclusions, comme nous allons le voir, vont conduire à une réforme profonde de l'enseignement.

b. Un enseignement secondaire en crise

Pour élaborer son rapport, la commission Ribot s'est appuyée sur des statistiques détaillées des effectifs de l'enseignement secondaire aussi bien public que privé. La commission a lancé également une grande enquête sur le régime des lycées et collèges, l'éducation, l'organisation de l'enseignement secondaire et ses rapports avec l'enseignement primaire, *etc.*

Dans une première analyse, la commission met en avant l'importance de l'enseignement catholique. Les raisons de cet avantage sont *a priori*, multiples : idéologique¹⁵³, politique, religieux, *etc.* Mais la question du suivi des élèves semble être une raison majeure de la valorisation de l'enseignement libre. En effet, dans l'enseignement public, les enseignants qui se contentent souvent de dispenser leur cours, chargent les répétiteurs d'accompagner les élèves. Or, ces répétiteurs ne se sentent pas suffisamment considérés et délaissent leur travail. Aussi, les internats des établissements privés sont souvent préférés aux internats publics.

Mais, ce que pointe le rapport Ribot est la concurrence que font les E.P.S. à l'enseignement secondaire, notamment dans les collèges auxquels ils sont souvent associés. Ce constat est une conclusion qui n'était pas attendue initialement par les députés. Pourtant, c'est cet aspect qui va bousculer l'enseignement secondaire français.

Tout d'abord, une partie de la bourgeoisie préfère inscrire leurs enfants dans les E.P.S., car les études y sont gratuites, relativement courtes et permettent une entrée rapide dans la vie active. En outre, les enseignements du secondaire ne semblent plus répondre aux besoins sociaux réels et les critiques s'élèvent de toute part, comme celles de Jules Lemaitre¹⁵⁴ (1853-1914), lors d'une conférence à la Sorbonne le 5 juin 1898 : « *J'y ai bien réfléchi, et depuis des années; j'ai observé les adolescents et les jeunes gens de ma connaissance; je me suis examiné moi-même pour savoir ce que je devais au grec et au latin : et je suis arrivé à cette conviction, que l'enseignement des langues mortes, dans les conditions où il est donné, est complètement inutile aux neuf dixièmes des jeunes Français qui le reçoivent.* »¹⁵⁵

¹⁵³ « *Dans la bourgeoisie, il semble être de mode et de bon ton de mettre ses fils dans les écoles libres ; on croit se donner ainsi un cachet d'aristocratie et des apparences de fortune. On a l'air de reprocher à nos établissements secondaires de s'être trop démocratisés* » peut-on lire dans le rapport d'enquête de la commission Ribot (Prost, 2008) p.45

¹⁵⁴ Jules Lemaitre, normalien démissionnaire de l'enseignement, a notamment été entendu par la commission Ribot. Il a été l'un de ceux qui a proposé la plus vive critique de l'enseignement pré-réforme de 1902.

¹⁵⁵ (Lemaitre, 1898)

L'enseignement classique paraît ainsi en décalage dans un monde qui avance vite et où la science joue un rôle clé. Les humanités « classiques » devraient laisser place à des humanités « modernes » :

« *Tout a changé ; les découvertes de la science appliquée ont profondément modifié les conditions de la vie pour les particuliers et pour les peuples, et la face même du monde; le règne définitif de l'industrie, du commerce et de l'argent est advenu; nous sommes une société démocratique et industrielle, menacée ou plutôt à demi ruinée déjà par la concurrence de puissantes nations : et les enfants de notre petite bourgeoisie, et nombre d'enfants du peuple, passent huit ou dix ans à apprendre — très mal — les mêmes choses que les Pères jésuites enseignaient autrefois — très bien, — dans une société monarchique, aux fils de la noblesse, de la magistrature et des classes privilégiées.* »¹⁵⁶

L'idée logique aurait été de fusionner l'enseignement secondaire et le primaire supérieur. Mais ce n'est pas le choix que fera la commission Ribot qui souhaite renforcer l'enseignement secondaire en proposant de conserver l'enseignement classique et de créer un enseignement moderne dont le prestige serait équivalent au premier. Dans cet enseignement moderne, le latin ne serait pas nécessairement une langue obligatoire, mais les langues vivantes parlées devraient être privilégiées. En outre, pour renforcer l'ordre du secondaire vis-à-vis de l'ordre primaire, Ribot imagine la création de passerelles entre les deux ordres : « *Ce qu'il faut aussi, c'est établir une communication plus facile entre l'enseignement primaire supérieur et les classes les plus élevées de l'enseignement moderne.* »¹⁵⁷ Mais ces passages ne seront *in fine* qu'anecdotes.

2. Organisation de l'enseignement secondaire à l'issue de la réforme de 1902

Suite aux conclusions de la commission Ribot, une réforme d'ensemble voit le jour en 1902, sous l'autorité du ministre Georges Leygues (1857-1933). Elle donne à l'enseignement secondaire une organisation qu'il conservera presque sans changement pendant plus d'un demi-siècle.

La réforme de 1902 vise à modifier notamment l'enseignement secondaire par la structure des classes en différentes sections, les baccalauréats, les contenus des programmes et les méthodes d'enseignement. Les études sont ainsi divisées en deux cycles (Cf. Figure 14). Le premier cycle regroupe les classes de la sixième à la troisième et propose une section A avec latin (classique) et une section B sans latin (moderne). Le second cycle est composé des classes de seconde, de première et de terminale. Les sections sont ici au nombre de quatre, les sections A gréco-latine,

¹⁵⁶ (Lemaître, 1898)

¹⁵⁷ (Prost, 2008) p.73

B latin – langues vivantes, toutes deux menant au baccalauréat de philosophie, et les sections C latin - sciences et D sciences - langues vivantes menant au baccalauréat de mathématiques.

Néanmoins, le public visé par cette réforme reste toujours très restreint (les effectifs au début du 20^{ème} siècle se situent toujours aux environs de 140 000 élèves.¹⁵⁸)

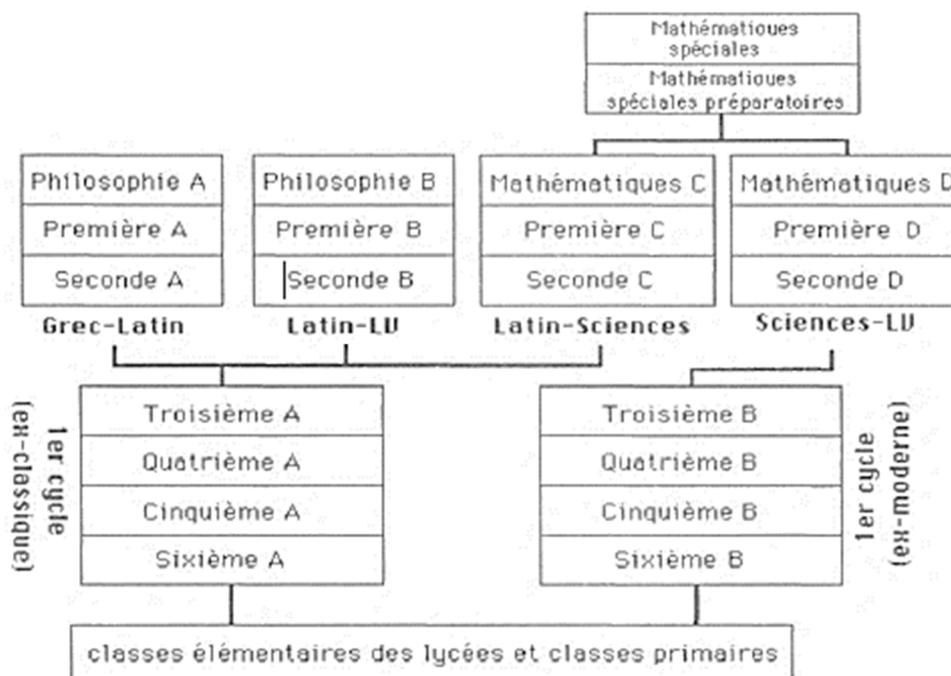


Figure 14 Organisation de l'enseignement secondaire selon la réforme de 1902¹⁵⁹

Le cycle moderne imaginé par Ribot, avec une formation centrée sur la science est ainsi créé. Dans son rapport la commission conclut : « La science a introduit une conception nouvelle du monde, une manière nouvelle d'envisager la nature, l'homme lui-même et les grands faits sociaux et, pour tout dire, une philosophie nouvelle du développement de l'humanité. C'est cet esprit qui doit être l'âme de l'enseignement moderne.»¹⁶⁰ Aussi, Ribot voit se concrétiser l'avènement des *humanités scientifiques*.

¹⁵⁸ (Belhoste, et al., 1996) p.29

¹⁵⁹ (Belhoste, 1990) p.387

¹⁶⁰ (Prost, 2008) p.74

3. L'enseignement de la physique dans la réforme de 1902

L'enseignement de la physique va être un élément important de cette réforme puisque le nombre d'heures qui lui est consacré va être significativement augmenté et son programme plus étoffé. En effet, la réforme de 1902 a pour objectif de transformer fondamentalement l'enseignement de la physique jugé démodé. Ainsi, on peut lire dans les conseils généraux du programme de seconde : « *le professeur se contentera d'exposer les faits tels que nous les comprenons aujourd'hui, sans se préoccuper de l'ordre historique. On lui demande de débarrasser l'enseignement de beaucoup de vieilleries que la tradition y a conservées : appareils surannés, théories sans intérêt, calcul sans réalité [...] l'enseignement doit être à la fois très élevé, très simple et très pratique.* »¹⁶¹. Cette remarque montre l'emprunte positiviste¹⁶² de cette réforme, en accord avec les idées d'Auguste Comte (1798-1857) : « *à mesure que la science fait des progrès l'ordre historique d'exposition devient de plus en plus impraticable, par la trop longue suite d'intermédiaires qu'il obligerait l'esprit à parcourir ; [...] de nouvelles conceptions permettent de présenter les découvertes antérieures sous un point de vue plus direct.* »¹⁶³

Les programmes de physique, dont la refonte est fortement influencée par l'Université, l'école normale supérieure et également par le directeur de l'enseignement supérieur Louis Liard (1846-1917), sont élaborés par une commission de huit membres : deux inspecteurs généraux, Jules Joubert (1834-1910) et Lucien Poincaré (1862-1920) et six enseignants universitaires : deux chimistes de la Faculté des Sciences de Paris : Albin Haller (1849-1925) et Edouard Péchard (1862-1942), quatre physiciens membres de l'enseignement supérieur : Henri Abraham (1868 – 1943), Jean Perrin et Jules Violle (1841–1923) de l'École normale supérieure et enfin Paul Janet (1823 – 1899) de la Faculté des Sciences de Paris. Cette commission nommée en février 1901, se veut efficace ; En moins d'un an la réforme est actée : elle se réunit pour la première fois en juin 1901 et les programmes sont arrêtés le 31 mai 1902, pour une mise en place dès la rentrée de 1902. Si les grands thèmes abordés dans le programme sont les mêmes, les contenus des classes de seconde et de première A et B diffèrent de ceux des sections scientifiques C et D. Il en est de même pour les classes de terminale *Philosophie* et de terminale *Mathématiques*. Avec la réforme de 1902, l'aménagement des horaires augmente la place des sciences dans le plan d'études. Le Tableau 2 rend compte de cette nouvelle répartition horaire.

¹⁶¹ (BO, 07 juin 1902), page 822

¹⁶² C'est Auguste Comte qui en est l'emblème en France. Le positivisme aura un impact important sur les savants, enseignants et hommes politiques de la III^{ème} république. Pour la pensée positiviste, la sociologie se trouve au sommet de la recherche scientifique. En outre, la seule vérité accessible l'est par les sciences. En physique et en chimie, le positivisme s'inscrit dans une démarche plus poussée que l'observation, qu'est l'expérimentation : il est essentiel de se concentrer sur le « comment » des phénomènes bien plus que sur le « pourquoi ».

¹⁶³ *Cours de philosophie positive*, 2^{ème} leçon, Comte 1830, Citation extraite de (Hulin, 1984) p.43

Classe	Sections A et B	Sections C et D
Seconde	1 heure mathématiques 1 heure Physique-chimie	5 heures mathématiques 3 heures physique-chimie 2 heures d'exercices pratiques
Première	1 heure mathématiques 1 heure physique-chimie	5 heures mathématiques 3 heures physique-chimie 2 heures d'exercices pratiques
Terminale	Classe de philosophie	Classe de mathématique
	2 heures mathématiques 3 heures physique-chimie	8 heures mathématiques 3 heures physique-chimie 2 heures d'exercices pratiques

Tableau 2 Répartition des horaires de mathématiques et de sciences physiques par classe et par semaine dans le second cycle

Contrairement au siècle précédent où la physique n'intervenait réellement que dans la classe terminale, toutes les classes à partir de la seconde reçoivent un enseignement de physique, et ceci, dans toutes les sections.

La réforme vise en outre, à renforcer l'enseignement pratique fondé sur l'expérience. Le terme « expérimental » apparaît dans le libellé même des programmes et des exercices pratiques sont prévus pour les élèves. C'est une physique inductive qui est alors recommandée, permettant d'éviter les développements mathématiques trop lourds et de recourir en priorité à l'expérience. La formalisation mathématique se limite et s'adapte à l'objet de la physique. On peut ainsi lire dans les conseils généraux liés aux programmes « évitant les développements mathématiques [... l'enseignant] utilisera fréquemment les représentations graphiques, non seulement pour mieux montrer aux élèves l'allure des phénomènes, mais pour faire pénétrer dans leur esprit les idées si importantes de fonction et de continuité. »¹⁶⁴ C'est un premier essai de rapprochement des deux disciplines que sont la physique et les mathématiques au service de chacune d'entre elles. L'utilisation de représentation graphique apparaît également comme un outil nouveau dans le cours de physique et transforme la description du phénomène en une mise en relation des faits. Ainsi, la réforme de 1902 a donc cet objectif de rectifier le système d'études, dominé à la fois par un enseignement littéraire et par un excès de formalisme dans l'enseignement des mathématiques. En outre, il apparaît à cette époque nécessaire de former des spécialistes en sciences pour répondre à la demande de l'enseignement supérieur et de l'industrie, tous les deux en plein essor.

Mais le but de l'enseignement secondaire reste la formation générale de l'élève en le préparant à la vie, non pas à la vie pratique, ni l'exercice d'un métier mais vise à lui donner

¹⁶⁴ (BO, 07 juin 1902).

principalement des qualités de méthode et de jugement, comme le souligne Liart en 1904 « *les études scientifiques doivent comme les autres, contribuer à la formation de l'homme* »¹⁶⁵. Les sciences doivent donc participer à la culture générale et doivent permettre une ouverture d'esprit aux compétences et aux méthodes scientifiques : « *nous voulons que [les élèves] soient munis de connaissances positives et qu'ils n'aient pas appris à comprendre seulement pour exprimer, mais surtout pour agir* »¹⁶⁶. Cet enseignement des réalités basé sur l'observation, l'expérimentation et le questionnement marque donc cette réforme *des humanités scientifiques*.

Qu'il s'agisse *in fine* de culture générale ou de formation scientifique, les réformateurs s'accordent sur l'importance des méthodes comme base de l'enseignement secondaire. Selon Liart, « *leur office propre est de travailler avec les moyens les mieux adaptés, à la culture de tout ce qui, dans l'esprit, sert à découvrir et à comprendre la vérité positive, observation, comparaison, classification, expérience, induction, déduction, analogie, d'éveiller et de développer ce sens des réalités et des possibles qui n'importe pas moins que l'esprit d'idéal, enfin et par la même elles deviennent de façon latente mais efficace, des maîtresses de philosophie, d'habituer les intelligences à ne pas penser par fragments mais à comprendre que tout fragment n'est qu'une partie d'un tout [...] On ne saurait donner aux sciences physiques une trop grande place dans l'éducation scientifique de la jeunesse française. Ce pays, qui est surtout de génie idéaliste et déductif, a besoin d'un grand bain de réalisme.* »¹⁶⁷.

L'organisation des connaissances dans le programme élaboré par la commission vise à encourager une appropriation progressive, notamment en ce qui concerne la physique. C'est ce que nous allons voir maintenant en s'attardant sur le contenu des programmes de 1902 notamment en ce qui concerne la thermodynamique dans le secondaire puis dans le supérieur.

¹⁶⁵ *Les sciences dans l'enseignement secondaire*, Conférences du Musée pédagogique 1904, Louis Liard, Citation extraite de (Balpe, 2013)

¹⁶⁶ *Les sciences dans l'enseignement secondaire*, Conférences du Musée pédagogique 1904, Louis Liard, Citation extraite de (Balpe, 2013)

¹⁶⁷ Citation extraite de (Belhoste, et al., 1996) p.31 et de (Balpe, 2013)

III. LA THERMODYNAMIQUE DANS LA REFORME DE 1902 DANS LE SECOND CYCLE

1. Les programmes officiels du 7 juin 1902

a. Le programme en classe de seconde

Si le mot *thermodynamique*, introduit par Thomson en 1849, est présent dans le langage scientifique et dans de nombreux ouvrages à la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle, les programmes officiels des classes du secondaire et du supérieur n'y font pas ou peu référence et préfèrent utiliser le mot “*chaleur*” ou “*énergie*” pour développer les concepts liés à la thermodynamique.

Ainsi, la réforme de l'enseignement propose le 31 mai 1902 un programme de physique qui impose le thème de *chaleur* pour les sections A et B de seconde. Il s'agit du troisième thème abordé en physique, après celui de *pesanteur* où est introduite la notion de force et d'*équilibre des liquides et des gaz* abordant les lois de Mariotte notamment. Le programme de seconde publié au BO du 7 juin 1902, fait notamment référence aux mesures de température et de « *quantité de chaleur d'origine quelconque* » par calorimétrie. Y sont définies également les notions de « *chaleur spécifique* » et de « *chaleur de fusion* ». Le programme de seconde se limite donc à la notion de température permettant les mesures de quantités de chaleur notamment lors des changements d'état. L'enseignant est d'ailleurs invité à « *fonder [l'enseignement] sur des expériences [utilisant] le moins possible d'appareils compliqués [... et à s'attacher] bien plus à l'esprit des méthodes qu'aux détails techniques* »¹⁶⁸.

Le programme des sections C et D reprend le contenu précédent mais y adjoint des « *notions très sommaires sur la conduction, l'émission et l'absorption de la chaleur, au point de vue des applications usuels* »¹⁶⁹. La différence horaire entre les sections scientifiques et non scientifiques réside dans la présence ou non d'un programme de chimie.

¹⁶⁸ (BO, 07 juin 1902)

¹⁶⁹ (BO, 07 juin 1902)

SECOND CYCLE.

SECTIONS A ET B.

PHYSIQUE. (1 heure.)

Pesanteur. — Notion de la force; direction, point d'application, intensité. — Direction de la pesanteur; centre de gravité; poids. — Indiquer que le poids d'un corps varie avec le lieu : notion de masse. — Usage de la balance : double pesée. — Poids spécifiques.

Équilibre des liquides et des gaz. — Force exercée sur une portion de paroi; pression⁽¹⁾; variation de pression avec la profondeur. — Applications et exemples. — Pression atmosphérique. — Baromètre; idée de son application à la mesure des hauteurs. — Manomètres usuels.

Principe d'Archimède; application à la mesure des volumes. — Corps flottants; aérostats.

Compressibilité des gaz⁽²⁾. — Mélange des gaz. — Principe des pompes à gaz et à liquides.

Chaleur. — Thermomètre à mercure; détermination des points fixes; notions élémentaires sur la dilatation des corps.

Quantité de chaleur; méthode des mélanges considérée comme permettant de mesurer des quantités de chaleur d'origine quelconque. — Définition des chaleurs spécifiques.

Fusion et solidification. — Point de fusion; chaleur de fusion.

Notions élémentaires sur la vaporisation des liquides; pression maxima des vapeurs; variation avec la température (représentation graphique). — Température critique; continuité de l'état liquide et de l'état gazeux. — Liquéfaction des gaz. — Ébullition. — Chaleur de vaporisation. — Principe de la machine à vapeur.

Vapeur d'eau dans l'atmosphère. — Point de rosée : sa détermination. — Brouillard; nuages.

Figure 15 Extrait du programme de la classe de Seconde A et B, 7 juin 1902

b. Le programme en classe de terminale

Les concepts de thermodynamique (le mot n'est pas cité dans le programme) sont absents des programmes de première davantage axés sur *l'optique* et *l'électricité*. Ainsi, c'est en terminale qu'ils trouvent une place mais celle-ci reste globalement restreinte vis-à-vis d'un programme de mécanique beaucoup plus étoffé.

En classe de philosophie et de mathématiques, la physique occupe le même horaire : trois heures hebdomadaires. Un thème nommé « *énergie* » est abordé à la suite de la partie consacrée à la mécanique où est notamment définie la notion de travail et sa conservation. Il n'est pourtant pas précisé que cette conservation n'a de sens que dans le cas particulier des mouvements non dissipatifs. La partie « *énergie* » se veut très large, embrassant diverses parties des sciences physiques. En effet, l'enseignant doit notamment développer les « *diverses formes d'énergie : mécanique, thermique, électrique, chimique, etc.* ». On voit ici une volonté de ramener la physique et ses différentes branches au concept fondateur de l'énergie. Sa conservation est érigée

en un principe de la physique qui s'applique ensuite aux expériences de Joule¹⁷⁰ et à l'équivalent mécanique de la chaleur. Le choix de présentation est donc clairement inversé par rapport aux programmes du siècle précédent.

Enfin, il est suggéré de présenter l'énoncé du principe de Carnot qui fait suite à l'application du principe de conservation aux machines thermiques. L'introduction du deuxième principe de la thermodynamique (ce libellé n'est pas cité) se fait alors à travers « *l'idée de la dégradation de l'énergie.* »

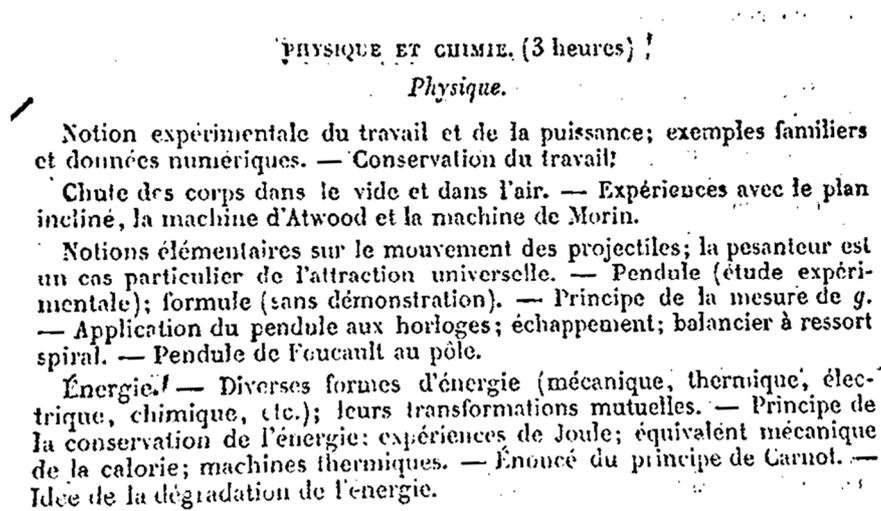


Figure 16 Extrait du programme de la classe de Philosophie, 7 juin 1902

On retrouve ainsi dans les programmes de thermodynamique du secondaire une partie des grands principes de physique que Henri Poincaré (1854-1912) avait énoncée dans *La Valeur de la science* en 1905 : le principe de la conservation de l'énergie, le principe de Carnot et le principe de dégradation de l'énergie (plutôt suggéré comme idée dans le programme). Mais l'ensemble se présente davantage comme une succession de faits plutôt que comme l'ensemble d'un tout.

c. L'importance des travaux pratiques

Le changement apporté par la réforme consiste également à l'introduction de séances de travaux pratiques obligatoires. Pour épauler les enseignants, la Société Française de Physique (SFP), dont Lucien Poincaré est membre, entreprend la création d'un ouvrage intitulé *Recueil d'expériences élémentaires de physique*, publié en 1904 avec la collaboration de nombreux physiciens, par Henri Abraham (1868-1943), alors secrétaire de la SFP. Cette coopération est un

¹⁷⁰ On y voit peut-être ici une volonté de la réforme de 1902 qui vise à mettre plus en pratique expérimentale les sciences physiques. Les expériences de Joule permettent une approche quantitative (autre que la calorimétrie) de la thermodynamique de l'équivalence travail-chaleur.

premier pas vers la création de l'Union des Physiciens qui ne verra le jour que deux ans plus tard.

Afin d'accompagner l'enseignant dans la mise en place de travaux pratiques, un *catalogue de matériel scientifique d'enseignement des sciences physiques et naturelles* est proposé dans une circulaire du 28 novembre 1904. L'introduction des travaux pratiques n'a pas pour objectif de reproduire « plus ou moins fidèlement [les appareils] employés par les maîtres de la science pour en établir les lois [car] il serait le plus souvent impossible de répéter avec eux l'expérience qu'ils rappellent. »¹⁷¹ Il s'agit donc de créer des cabinets de physique utilisant des « moyens les plus simples et les plus à portée. [...] Une chose désirable serait qu'à tout cabinet de physique fût annexé un petit atelier muni d'un établi, d'un tour et de leurs accessoires, permettant de réaliser les exercices pratiques, les appareils simples imaginés par le professeur. »¹⁷²

N° 1654 suppl. — 1122 —			— 1123 — N° 1654 suppl.		
DÉSIGNATION DES OBJETS.	PRIX MOYEN.	OBSERVATIONS.	DÉSIGNATION DES OBJETS.	PRIX MOYEN.	OBSERVATIONS.
	fr. c.			fr. c.	
Physique. (Suite.)			Physique. (Suite.)		
<i>Pesanteur.</i>					
Tube pour la chute des corps dans le vide...	19 00		Trompe à mercure.....	70 00	
Marteau d'eau.....	4 00		Appareil Carré pour fabriquer la glace et pour faire le vide.....	290 00	*
Machine d'Atwood.....	115 à 400		Cloches en cristal à bords rodés.....	5 à 18	
Machine de Morin.....	260 à 450	*	Vessic à robinet.....	8 00	
Gyroscope.....	5 00		Crève-vessie.....	3 00	
Échappement à ancre.....	150 00	*	Hémisphères de Magdebourg.....	25 00	
Piézomètre d'Orsted.....	90 00	*	Manomètre barométrique de Regnault.....	125 00	*
Cuir embouti.....	5 00		Manomètre métallique.....	25 00	
Cylindre et obturateur.....	"		Pompe de Regnault.....	90 00	
Tourniquet hydraulique.....	15 00		Pompe de compression.....	35 00	
Flacons à densité.....	"		Pompe à bicyclette.....	250 à 675	
Aréomètres à poids constant. (Une collection.)	"		Trompe à eau pour faire le vide.....	25 à 45	
Ballon à robinet de verre pour la pesée d'air.....	20 00		<i>Chaleur.</i>		
Briquet à air.....	18 00		Anneau de S'Gravesande.....	13 00	
Baromètre normal (avec mercure).....	225 00	*	Pyromètre à cadran.....	22 00	
Baromètre de Fortin.....	110 00	*	Collection de thermomètres.....	"	
Planchette avec support et collier pour le baromètre de Fortin.....	30 00	*	Appareil pour déterminer le point 100.....	22 00	
Baromètres métalliques.....	35 00		Thermomètres à maxima et à minima.....	"	
Boîte de Vidie pour la théorie des baromètres.	20 00		Thermomètre enregistreur de Richard.....	125 00	*
Baromètre enregistreur de Richard.....	115 00		Appareil de Hope pour le maximum de densité de l'eau.....	22 00	
Tube de Mariotte.....	20 00		Appareil de Regnault pour la dilatation des gaz à volume constant et à pression variable.	350 00	M. S.
Cuve profonde.....	25 00		Radiomètre de Crookes.....	10 00	
Appareil Gaillet pour la liquéfaction des gaz.	600 00	*	Moules en bois de Tyndall, la paire.....	4 à 15	
Presse hydraulique actionnée par la pompe Gaillet.....	400 00	*	Appareil à quatre tubes barométriques pour les tensions des vapeurs.....	40 00	
Tubes de Natterer contenant de l'acide carbonique liquéfié (chaque tube).....	25 00	*	Autoclave.....	125 00	
Machine pneumatique à mercures.....	360 00	*	Appareil de Dumas pour la densité des vapeurs.....	45 00	M. S.

Figure 17 Extrait du catalogue des appareils de sciences pour l'enseignement dans les lycées et les collèges

¹⁷¹ (BO, 1904) p.1117

¹⁷² (BO, 1904) p.1117

Les laboratoires de physique dans les lycées et collèges voient donc le jour. Une liste des appareils, avec l'indication du prix moyen est jointe au document (Cf. Figure 17). En ce qui concerne la thermodynamique, on retrouve les dispositifs aux changements d'état et à la calorimétrie. En revanche, le matériel nécessaire à la présentation des expériences de Joule, telle que la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur par frottement, n'est pas suggéré.

Les programmes proposés dans les bulletins officiels sont en définitive, peu détaillés et se limitent à exposer une succession de notions ou de concepts à aborder sans préciser spécifiquement le contenu. Aussi, pour avoir une idée de la façon dont les enseignements ont été dispensés, il a fallu se tourner vers d'autres documents. Ainsi, l'interprétation des programmes de 1902 que nous proposons, va se faire à partir de l'analyse des manuels parus à la suite de la réforme. C'est l'objet notamment du prochain paragraphe.

2. Interprétation des programmes à travers quelques manuels

a. Le choix des auteurs

Le choix d'auteurs qui a été fait pour cette période se porte sur Bouasse et Michel Chassagny (1865-1918) et s'explique par plusieurs raisons que nous allons détailler.

En 1902, Bouasse¹⁷³ est professeur de physique à l'Université de Toulouse. Il est également membre du jury d'agrégation de sciences physiques de 1901 à 1904. Il est célèbre pour ses propos contre les méthodes d'enseignement¹⁷⁴ et participe notamment aux débats liés à la réforme. Certaines des idées qu'il exprime en 1896, dans le *Bulletin de l'enseignement secondaire de l'académie de Toulouse*, en faveur du regroupement des idées de physique en un nombre de faits restreints, seront reprises dans la réforme de 1902.

¹⁷³ Bouasse est également un proche de Duhem, avec lequel il partageait une certaine opinion de la physique notamment sur les rapports entre sciences théoriques et sciences expérimentales. Dans son ouvrage de Thermodynamique de 1913 Bouasse lui rend hommage « *ce livre n'existerait pas sans les ouvrages de M Duhem ; il en est tout imprégné. On s'honore en se déclarant le disciple d'un tel maitre.* » (Bouasse, 1913b) Introduction p.XXIII

¹⁷⁴ Bouasse s'exprime ainsi en 1901 « *faut-il avoir l'air d'établir expérimentalement toutes les lois qu'on énonce ? sans parler de l'impossibilité d'expliquer aux élèves certains appareils nécessaires à cet établissement [...] sans insister [...] sur le trompe-l'œil que [la démonstration expérimentale] est souvent.* » citation extraite de (Hulin, et al., 2000) p.19 Mais il ne faut pas voir pour autant Bouasse comme un opposant à la réforme de 1902 mais plutôt à ceux qui l'incarnent tels Joubert et L. Poincaré à qui il réserve régulièrement ses critiques ouvertes sur leurs recommandations officielles. « *Qu'on ne m'oppose pas que les programmes de 1902 contiennent des CONSEILS GENERAUX judicieux : le texte donné par Joubert, Inspecteur général, est de moi. Il est pris mot pour mot dans un des deux rapports qu'il m'avait demandés et qu'on retrouvera, j'imagine, dans ses papiers.* » (Bouasse, 1913b) p. XII

Bouasse publie deux livres coécrits avec Léopold Brizard (1869-1937), professeur au Lycée Janson-de-Sailly, à destination du secondaire. Dans ces ouvrages ils présentent leur vision de la thermodynamique : *Physique, classe de seconde* dont la première édition date de 1905 et *Physique, classe de Mathématiques A et B*. Bouasse a également publié un *Manuel du Baccalauréat, Mécanique et Physique* (1903) qui se démarque des traités existant par son exposé synthétique des faits essentiels. Un grand nombre des idées qui y sont présentées se retrouveront dans le cours de Physique de Mathématiques publié deux ans plus tard. En revanche, puisqu'il s'agit d'un manuel, Bouasse y développe une méthode déductive car « *plus systématique, [elle] pose [ainsi] le principe, en déduit les faits : elle est particulièrement brève et claire.* »¹⁷⁵ Il justifie en outre, cette présentation (en contradiction avec les recommandations des programmes) car s'adresse à des étudiants « *qui ont déjà compris les faits* ».

Les programmes laissant une grande part de liberté aux enseignants, ceux-ci peuvent être parfois perdus dans la mise en place de leur cours et tentés de revenir aux méthodes d'avant réforme. Aussi, en 1903 Abel Buguet (1855-1921) dans le *Journal de physique élémentaire*, présente pour l'interprétation des programmes, les livres de Bouasse notamment, comme des livres de références. Emile Mathias (1861-1942), Professeur à la Faculté de Toulouse, explique encore que Bouasse « *a pris le contre-pied des livres existants [...] ne présente que des figures schématiques faciles à comprendre [...] il supprime les descriptions d'instruments qui sont la gloire de certains livres connus et il porte tout son effort sur l'enchaînement des idées* »¹⁷⁶ En outre, Bouasse s'exprime lui-même à propos de son travail en 1913 « *la comparaison depuis douze ans des livres de mes concurrents prouve mon influence indiscutable et le soin jaloux qu'on prend à me démarquer.* »¹⁷⁷

L'autre choix d'étude est comme nous l'avons dit plus haut, l'œuvre de Chassagny. Celui-ci est, comme Brizard, professeur au lycée Janson-de-Sailly. En outre, Chassagny deviendra un acteur important des adaptations futures de la réforme de 1902 et sera en outre nommé Inspecteur général de l'Instruction publique. Il publie en 1904, un ouvrage d'enseignement à destination du secondaire¹⁷⁸. L'ouvrage de Chassagny se démarque de ceux de Bouasse par l'organisation des chapitres reflétant la construction même des idées des auteurs. Ainsi, dans la préface du manuel de Chassagny, Paul-Émile Appell (1855-1930)¹⁷⁹ donne les objectifs de l'auteur : « *en particulier, faire un usage constant de la notion d'énergie en présentant sa conservation comme un principe*

¹⁷⁵ (Bouasse, 1903) p.8

¹⁷⁶ (Hulin, et al., 2000) pp.62-63

¹⁷⁷ (Bouasse, 1913b) p. XII

¹⁷⁸ *Cours élémentaire de Physique, conforme aux programmes du 31 mai 1902 à l'usage des candidats aux baccalauréats et aux écoles du gouvernement*, Chassagny, avec une préface de Appell (1855-1930, Paul) 1904 Cinquième édition. — 1 vol, 1144p (Chassagny, 1904)

¹⁷⁹ Appell, doyen de la faculté des sciences de Paris, participera en 1903 aux commissions interministérielles pour la révision des programmes des classes préparatoires.

au commencement du cours et non comme une conclusion à la fin [...] Quoique l'auteur ait très nettement indiqué le but à atteindre, il n'a pas cru devoir aller dans cette voie nouvelle aussi loin qu'il aurait pu le faire, parce qu'il ne voulait pas, dans l'état actuel des programmes, s'écarter par trop des méthodes exigées habituellement au baccalauréat. »¹⁸⁰ Aussi, si Bouasse va clairement proposer une innovation dans la présentation de l'enseignement de la physique et en particulier de la thermodynamique, Chassagny, bien que souhaitant appliquer le programme, restera dans une démarche traditionnelle.

b. Les concepts de température et de chaleur

Dans *Physique, classe de seconde* Bouasse aborde la notion de chaleur à travers six chapitres : *température-thermométrie, calorimétrie, dilatations, changements d'états, vapeurs d'eau dans l'atmosphère-mouvements généraux de l'atmosphère* et *notions très sommaires sur la conduction, l'émission et l'absorption de la chaleur*. Il aborde le concept de température en insistant sur le fait que les « indications vagues des sens [...] l'état physiologique de l'observateur, les sensations antérieures, la nature du corps touché influent [...] sur les sensations éprouvées au contact des différents corps »¹⁸¹. Cette mise en garde sur les sensations n'est pas précisée dans l'œuvre de Chassagny : « nous recevons par le toucher la sensation de chaud et de froid; et l'observation nous apprend qu'au contact d'un corps chaud un corps froid s'échauffe lui-même, et inversement. Nous traduisons scientifiquement ces résultats de l'expérience vulgaire en disant qu'un corps nous paraît plus ou moins chaud selon que sa température est plus ou moins élevée »¹⁸² Alors que Bouasse définit la température comme l'une des deux variables (autres que la pression) du volume d'un corps, caractérisant le « plus ou moins grand échauffement »¹⁸³, Chassagny n'en propose aucune définition hormis « [la] relation arbitraire, qui lie la variation de température à la valeur de l'effet mesurable qu'elle produit, [qui] nous servira de définition de la température. »¹⁸⁴

En outre, Bouasse définit la chaleur dans le chapitre de calorimétrie : « nous désignons donc sous le nom de chaleur ce que nous recevons par un mécanisme quelconque, des corps qui nous échauffent et qui sont plus chauds que nous ; d'une manière plus générale, ce que reçoivent les corps qui s'échauffent et ce qu'abandonnent les corps qui se refroidissent »¹⁸⁵ et précise un peu plus loin dans une note que « la chaleur n'est qu'une forme particulière de quelque chose

¹⁸⁰ (Chassagny, 1904) p.III

¹⁸¹ (Bouasse, et al., 1930) p.151

¹⁸² (Chassagny, 1904) p.3

¹⁸³ (Bouasse, et al., 1930) p.154

¹⁸⁴ (Chassagny, 1904) p.4

¹⁸⁵ (Bouasse, et al., 1930) p.171

qu'on appelle l'énergie. »¹⁸⁶ Cette affirmation sera reprise dans son ouvrage de terminale. Chassagny, quant à lui, ne définit pas la notion de *chaleur* (bien qu'il s'agisse du titre de son livre troisième) mais introduit la notion de *quantité de chaleur*, dans un chapitre intitulé « *énergie calorifique* » qu'il considère comme une forme d'énergie que l'on comprendrait être la chaleur.

Chassagny n'hésite pas en revanche à introduire quelques idées sur la théorie cinétique des gaz dans son cours : « [...] *La théorie cinétique des gaz [...] permet de se rendre compte de leurs diverses propriétés. Sous sa forme la plus simple, cette hypothèse consiste à admettre que les molécules d'un gaz parfait n'exercent les unes sur les autres aucune action sensible, qu'elles sont, animées de mouvements rectilignes dans tous les sens et que leur force vive moyenne représente la température absolue du gaz.* »¹⁸⁷ Cette référence, totalement absente de l'ouvrage de Bouasse, pour le secondaire du moins, se veut à l'avant-garde et permet de réaliser un lien entre la thermodynamique du milieu du 19^{ème} siècle et celle de la fin du 19^{ème} siècle. En outre, Chassagny propose une approche mécanique de la chaleur en la considérant « *comme un mode de mouvement* ». Il justifie sa démarche par le fait que « *elle nous explique, en outre, la nécessité même de l'équivalence de la chaleur et du travail dans les transformations que subissent [les] gaz.* »¹⁸⁸

c. Introduction de la conservation de l'énergie et de l'équivalence chaleur travail

Les œuvres de Bouasse et Chassagny se distinguent également sur la façon dont ils abordent le concept d'énergie et sa conservation.

Chassagny introduit le concept d'énergie et de sa conservation dans un chapitre de mécanique « *chapitre VI l'énergie mécanique et ses transformations* ». Il énonce : « *Un système ne peut gagner ou perdre, du travail sans se modifier. C'est à ce dernier énoncé que nous donnerons plus spécialement le nom de principe de la conservation de l'énergie.* »¹⁸⁹ Il ne définit pas de quelle énergie il s'agit. En revanche, il introduit l'*énergie totale*¹⁹⁰ d'un système comme une grandeur qui peut rester « *invariable* » dans certaines conditions. On comprend dans le développement suivant que cette énergie totale s'interprète dans un premier temps comme l'énergie mécanique du système : « *L'énergie potentielle augmente légèrement et devient $W+\mathcal{E}$. Donnons en outre au*

¹⁸⁶ (Bouasse, et al., 1930) note de bas de page p.173

¹⁸⁷ (Chassagny, 1904) p.296

¹⁸⁸ (Chassagny, 1904) p.297

¹⁸⁹ (Chassagny, 1904) p.62

¹⁹⁰ Pour Chassagny énergie et énergie totale finalement s'identifient « *énergie totale ou simplement énergie* » (Chassagny, 1904) p.270

système une petite impulsion, ce qui revient à lui communiquer encore une petite quantité ε' d'énergie cinétique. L'énergie totale du système est alors $W + \varepsilon + \varepsilon'$ »¹⁹¹.

Mais dans le chapitre *Energie calorifique*, Chassagny donne une définition plus générale de son concept d'énergie totale :

« Supposons qu'à un instant déterminé l'énergie mécanique du système, telle que nous l'avons définie, soit W (somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique) ; désignons par Q le nombre de calories que le système pourrait céder au milieu extérieur, sans en recevoir de travail et en conservant la même énergie mécanique W ; nous dirons alors que l'énergie totale U du système est dans ces conditions : $U=W+JQ$

Le terme JQ représente l'énergie calorifique du système à l'instant considéré. De même que l'énergie mécanique W l'énergie calorifique JQ est déterminée pour tout état bien défini du système et du milieu extérieur. »

Chassagny généralise ensuite la conservation de l'énergie : « L'énergie totale d'un système dans un milieu fixe conserve la même valeur après toute transformation au cours de laquelle le système n'a emprunté ou fourni au milieu ni chaleur, ni travail. »¹⁹² Mais la définition que propose Chassagny, comme réserve d'énergie mécanique et calorifique, ne s'applique pas au cas des systèmes isolés, comme il l'admet lui-même : « J'insiste à dessein sur ce point : d'après la définition que j'en ai donnée, le terme énergie totale ou simplement énergie, appliqué à un système isolé, n'aurait aucun sens ; il n'acquiert de signification qu'à la condition de placer le système dans un milieu bien défini. »¹⁹³ En effet, les énergies calorifique et mécanique apparaissent alors à la fois comme des grandeurs caractéristiques du système mais également comme des quantités susceptibles d'être échangées avec le milieu extérieur.

La démarche de Bouasse est différente de celle de Chassagny. En effet, Bouasse consacre le chapitre V de son cours de Physique pour les classes de mathématiques à « *diverses formes de l'énergie – sa conservation. Principes des machines à vapeur et à explosion* » qui a une vocation plus générale qu'une application à la mécanique. Il propose de rectifier le principe de conservation de l'énergie « *c'est-à-dire la somme de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique est constante* »¹⁹⁴ en considérant une troisième forme d'énergie : la chaleur. Il introduit la notion d'*énergie interne*, généralisation du concept d'énergie potentielle, qui correspond à « *une réserve parfaitement déterminée d'énergie* », dont la « *valeur [...] nous est complètement inconnue* » mais pour laquelle « *nous ne pouvons déterminer que les variations.* »

Bouasse conclut alors :

¹⁹¹ (Chassagny, 1904) p.69

¹⁹² (Chassagny, 1904) pp.269-271

¹⁹³ (Chassagny, 1904) pp.269-271

¹⁹⁴ (Bouasse, et al., 1905) pp. 88-89

« Nous pouvons maintenant donner du principe d'équivalence un énoncé correct. Quand un système quelconque passe de l'état 1 à l'état 2, il faut fournir un quantité de chaleur Q , qui sert à deux fins : l'une correspond à l'augmentation de l'énergie interne $U_2 - U_1$ de tous les corps du système ; l'autre compense le travail T accompli par le système contre les forces extérieures. On peut donc écrire : [...] $Q = U_2 - U_1 + AT$ »¹⁹⁵

La quantité de chaleur apparaît alors comme une grandeur d'échange susceptible de faire varier la réserve d'énergie d'un corps qu'il nomme *énergie interne*. Bouasse généralisera ensuite le principe aux transformations en cycle fermé. Dans la suite de son développement, Chassagny arrive à la même expression que celle de Bouasse pour exprimer le principe d'équivalence. Mais il ne donnera alors aucune explication sur la démarche pour passer de l'expression de l'énergie totale qu'il définit à la variation de celle-ci.

Cette approche distincte du premier principe de la thermodynamique par les deux auteurs s'explique difficilement. On ne peut avancer l'argument d'une méconnaissance du principe de conservation, car même si les ouvrages sont à destination du secondaire les deux auteurs sont avertis des développements de la science. Si on en est certain pour Bouasse, on peut également s'en convaincre pour Chassagny puisqu'il a su faire référence à la théorie cinétique des gaz. Cette démarche serait donc *a priori* un choix de l'auteur. La distinction entre les approches des deux auteurs va également apparaître dans l'application qu'ils vont donner au principe à travers les machines thermiques. C'est l'objet du prochain paragraphe.

d. Transformation de la chaleur en travail : Les machines thermiques

Les ouvrages de Bouasse et Chassagny consacrent tous les deux un chapitre aux machines thermiques. Les machines à vapeurs et les moteurs à explosion y sont présentés. La description, parfois minutieuse, est appuyée par des schémas et les principaux organes tels que la chaudière, les cylindres, les mécanismes de transmission *etc.* y sont détaillés.

Chassagny présente en préambule du chapitre consacré aux machines, le principe de Carnot, qu'il énonce : « *Sadi Carnot a mis en lumière le principe expérimental suivant, qui, avec celui de l'équivalence, constitue les fondements de la thermodynamique :*

En aucun cas, une machine thermique ne restitue intégralement sous forme de travail l'énergie calorifique JQ qu'elle reçoit. Une partie seulement J ($Q - Q'$) de cette énergie est transformée en travail et on appelle rendement de la machine thermique le rapport entre le travail

¹⁹⁵ (Bouasse, et al., 1905) p.90

W réellement obtenu et l'énergie calorifique JQ dépensée. Ce rapport est égal à $\frac{Q-Q'}{Q}$ »¹⁹⁶ JQ' , est l'énergie calorifique cédée à la source froide.

L'expression de ce rendement en fonction des températures est renvoyée à une remarque en fin de chapitre. Aussi, même s'il signale que « *Le travail disponible [dans une machine réelle] n'est qu'une partie de celui que développe le piston; le reste est perdu dans les frottements des organes mêmes de la machine* »¹⁹⁷ Chassagny, à la différence de Bouasse, ne compare pas directement le rendement de Carnot au rendement obtenu sur les machines réelles. Il se contentera d'exprimer « *Le cycle des transformations de la vapeur dans les machines que nous avons décrites n'est donc pas exactement celui qui correspondrait au rendement maximum.* »¹⁹⁸

En revanche, Bouasse qui s'appuie sur des applications numériques détaillées est plus radical dans sa conclusion : « *le rendement [industriel] est dix-neuf fois plus petit que le rendement théorique. On voit que la limite imposée par le principe de Carnot est très loin d'être atteinte, même dans les machines à vapeur les plus perfectionnées.* »¹⁹⁹

Cette remarque lui est possible, car Bouasse a davantage développé le Principe de Carnot. En effet, il énonce : « *tout ce que le principe d'équivalence nous apprend, c'est que le travail qu'il est possible de recueillir dans une transformation satisfait la relation $Q = U_2 - U_1 + AT$. Il ne nous donne aucune idée de la valeur de ce travail T .* »²⁰⁰ Il introduit alors le concept d'entropie et développe un formalisme bien au-delà du programme en donnant la définition d'un potentiel thermodynamique :

« *La quantité $U - TS = F$ s'appelle potentiel thermodynamique [...] de même que le travail accompli par un système est égal à la diminution de l'énergie potentielle, de même la chaleur AT qu'un système peut au maximum transformer en travail, quand il passe d'un état 1 à un état 2 par voie réversible, est égale à la diminution $F_1 - F_2$ du potentiel thermodynamique* »

²⁰¹

Il en conclut alors que « *si la transformation ne se fait pas par voie réversible, le travail obtenu est moindre.* »²⁰²

Cette partie est également l'occasion de répondre à l'exigence du programme sur la dégradation de l'énergie. Bouasse introduit l'énergie totale (somme du travail mécanique, force vive, chaleur) pour aborder ce concept. Il estime : « *si l'énergie totale est constante, sa valeur mécanique diminue d'une manière continue.* »²⁰³ Il classe les différentes formes d'énergie selon

¹⁹⁶ (Chassagny, 1904) p.379

¹⁹⁷ (Chassagny, 1904) p.401

¹⁹⁸ (Chassagny, 1904) p.398

¹⁹⁹ (Bouasse, et al., 1905) p.127

²⁰⁰ (Bouasse, et al., 1905) p.105

²⁰¹ (Bouasse, et al., 1905) p.106

²⁰² (Bouasse, et al., 1905) p.106

²⁰³ (Bouasse, et al., 1905) p.129

leur *noblesse*. Si le travail et la force vive sont nobles, la chaleur est moins noble car ne peut se convertir intégralement en travail. Chassagny défend le même point de vue avec un autre langage : « *La chaleur est une forme inférieure de l'énergie. Toutes les formes de l'énergie quelles qu'elles soient, énergie potentielle, énergie cinétique, énergie électrique, énergie chimique, possèdent ainsi une tendance singulière à prendre la forme calorifique, à se dégrader, pour ainsi dire, et l'on a à lutter contre cette tendance dans tous les dispositifs qui servent à la production du travail.* »²⁰⁴

La thermodynamique proposée par Bouasse, même si elle ne fait aucun commentaire relatif à la théorie cinétique des gaz, est beaucoup plus ambitieuse, audacieuse et à l'avant-garde que celle présentée par ses contemporains. En effet, il introduit notamment l'énergie interne dans son cours, alors qu'elle ne sera au programme du secondaire que 77 ans plus tard, (même si son introduction restera comme nous le verrons, relativement éphémère). Pourtant, dans l'expression du premier principe, la chaleur reste une grandeur dont la signification semble délicate à présenter. Elle apparaît chez Chassagny à la fois comme une grandeur de stock mais aussi comme une grandeur d'échange. Alors que chez Bouasse, elle représente un moyen de faire varier la réserve d'énergie d'un système thermodynamique. La présentation de ce premier principe et des grandeurs qui y sont liées va être un point important de discussion dans la suite de notre analyse.

En outre, Bouasse développe la thermodynamique en allant au-delà du programme. Le développement proposé sur les machines est un exemple marquant. Alors que Chassagny se contente d'une étude descriptive, Bouasse propose de développer le concept d'entropie. Il apparaît évident que l'ouvrage de Bouasse a l'ambition de préparer les élèves aux études supérieures. Il va notamment rester une référence bibliographique pour les années futures, comme le signalent Faivre-Dupaigre et Lamirand²⁰⁵ dans la préface de leur *Cours de Physique pour classes de Mathématiques spéciale* en 1910²⁰⁶ : « *Nous nous sommes aidés, pour notre rédaction, du Cours de Physique de M Bouasse, dans lequel nous avons puisé bien des renseignements intéressants.* »

²⁰⁴ (Chassagny, 1904) p.299

²⁰⁵ Jules Faivre-Dupaigre (1860-19 ??) était inspecteur général de l'instruction publique, il fut président du jury de l'agrégation de sciences physiques de 1910 à 1921. Faivre-Dupaigre fit également partie aux côtés de Joubert et Poincaré de la commission du matériel scientifique des Lycées et des Collèges ayant fait les recommandations pour la création des cabinets de physique. Jean-Baptiste Lamirand (1871-1958) était inspecteur de l'académie de paris. Ils étaient tous deux anciens enseignants au Lycée Saint Louis.

²⁰⁶ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) Préface.

IV. L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DANS LE SUPERIEUR

1. La thermodynamique dans les classes préparatoires aux grandes écoles

a. Les classes préparatoires au début du siècle

Les classes préparatoires et les concours de recrutement qui y sont rattachés, sont nés au cours du 18^{ème} siècle. Liés à l'institution militaire, ils sont notamment réservés à l'élite sociale. Mais en 1794, est fondée l'École polytechnique qui s'intègre sur un concours auquel tout jeune homme entre 16 et 20 ans peut prétendre²⁰⁷. A compter de 1802, dans chaque lycée, est créée une classe dite de *mathématiques transcendantes*, qui deviendra, classe de *mathématiques spéciales* en 1809. L'objectif de ces classes est la préparation au concours de l'École polytechnique. Au cours du 19^{ème} siècle apparaissent de nouveaux concours, moins relevés que celui de l'École Polytechnique. On y retrouve par exemple l'École spéciale militaire de Saint-Cyr, l'École navale et l'École forestière. Pourtant, les réformes entreprises au cours du milieu du 19^{ème} siècle vont considérablement diminuer le nombre de classes préparatoires dans les établissements publics. Se créent alors des classes préparatoires privées qui développent un système de conférences et d'interrogations pour les élèves. Pour contrer la montée en puissance de cette concurrence, le ministère de l'Instruction publique décide à la fin des années 1860 de créer sur le même modèle dans un certain nombre de lycées de Paris et de Province des écoles préparatoires, où les élèves sont entièrement séparés de ceux de l'enseignement secondaire. Le système des classes préparatoires scientifiques prend alors progressivement le visage qu'il va conserver presque sans changement jusqu'aux années 1970. En outre, on peut estimer qu'à la fin du 19^{ème} siècle, ce système accueille et forme environ 10000 élèves. Ce chiffre ne sera pas dépassé avant les années 1960²⁰⁸.

Enfin, il faut signaler que pendant longtemps, la physique reste une discipline peu valorisée sur les concours d'admission, par rapport aux mathématiques. A titre d'exemple, les évaluations de mathématiques possèdent un coefficient quatre fois plus élevé que celui des épreuves de physique²⁰⁹.

Le 8 août 1903, paraît, dans le bulletin du ministère de la guerre, les instructions pour l'admission à l'École polytechnique en 1904 ainsi que les programmes des connaissances exigées.

²⁰⁷ Cette ouverture reste néanmoins relative puisqu'il faut pour y prétendre avoir obtenu le baccalauréat et passer avec succès le concours d'admission qui se prépare dans les plus grands lycées.

²⁰⁸ (Belhoste, 2003) p.5

²⁰⁹ (BO, 8 août 1903) p.6

Comme pour les classes du second cycle, les travaux pratiques prennent place dans l'enseignement des sciences. Aussi, il est suggéré aux examinateurs de « *se faire présenter les cahiers de manipulations et poser des questions relatives à ces manipulations [...] il devra en principe y avoir un nombre de manipulations correspondant à une séance de deux heures par quinzaine durant toute l'année scolaire.* »²¹⁰

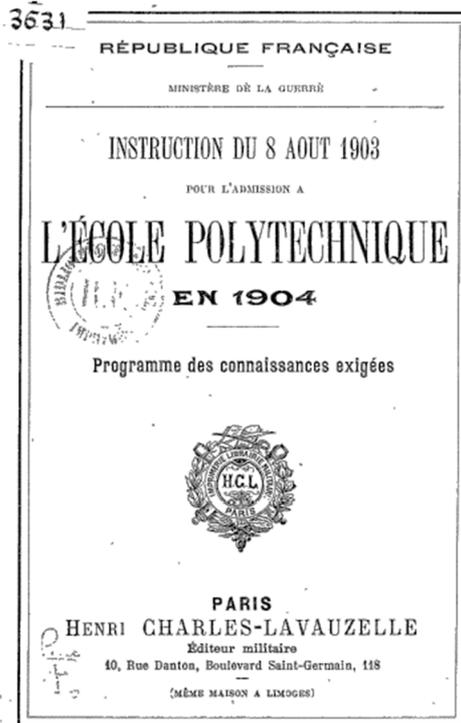
Il est vivement conseillé en outre, de s'inspirer de ce qui a été fait en ce qui concerne les exercices pratiques lors de la réforme de 1902, en apportant « *des exercices conduisant à de véritables mesures et de faire exécuter ces mesures avec plus de précisions [...] Le but [...] n'est pas [...] de faire exécuter toutes les manipulations qui se rattachent au cours de physique et de chimie [mais] de perfectionner l'éducation du sens expérimental* »²¹¹. En revanche, aucun programme fixe et explicite de ces exercices n'est proposé, seuls quelques titres d'exemples sont cités comme « *mesures de quantités de chaleur* », pour ce qui est de la thermodynamique.

b. Le programme de thermodynamique

La thermodynamique n'a pas une place de choix dans le programme de physique en 1904 (Cf. Figure 18). En effet, cette dernière se limite à un paragraphe intitulé « *Chaleur. Dilatation des solides, liquides et gaz. Thermomètres. Densité des gaz et des vapeurs.* » Cette partie rassemble la calorimétrie et les changements d'état. On y trouve également le principe d'équivalence chaleur/travail et de la détermination de l'équivalent mécanique de la calorie notamment illustrée par l'expérience « *fondamentale* » de Joule. En revanche, aucune référence explicite n'est faite ni à l'énergie (on y trouve une référence uniquement reliée à des concepts purement mécaniques « *Travail d'une force ; travail de la résultante de plusieurs forces ; travail d'une force pour un déplacement résultant. Force vive.* ») ni au principe de conservation. Ce principe fondateur présent dans le programme du secondaire, est donc totalement absent en classes préparatoires. Ceci montre clairement une discontinuité dans l'approche de la physique et notamment de la thermodynamique entre les deux cycles. Nous verrons par la suite que les décalages entre l'enseignement secondaire et supérieur seront toujours présents avec une plus ou moins grande importance.

²¹⁰ (BO, 1904) p.1115

²¹¹ (BO, 1904) p.1116



VI. — PHYSIQUE.

I. — *Optique géométrique.*

Instruments d'optique : chambre claire, chambre noire, loupe, microscope. — Lunette astronomique : lunette terrestre : lunette de Galilée, télescope de Newton. — Goniomètre : mesure des indices de réfraction.

Dispersion. — Achromatisme des prismes et des lentilles.

Mesure de la vitesse de la lumière par la méthode de Foucault et par celle de Fizeau.

II. — *Mesure des longueurs.*

Unités C. G. S. de longueur. — Vernier. — Vis micrométrique. — Sphéromètre. — Cathétomètre.

Mesure des poids et des masses. — Loi de la chute des corps. — Vérifications expérimentales. — Balance de précision.

Unité C. G. S. de masse. — Unités C. G. S. de poids et de force : leurs dimensions.

Mesure des temps. — Unité C. G. S. de temps. — Pendule simple.

Mesure des poids spécifiques des solides et des liquides par la méthode de la balance et du flacon. — Densité. — Dimensions du poids spécifique et de la densité.

Mesure des pressions. — Baromètre normal. — Baromètre anéroïde. — Manomètre à air libre. — Manomètre métallique. — Trompes.

Unité C. G. S. de pression : ses dimensions.

III. — *Chaleur. — Dilatation des solides, liquides et gaz. — Thermomètres. — Densité des gaz et des vapeurs.*

Vaporisation et liquéfaction. — Expériences d'Andrews : point critique.

Mesure des chaleurs spécifiques des solides, des liquides, des gaz à pression constante.

Mesure de la chaleur de fusion et de solidification.

Mesure de la chaleur de vaporisation.

Principe de l'équivalence de la chaleur et du travail.

Détermination de l'équivalent mécanique de la calorie : expérience fondamentale de Joule. — Unité C. G. S. de quantité de chaleur.

Figure 18 Extrait du Programme de l'école Polytechnique, 8 août 1903²¹²

Enfin, on peut également noter que les concepts de thermodynamique sont relativement déconnectés du programme de mécanique. En effet, c'est dans l'enseignement de mathématiques que cette dernière est dispensée.

Le 30 juillet 1904, paraît au bulletin officiel de l'instruction publique et des beaux-arts, le programme des classes de mathématiques spéciales²¹³. Ce programme, comme l'indique la circulaire du 30 décembre de la même année²¹⁴, a été adopté de manière commune au programme des examens d'entrée à l'École Polytechnique. Néanmoins, il est davantage détaillé sur la thermométrie et la calorimétrie en mettant en avant les méthodes de mesures. En revanche, bien que la détermination de l'équivalent mécanique de la calorie et l'expérience de Joule²¹⁵ soient suggérés dans le programme, le principe d'équivalence chaleur/travail n'apparaît plus. La thermodynamique des principes semble délaissée au profit d'une thermodynamique réduite à des successions de mesures calorimétriques.

²¹² (BO, 8 août 1903) pp.17-18

²¹³ En 1905, la préparation est étendue officiellement à deux ans et les classes préparatoires de première année qui existaient déjà dans certains lycées sous le nom de classe de mathématiques élémentaires supérieures, sont généralisées sous le nom de classes de mathématiques spéciales préparatoires. Ces classes seront rebaptisées sous l'Occupation classes de mathématiques supérieures.

²¹⁴ Bulletin supplémentaire n°1654, 1904, page 1109

²¹⁵ Dans le libellé exact, le programme fait référence aux expériences fondamentales de Joule (utilisation du pluriel) contrairement au programme de l'École Polytechnique qui y fait référence au singulier.

2. L'enseignement de la thermodynamique dans la formation des enseignants

a. L'agrégation des sciences physiques

L'agrégation de sciences est créée en 1808, mais le premier véritable concours n'est organisé qu'en 1821 et sa spécialisation en mathématiques et en sciences physiques n'interviendra qu'en 1840. Elle n'est ouverte qu'aux titulaires du baccalauréat et donc non accessible aux élèves du primaire supérieur²¹⁶. Aussi, jusqu'en 1840, les professeurs de mathématiques et de sciences physiques des lycées reçoivent une formation globalement homogène et les épreuves comportent, mises à part les compositions de lettres : une ou plusieurs questions de physique et une ou plusieurs questions de mathématiques. Les questions orales ont pour objet les matières de l'enseignement du cours de mathématiques et de physique (centrées sur les formules) de la classe de philosophie.

Il n'y a pas d'épreuve expérimentale organisée. Mais, aux futurs professeurs qui envisagent avec certitude d'enseigner les sciences physiques, il leur est proposé durant la préparation au concours, quelques séances d'ateliers et de manipulations. Cette initiation expérimentale pratique n'est pas valorisée et le plus souvent, cette situation favorise les mathématiques déjà considérées comme plus prestigieuses. La création de l'agrégation des sciences physiques à proprement parler avec des épreuves expérimentales posées à l'oral date de 1869.²¹⁷

En 1890, la commission chargée de préparer la réforme, conclut ses premiers travaux par : « *L'Etat ne fera œuvre d'éducateur que s'il commence par former des éducateurs [...] ce n'est pas assez pour être un bon professeur d'avoir appris tout ce qu'on doit enseigner et mille fois plus. Moins de sciences et une meilleure méthode pour en transmettre ferait mieux notre affaire.* » Aussi, la réforme de l'enseignement secondaire en 1902 est accompagnée d'une volonté de réformer la formation des enseignants et notamment l'agrégation. En 1903, le ministre de l'instruction publique Joseph Chaumié (1849-1919) avance : « *Le succès de la réforme de l'enseignement secondaire dépend de la solution qui sera donnée au problème de la préparation des futurs professeurs [...] aujourd'hui, on est d'accord que, s'il est indispensable que le futur professeur sache ce qu'il doit enseigner, qu'il se soit exercé aux méthodes scientifiques, il importe non moins que, avant d'enseigner, il ait appris à le faire.* »²¹⁸

²¹⁶ Les élèves du primaire supérieur ne peuvent entrer à l'Université, ils doivent s'orienter vers les écoles normales primaires supérieures.

²¹⁷ En 1869, l'agrégation de sciences se scinde en trois spécialités : mathématiques, sciences physiques et sciences naturelles. L'agrégation des sciences physiques avait pourtant vu le jour en 1840 mais les innovations mineures qu'elle apporta, engendra sa disparition douze ans plus tard où elle fût à nouveau confondue avec celle de mathématiques pour donner une seule agrégation de sciences.

²¹⁸ *Bulletin administratif* citation extraite de (Hulin, et al., 2000) p.58

En 1902, le rapport de Jury de l'agrégation²¹⁹ donne ses recommandations pour l'élaboration des futurs programmes de l'agrégation : « *Si l'on veut comprendre toute la physique dans le programme d'agrégation et [...] ne pas imposer [...] une préparation trop longue et trop laborieuse, il faut [...] faire des sacrifices... [On renoncera donc] à tout ce qui n'est pas nécessaire à la saine et solide compréhension des faits [...], les détails historiques, les dissertations métaphysiques, les théories purement mathématiques, et même toutes ces théories quelque'importantes qu'elles puissent être, qui ne sont pas dans le courant actuel des idées²²⁰ et qui ont fait place à d'autres plus compréhensives ou plus simples.* »²²¹ L'objectif demandé pour les prochains programmes de l'agrégation est clairement affiché. Il est nécessaire d'aller à l'essentiel des faits tant les connaissances en physique augmentent et par là même les difficultés d'appropriation des nouvelles découvertes. Aussi, comme nous allons le voir, l'approche de la thermodynamique qui en ce début de siècle, a connu un tournant majeur, va être fortement marquée par ces recommandations.

b. La thermodynamique à l'agrégation des sciences physiques

Dans son article de 1984, *Science qui se fait, science qui s'enseigne. À propos d'un document sur l'agrégation de sciences physiques, depuis 1869*, Nicole Hulin a réalisé une étude, sur la période 1869-1921, des sujets des épreuves de l'agrégation de sciences physiques. Elle a notamment montré l'évolution de l'introduction des principes de la thermodynamique dans le programme de l'agrégation et son décalage avec les connaissances de l'époque. Ainsi, en 1876, une nouvelle leçon est proposée sur la « *détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur* », soit près de vingt-cinq ans après la publication des travaux de Joule sur l'équivalent mécanique de la chaleur par Verdet dans les *Annales de chimie et de physique*.

En outre, en 1883, le terme « *calorique* » apparaît dans un sujet de leçon montrant la persistance au-delà de certaines références littéraires (comme nous l'avons montré par exemple à travers les ouvrages de Jamin), de cette notion dans les jurys du concours.

Mais à la fin du 19^{ème} siècle de nouvelles leçons portant sur la thermodynamique sont également proposées : 1887 : « *Les principes de la thermodynamique* », 1890 : « *Principe de Carnot. Température absolue* » 1895 : « *Deuxième principe de la thermodynamique. Echelle thermodynamique des températures* ». Pourtant, il faut attendre 1898 pour qu'une leçon s'intitule : « *Entropie* » et 1905 : « *Cycle de Carnot. Entropie* », alors que le terme a été introduit en 1865 par Clausius.

²¹⁹ Bouasse, Joubert et L. Poincaré faisaient partie des membres du jury.

²²⁰ Faisant notamment référence aux débats entre atomistes et énergétistes.

²²¹ *Bulletin administratif* citation extraite de (Hulin, 1984) pp.44-45

De plus comme nous l'avons vu, c'est la thermodynamique des principes qui a toute sa place à l'agrégation. La mécanique statistique ou la théorie cinétique des gaz sont, tout du moins en France, passées sous silence. Cet état de fait, comme le suggère Nicole Hulin est probablement dû à l'attitude de certains professeurs comme Emile Mathias (1861-1942), professeur à l'Université de Toulouse, qui en 1899 se rend en Angleterre. Il dresse la liste des questions d'examen de niveau Licence posées à l'Université de Cambridge. Aussi, à propos de la question portant sur la théorie cinétique Mathias la juge de « *pure spéculation.* »²²² Une attitude qui n'est pas isolée, comme le rappelle Marcel Brillouin²²³ (1854-1948) dans *Le Livre du cinquantenaire de la Société française de physique* en 1925 à propos de l'inspecteur général Antoine Quet (1810-1884), notamment président du jury d'agrégation de 1869 à 1883 : « *L'inspecteur général Quet [...] regardait comme tout à fait ridicule la curiosité que j'éprouvais pour la théorie cinétique des gaz* »²²⁴. Cette imprégnation de vieux concepts et d'idées fausses qui s'ajoute aux décalages entre les avancées de la science et leur intégration dans les programmes sont d'autant plus problématiques que l'agrégation à cette époque ouvre un accès direct à la recherche.

Dans le bulletin officiel du 7 octobre 1905, paraissent les programmes de l'agrégation des sciences physiques pour le concours de 1906. Le mot « *thermodynamique* » apparaît au côté du mot « *chaleur* » en tant que partie du programme de physique. Sont présents dans le programme, la thermométrie et la calorimétrie en premier lieu, qui font probablement référence au mot *chaleur* du titre de la partie. Le principe d'équivalence, lié au mot *thermodynamique* est introduit comme principe fondamental au côté du principe de Carnot. Il est à ce propos suggéré « *d'admettre les deux principes fondamentaux, sans se perdre dans les discussions abstraites.* »²²⁵ On peut donc ainsi constater que le choix fait pour les programmes de l'agrégation n'est pas en adéquation avec le programme du secondaire où le principe de conservation de l'énergie, absent ici, apparaît comme principe premier de la thermodynamique. Le programme de l'agrégation ne fait pas apparaître de façon globale le concept d'énergie et il semble que ses applications ne soient proposées que de façon juxtaposée : calorimétrie, puis principe d'équivalence, puis machines *etc.* On notera également l'absence de toute référence à l'énergie interne. Paradoxalement, les notions d'*entropie*, de *dégradation de l'énergie* et les potentiels thermodynamiques « *appliqués à quelques cas simples* » sont proposées dans le programme.

²²² *L'Enseignement supérieur de la physique en Angleterre*, E. Mathias, 1899, citation extraite de (Hulin, 1984) p.53

²²³ Brillouin est un partisan convaincu et défenseur de l'atomisme. Il a été le professeur de Perrin quand il était étudiant à l'école normale supérieure.

²²⁴ (Brillouin, et al., 1925) p.16

²²⁵ (BO, 7 octobre 1905)

AGRÉGATION DES SCIENCES PHYSIQUES.

Programme pour le concours de 1906.

PHYSIQUE.

CHALEUR ET THERMODYNAMIQUE.

Dilatations. — Thermométrie ⁽¹⁾.
 Densités.
 Calorimétrie.
 Principe de l'équivalence. — Principe de Carnot ⁽²⁾. — Énergie intérieure.
 — Entropie. — Dégradation de l'énergie.
 Gaz parfaits, gaz réels. — Dissociation des gaz ⁽³⁾.
 Éléments de la théorie cinétique des gaz ⁽⁴⁾.

- ⁽¹⁾ On laissera de côté les questions de métrologie pure.
⁽²⁾ On insistera sur la mesure des grandeurs mécaniques.
⁽³⁾ On ne demande pas la théorie générale de la déformation des enveloppes, mais seulement des notions expérimentales nettes sur la compressibilité.
⁽⁴⁾ On se bornera aux équations générales relatives aux corps isotropes et à leurs applications les plus simples. (Voir Violle, *Traité de physique générale*, tome I, 137 à 151.)
 On laissera de côté les discussions relatives à la valeur du coefficient de Poisson.
⁽⁵⁾ Ramenée à l'étude des phénomènes qui se déduisent de la propriété de la surface de posséder une énergie potentielle proportionnelle à son aire.
⁽⁶⁾ On laissera de côté tout ce qui concerne la technique des mesures de haute précision.
⁽⁷⁾ On admettra les deux principes fondamentaux, sans se perdre dans les discussions abstraites.
⁽⁸⁾ On ne discutera pas les hypothèses sur lesquelles repose la théorie de la dissociation des gaz.
⁽⁹⁾ En laissant de côté ce qui touche au calcul des probabilités et s'en tenant aux hypothèses simplificatrices bien connues.

Changements d'état. — Équilibres chimiques. — Potentiel thermodynamique ⁽¹⁾.
 Règle des phases.
 Étude particulière des vapeurs. — Continuité des états liquide et gazeux.
 États correspondants.
 Pression osmotique.
 Théorie des ions.
 Conduction ⁽²⁾.

Figure 19 Extrait du programme de l'Agrégation des sciences physiques, 1906

Dans le programme du concours de 1906, les remarques précédentes s'appliquent concernant l'énergie et sa conservation (Cf. Figure 19). En revanche, le programme fait désormais référence à des « éléments de la théorie cinétique des gaz », même si il est rappelé « [de laisser] de côté ce qui touche au calcul de probabilités et s'en tenant aux hypothèses simplificatrices bien connues. »²²⁶

²²⁶ (BO, 7 octobre 1905)

Il est donc ici intéressant de constater que le programme de thermodynamique à l'agrégation n'est en réalité qu'une juxtaposition de concepts. L'ajout de la théorie cinétique en 1906 à la suite du programme en est une preuve majeure. En revanche, il n'est aucunement proposé de concevoir la thermodynamique autour des principes et d'en voir ensuite l'ensemble des conséquences et applications. Aussi, compte tenu de ce programme, nous nous proposons d'analyser le choix fait par les auteurs pour présenter la thermodynamique dans les cycles d'études supérieures.

3. La thermodynamique dans les ouvrages destinés aux études supérieures

a. Les ouvrages destinés aux classes préparatoires

Le programme de thermodynamique en classes préparatoires est, comme nous avons pu le voir précédemment, quasiment insignifiant. Aussi, si l'on regarde le *cours de Physique* de Lamirand et Faivre-Dupaigre pour les classes de mathématiques spéciales, seulement neuf pages sont consacrées au thème *Chaleur*, dans lesquelles on retrouve une référence au principe d'équivalence de la chaleur et du travail ainsi que la présentation détaillée de l'expérience de Joule.²²⁷ Les autres thèmes rassemblant la thermométrie, études des dilatations et des changements d'état physique représentent environ 200 pages sur les 250 pages de la partie. Lamirand et Faivre-Dupaigre donnent une définition très générale de la température semblable à ce que l'on trouve dans les ouvrages du secondaire. Aussi lit-on : « *la température est une grandeur liée aux variations de propriétés d'un corps, quand ces variations ne peuvent être attribuées à aucun autre facteur* »²²⁸, après avoir signalé que nos sens ne sont pas fiables pour la repérer.

Quant au concept d'énergie, il y est d'abord défini par une approche mécanique : « *on appelle énergie d'un système la quantité totale de travail qu'il peut fournir sans qu'on ne lui donne rien* »²²⁹. Mais comme nous l'avons signalé, la référence à Bouasse apparaît par l'introduction de l'*énergie interne* dans le principe de conservation de l'énergie. On retrouve une définition et un énoncé similaires au cours de Bouasse de mathématiques A et B : « *La matière doit être considérée comme un réservoir d'énergie [...qui] porte le nom d'énergie interne, et si nous désignons par U_0 sa valeur lorsque le système est à l'état initial, par U_1 sa valeur correspondant à l'état final :*

²²⁷ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) pp.615-623

²²⁸ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.553

²²⁹ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.662

$$Q - AW = U_1 - U_0 \text{ }^{230}$$

Lamirand et Faivre-Dupaigre généralisent l'énoncé au cas où il existe une variation d'énergie cinétique $w_1 - w_0$ « externe » du système :

$$Q - AW = U_1 - U_0 + A(w_1 - w_0)$$

Et ajoutent « l'énergie totale d'un système isolé est constante ou encore l'énergie d'un système isolé se transforme, mais sa grandeur est invariable. »

Mais, la présentation de ce principe de conservation de l'énergie est précédée de la « notion de l'équivalence entre une quantité de chaleur et une quantité de travail »²³¹, à la différence de ses ouvrages du secondaire qui privilégiaient l'approche inverse. Lamirand et Faivre-Dupaigre énoncent ainsi :

« Principe – lorsqu'un système, après une série de transformations, prend un état final identique à l'état initial, et s'il n'y a que des échanges de chaleur et de travail entre le système et le milieu extérieur :

1° si le système a fourni du travail, il a reçu de la chaleur

2° s'il a reçu du travail il a fourni de la chaleur

3° il y a un rapport constant entre la quantité de travail fournie ou reçue et la quantité de chaleur reçue ou fournie.

En désignant par W le travail fourni par le système ($W > 0$ si le travail est vraiment cédé, $W < 0$ si le travail est reçu) ; par Q la quantité de chaleur reçue par le système ($Q > 0$ si la chaleur est réellement reçue, $Q < 0$ si elle est cédée), on a dans les conditions de l'énoncé :

$$\frac{W}{Q} = J \text{ (constante)}$$

Ce rapport constant a été improprement appelé l'équivalent mécanique de la chaleur ; il est plus correct de dire qu'il représente l'équivalent mécanique de l'unité de quantité de chaleur. »²³²

Ce choix de présentation se rapproche donc de la volonté du programme des classes préparatoires, et Lamirand et Faivre-Dupaigre s'appuient ensuite sur « l'expérience fondamentale de Joule » pour illustrer la valeur de J .

En outre, Lamirand et Faivre-Dupaigre introduisent la calorimétrie en invoquant le principe de transformation inverse et de l'égalité des échanges de chaleur. Mais ils signalent que « [ces principes calorimétriques] ne sont pas évidents car nous savons que la chaleur peut être créée ou détruite, ils constituent un cas particulier du principe de conservation de l'énergie appliqué à la calorimétrie. »²³³

²³⁰ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.623

²³¹ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.615

²³² (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.616

²³³ (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.586

Malgré certaines remarques qui vont au-delà du programme (présentation de l'énergie interne, expérience présentant le calcul de l'équivalent mécanique de la calorie, par les chaleurs spécifiques des gaz...)²³⁴, Lamirand et Faivre-Dupaigre se limitent au programme proposé et notamment au choix fait quant à sa présentation. Ils ne développent pas les machines thermiques et laissent sous silence le deuxième principe de la thermodynamique.

Ainsi, si l'on souhaite s'intéresser aux contenus dispensés dans le supérieur concernant la thermodynamique, il faut se tourner vers des traités généraux à destination des études universitaires ou de l'agrégation. C'est ce que nous proposons de faire dans le prochain paragraphe.

b. Les ouvrages de l'enseignement supérieur

Nous avons déjà signalé l'importance des œuvres de Bouasse et de leurs impacts sur l'enseignement secondaire. Mais, son travail a également influencé l'enseignement supérieur.

Bouasse n'est pas un défenseur du système des classes préparatoires²³⁵ ni de l'École polytechnique. Il défend « *l'enseignement général* » de l'université, et notamment le sien, contre certains aspects de l'enseignement scientifique des grandes écoles. Bouasse plaide pour que les programmes n'entassent pas des connaissances qu'un étudiant ne peut sans cesse accumuler. Il souhaite proposer la solution qu'il estime la plus judicieuse. Pour cela il rédige, entre 1911 et 1932, les quarante-cinq volumes de sa *Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien* abordant l'ensemble des domaines de la physique classique²³⁶. Entre temps, il publie en 1907 son *Cours de Physique conforme aux programmes des certificats et de l'agrégation de physique* en six parties : Partie I - Mécanique physique ; Partie II - Thermodynamique, Théorie des ions ; Partie III - Électricité et magnétisme ; Partie IV - Optique, Étude des instruments ; Partie V - Électrooptique, Ondes hertziennes ; Partie VI - Étude des symétries. Dans l'avant-propos de son livre de thermodynamique, Bouasse dresse un constat de l'enseignement de la thermodynamique dans le supérieur et donne le sens du travail qu'il exposera dans son ouvrage :

« *Ce que doit être aujourd'hui un Cours de Thermodynamique est véritablement effrayant. Il est passé l'heureux temps où le rôle du professeur se bornait à expliquer le sens des Principes qu'il appliquait à quelques exemples stéréotypés. La théorie des ions, la notion de pression osmotique, la théorie cinétique des gaz ont tout envahi tout compliqué [...] [un cours de*

²³⁴ Faivre-Dupaigre et Lamirand donnent également quelques références historiques sur l'élaboration de la thermodynamique. Ils font notamment référence à Carnot, Meyer et Helmholtz (Faivre-Dupaigre, et al., 1911) p.621

²³⁵ Voir *L'esprit taupin*, préface de *Résistance des fluides*, Bibliothèque scientifique de l'ingénieur et du physicien, édition Delagrave Henri Bouasse, 1928

²³⁶ Bouasse ne consacra pas d'ouvrage à la relativité. En effet, Bouasse est un fervent opposant à la théorie de la relativité d'Einstein dont les travaux ont été publiés en 1905. Cette critique aura comme effet de l'isoler d'une partie du monde universitaire qui le pense réfractaire à la physique moderne.

Thermodynamique] ne doit surtout pas quitter la proie pour l'ombre, oublier, sous prétexte de modernisme, tout ce qu'un siècle de travail a solidement acquis [...] Je me suis efforcé de tenir la balance droite entre mon respect pour les découvertes sûres mais anciennes et mon admiration pour les découvertes les plus récentes. »²³⁷ Aussi voit-on dans le discours de Bouasse une certaine opposition aux théories modernes. Il souhaite en premier lieu pour la physique et pour la thermodynamique notamment, insister sur la présentation première des principes qui lui en donne tout son sens.

Le cours de thermodynamique s'adressant à l'enseignement supérieur, Bouasse l'a conçu en admettant comme acquis les ouvrages du secondaire²³⁸. L'ouvrage se découpe en onze chapitres. Le premier étant consacré à *Énoncé et traduction mathématique des deux principes fondamentaux* et le neuvième à la *Théorie cinétique des gaz*.

Bouasse débute son cours en donnant la définition de la transformation par voie réversible²³⁹ :

« On dit qu'une transformation est opérée par voie réversible quand elle est constituée par une succession d'états d'équilibre. Une transformation ne peut donc se produire réellement par voie rigoureusement réversible ; elle est la limite de deux séries de transformations réalisables et s'effectuant en sens inverses. »²⁴⁰

Cette définition apparaît chez Bouasse comme fondamentale puisqu'elle est fortement liée aux principes de Carnot.

Il présente en outre l'expression du principe de conservation de l'énergie et sa *conséquence* le principe d'équivalence, après avoir rappelé la notion d'énergie interne.

$$dQ = Ad\tau + dU$$

Aussi le choix de convention est encore de considérer la chaleur dQ comme positive si elle est effectivement reçue par le système mais le travail $d\tau$ comme positif si le corps travaille contre les forces extérieures.

Bouasse introduit naturellement dans les premières pages le principe de Carnot-Clausius, qu'il présente sous forme différentielle pour une transformation réversible (1) et une transformation irréversible (2) après avoir défini l'entropie :

$$\frac{dQ}{T} = dS \quad (1) \quad \text{et} \quad \frac{dQ}{T} < dS \quad (2) \quad \text{Principe de Carnot-Clausius}$$

Bouasse justifie cette présentation par une remarque :

« Je ne donne aucune démonstration ni théorique ni expérimentale des deux principes : il est logiquement impossible de procéder autrement. »²⁴¹

²³⁷ (Bouasse, 1907) Avant-propos p.1

²³⁸ « Nous avons expliqué dans le Cours de Mathématiques en quoi consiste le principe d'équivalence... » (Bouasse, 1907) p.8

²³⁹ ou plus succinctement transformation réversible

²⁴⁰ (Bouasse, 1907) p.5

²⁴¹ (Bouasse, 1907) p.10

Aussi, une fois les principes posés, Bouasse les applique immédiatement au cycle de Carnot et comme dans le cours du secondaire, introduit la notion de *potentiel thermodynamique*. Bouasse ne fait en revanche pas référence à la dégradation de l'énergie, renvoyant probablement le lecteur aux ouvrages du secondaire.

L'objectif affiché dans le titre, est de donner un formalisme complet de la thermodynamique et Bouasse de rappeler : « *Nous prions le lecteur de se familiariser avec les diverses formes de quotients différentiels dont la claire intelligence est nécessaire dans l'étude de la thermodynamique.* »²⁴² Ceci n'empêche pas l'utilisation de diagrammes (notamment pression-volume) pour appuyer les développements mathématiques.

Alors qu'il consacrait une vingtaine de pages à la description des machines à vapeur et à explosion dans son ouvrage du secondaire²⁴³, Bouasse ne développe pas les machines thermiques²⁴⁴ et se limite uniquement à la conclusion issue du cycle de Carnot :

« *Le rendement est donc absolument indépendant du corps qui sert à la transformation, il ne dépend que des températures entre lesquelles elle s'effectue [...] il repose seulement sur l'hypothèse que les transformations sont réversibles : c'est alors que le rendement est maximum.* »²⁴⁵

Conformément au programme de l'agrégation, Bouasse développe la théorie cinétique des gaz dans un chapitre qui lui est entièrement consacré. Il fait notamment référence au travail de Clausius pour le calcul de la pression cinétique et développe les hypothèses statistiques de Maxwell et Boltzmann. Il juge en outre, que le mouvement brownien est une « *preuve expérimentale directe de la théorie cinétique.* »²⁴⁶ Il admet également que « *dans la théorie cinétique, on considère les gaz comme constitués par des molécules animées d'une vitesse fonction de la température.* »²⁴⁷ De plus, Bouasse tient à relier la thermodynamique des principes avec la théorie cinétique des gaz. Il présente le calcul de la vitesse d'écoulement d'un gaz sans soustraction ni addition de chaleur. Or, selon les résultats obtenus par l'application de la thermodynamique, il conclut de la manière suivante : « *il n'y a jusqu'à présent aucun désaccord entre [la théorie cinétique des gaz] et les résultats de l'expérience [obtenus par application des principes].* »²⁴⁸

Néanmoins, les points relatifs à la théorie cinétique se concentrent globalement sur ce chapitre. La physique des principes présentée dès le début de l'ouvrage, reste l'outil de base de

²⁴² (Bouasse, 1907) p.19

²⁴³ (Bouasse, et al., 1905) pp.107-127

²⁴⁴ Bouasse corrigera ce manque lors de la seconde édition complètement reformée avec un deuxième tome notamment consacré aux machines thermiques.

²⁴⁵ (Bouasse, 1907) p.12

²⁴⁶ (Bouasse, 1907) p.218

²⁴⁷ (Bouasse, 1907) p.33

²⁴⁸ (Bouasse, 1907) p.33

tous les développements et toutes les interprétations proposées par Bouasse. Il donne ainsi à la thermodynamique une organisation basée sur les principes, alors que le programme se contentait d'une juxtaposition de faits. Cet aspect est sans doute l'explication du succès de ses ouvrages au cours du 20^{ème} siècle. En effet, il n'est pas rare de retrouver aujourd'hui encore, dans les bibliothèques des lycées les ouvrages de Bouasse, tant son travail, est considéré comme une référence pour la formation des enseignants, les étudiants et pour les auteurs.

V. BILAN DE LA REFORME DE 1902

1. Un bilan pour les filières scientifiques

Un des points de réussite de la réforme de 1902 est le succès de la section sciences du second cycle montrant un véritable attrait pour la science. En effet, la section C représente 49% des effectifs sur les lycées parisiens et 42% dans vingt-huit lycées des départements²⁴⁹ où l'enquête a été réalisée.²⁵⁰

La réforme de 1902 accorde aux sciences une place bien supérieure à celle qu'elles occupaient précédemment. Tout d'abord, la proportion horaire est en nette augmentation. Mais c'est aussi par la rupture avec l'esprit de l'enseignement scientifique ancien, qui montre la volonté de traiter les sciences au même rang que les lettres. Fondée sur l'enseignement des réalités et du concret, la réforme souligne l'importance de l'expérience et de la méthode inductive. Elle a pour ambition de montrer une science en train de se faire.

Mais, la liberté qui est laissée aux enseignants pour organiser notamment ces exercices pratiques, est dans le même temps une difficulté importante car aucun document pour aider à la mise en application de la réforme n'est paru. Aussi, la création en 1906 de l'Union des physiciens et la parution du bulletin dès 1907 apparaissent comme des solutions pertinentes : « *pour les professeurs de provinces isolés, [de] mettre en commun leurs vues et les difficultés* ». ²⁵¹

Cette liberté est un inconvénient majeur de la réforme des programmes de 1902 car l'absence d'instructions officielles détaillées et de commentaires précis du programme entraînent une inertie importante dans la rédaction des nouveaux documents innovants et dans l'objectif de la réforme. Ainsi, Buguet s'exprime en 1903 : « *il est probable que si les auteurs des programmes avaient*

²⁴⁹ *Quelques chiffres relatifs aux premiers résultats de la réforme de 1902, L'enseignement secondaire* n°12, juin 1903, Marcel Bernès, citation extraite de (Hulin, et al., 2000) p.61

²⁵⁰ Il faut néanmoins rappeler que le taux d'une classe d'âge obtenant le baccalauréat reste très faible il est de 1.1% en 1911. Le baccalauréat reste donc à la portée d'une très faible minorité, mais il est signe de distinctions capitales.

²⁵¹ Commentaire de Buguet dans le *Journal de physique élémentaire* de juillet 1902 à propos des *exercices pratiques du prochain régime*, citation extraite de (Hulin, et al., 2000) p.62

*prévu la ténacité avec laquelle les anciennes méthodes se sont perpétuées dans les livres neufs, ils auraient développé davantage leurs idées, dans les textes primitifs ou dans des instructions complémentaires. Ils ne l'ont pas fait, de peur d'amener trop vite une forme d'enseignement à allures définitives. »*²⁵²

En outre, si sur le papier la réforme se veut être le défenseur de la démarche expérimentale à dominante inductive, il est facile de constater que la représentation qui en est faite dans les manuels est basée sur une méthode globalement déductive. On pose le principe et on l'applique aux expérimentations, cela est d'autant plus vrai en thermodynamique avec les mesures calorimétriques et la prééminence des principes qui ne se démontrent pas. Et Bouasse conclut en 1913 « *UNE EXPERIENCE N'EST PAS EDUCATIVE EN SOIT ; ELLE NE LE DEVIENT QUE PAR L'ANALYSE QU'ON EN FAIT* »²⁵³ « *QU'ILS CESSENT DE CROIRE A LA POSSIBILITE DE REMPLACER LE RAISONNEMENT PAR L'EXPERIENCE, QU'ILS DONNENT ENFIN A L'EXPERIENCE SA PLACE EMINENTE, MAIS SUBORDONNEE. Il y a dix ans, je réclamaï pour elle : on a voulu me dépasser, et l'on est tombé dans l'erreur inverse.* »²⁵⁴

2. Un bilan sur l'enseignement de la thermodynamique

La thermodynamique apparaît dans les programmes du secondaire à travers deux grands thèmes que sont la thermométrie / calorimétrie et l'énergie. Si le programme de seconde se veut être une première approche des concepts de température, de chaleur et de mesures calorimétriques, le programme de terminale se veut plus ambitieux en intégrant les principes de la thermodynamique à travers l'équivalent mécanique de la chaleur, la conservation de l'énergie et l'idée de dégradation de l'énergie. En revanche, l'introduction de la conservation de l'énergie dans les programmes du secondaire notamment, comme principe, montre une méthode contraire à la méthode inductive qui est préconisée par la réforme. Elle se justifie en revanche fort bien par son inspiration positiviste, qui voit au concept d'énergie un rôle unificateur : l'énergie se retrouve dans chaque branche des sciences physiques sous différentes formes : électrique, thermique, chimique... Mais l'interprétation des programmes étant laissée libre, le concept d'énergie est introduit de façon très différente selon les auteurs. Aussi, l'énergie peut être abordée par la mécanique et généralisée aux effets de la chaleur ou encore la conservation de l'énergie peut être présentée de manière générale puis appliquée à la mécanique. Enfin, la distinction entre énergie totale et énergie mécanique est au final peu explicitée. En conséquence, la volonté unificatrice souhaitée par Liard dans une conférence sur l'enseignement secondaire en 1904: «... *habituer les*

²⁵² Commentaire de Buguet dans le Journal de physique élémentaire de décembre 1903 à propos dans *interprétation des programmes*, citation extraite de (Hulin, 2000) p.63

²⁵³ (Bouasse, 1913b) p.XIV

²⁵⁴ (Bouasse, 1913b) p.XX

intelligences à ne pas penser par fragments, mais à comprendre que tout fragment n'est que partie d'un tout »²⁵⁵ est mise à mal par une approche fragmentaire.

Un autre point à souligner est que les auteurs ne se bornent pas aux programmes établis. En effet, ce dernier se résumant à une succession de notions, les auteurs ont une liberté d'interprétation et peuvent parfois proposer des développements bien plus importants que ceux qui auraient été attendus. Ainsi, comme nous l'avons vu, Bouasse introduit les concepts de la thermodynamique comme l'énergie interne et l'entropie alors que Chassagny donne quelques idées de la théorie cinétique des gaz.

Le programme des classes préparatoires reste quant à lui très peu ambitieux vis-à-vis du programme de terminale. La thermodynamique est peu développée et n'apparaît pas comme un point fort de l'enseignement et des concours. En revanche, l'évolution du programme de l'agrégation à la fin du 19^{ème} siècle et début du 20^{ème} siècle montre une volonté de combler le retard de connaissances dispensées vis-à-vis des avancées, notamment sur le concept d'entropie et sur la théorie cinétique des gaz qui ont eu lieu dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. On souligne également l'apport majeur de Bouasse dans ses *Cours de Physique* salués par de nombreux confrères, qui sont une référence dans le secondaire mais aussi dans le supérieur. Les cours de Bouasse, fortement liés à la thermodynamique des principes restent néanmoins quelque peu ouverts aux travaux récents de la mécanique statistique.

Dans cette première partie, nous avons présenté la réforme fondatrice de l'enseignement en France en nous concentrant notamment sur la thermodynamique. Nous avons notamment vu dans le premier chapitre la longue émergence des concepts de température, chaleur, énergie et entropie, qui ont abouties à faire de la thermodynamique une science de principes. L'énergie et sa conservation apparaissent au début du siècle comme des idées fondatrices et unificatrices de la physique, notamment dans les programmes du secondaire. L'énergie est présentée sous ses différentes formes : mécanique, électrique, chimique, thermique... et sa conversion est dictée notamment par le principe de Carnot.

La seconde partie de ce travail aborde la problématique de l'enseignement de la thermodynamique sur une longue période allant de 1912 à la fin des années 60. Ce découpage repose, comme nous allons le voir sur des modifications très lentes et progressives des contenus des programmes de thermodynamique au cours de ces années. Pourtant, des réformes vont être entamées durant cette période, que ce soit sur le plan organisationnel ou disciplinaire. En réalité, ce sont sur la présentation des programmes et leur interprétation dans les manuels que les évolutions majeures vont voir le jour. En outre, c'est également durant cette période que vont s'ouvrir de nombreuses discussions sur le langage à adopter. Enfin, c'est au cours des années 50 qu'un tournant important

²⁵⁵ *Les sciences dans l'enseignement secondaire*, Liard, 1904, Citation extraite de (Hulin, et al., 2000) p.248

va engendrer une nouvelle approche des concepts tels que la température, la chaleur et l'énergie interne. Ces questionnements et innovations conduiront notamment, comme nous le verrons dans la quatrième partie, à une refonte de l'enseignement de la thermodynamique au cours des années 70 et 80, puis une réorganisation au début des années 90.

PARTIE II

LA THERMODYNAMIQUE : EVOLUTIONS DE SON ENSEIGNEMENT EN FRANCE DE 1912 A LA FIN DES ANNEES 60

CHAPITRE 3

L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DE 1912 A 1947

La réforme de 1902 a permis de donner à l'enseignement secondaire une nouvelle structure tant sur le plan organisationnel que dans les contenus. Dans les années qui suivent, la réforme de 1902, même si elle reste une base solide, se voit modifiée par des révisions successives mais relativement mineures de l'enseignement : 1912, 1925 et 1931. L'objet de ce chapitre est de montrer à travers l'analyse des manuels du second cycle et du supérieur, l'évolution de l'enseignement de la thermodynamique autour notamment de l'introduction du concept de conservation de l'énergie au cœur des programmes.

Enfin, nous présenterons les refontes souhaitées par le régime de Vichy dans les années 1941 qui perdureront quelques années encore après la fin de la seconde guerre mondiale.

I. L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DANS LES ANNEES CONSECUTIVES A LA REFORME DE 1902

1. Les éléments contextuels des réformes de 1912 à 1941

a. L'organisation de l'enseignement

Sous la III^{ème} République (1870-1940), un véritable engouement des municipalités républicaines se crée en faveur des E.P.S. Ces écoles sont en effet conçues pour former un corps

d'élites républicains. Aussi, la croissance des effectifs des enseignements primaires est importante : réunis les E.P.S. et les C.C., à l'aube de la première guerre mondiale, ont un effectif dépassant celui de l'enseignement secondaire. Au début des années 1920, la différence entre le primaire supérieure et le premier cycle moderne des lycées s'amenuise. S'engagent alors, quelques réformes (dans un premier temps par souci économique) visant à encourager les collèges à créer une section d'E.P.S.

Les effectifs de l'enseignement secondaire ne progressent pratiquement pas de 1880 à 1930. Mais, les mesures prises notamment en faveur de l'*école unique*²⁵⁶ et du développement de l'enseignement féminin (notamment dans les années 1924-1928) permettent à la suite, une nouvelle augmentation des effectifs. En 1928-1929, les collèges et lycées comptent au total, 291 000 élèves (le taux d'une classe d'âge obtenant le baccalauréat est de 2.7% en 1936), ce qui est peu en comparaison avec les 4 millions d'élèves des écoles primaires. Les effectifs du secondaire sont en revanche comparables à ceux du primaire supérieur 172 000 élèves dans les C.C. et E.P.S. Aussi, l'enseignement secondaire autrefois réservé aux élites, s'oriente peu à peu vers l'enseignement de masse. En outre, en 1936, Jean Zay (1904-1944), alors ministre de l'Éducation nationale²⁵⁷ et des Beaux-Arts²⁵⁸ unifie les programmes du secondaire et du primaire supérieur.

Les années 1930 sont également une période de remise à plat de la délivrance du titre d'ingénieurs. Aussi en 1934²⁵⁹, la commission du titre d'ingénieurs (CTI) est créée avec pour objectif d'étudier toutes les questions relatives à la remise du diplôme. La CTI, constituée de membres nommés par le ministre, a notamment pour tâche de dresser la liste des écoles autorisées à délivrer le diplôme et à la publier au Journal officiel avec mises à jour régulières.

b. La réforme des sciences physiques dans le secondaire

Au début de l'année 1909, des instructions nouvelles sont adressées aux professeurs suite aux rapports d'inspection de Faivre-Dupaigre et de Chassagny. Ces notes entraînent une modification des programmes le 4 mai 1912 avec notamment une diminution de la dotation horaire des exercices pratiques (de 2 heures à 1 heure). La circulaire du 23 mai souligne que la réforme vise à alléger les programmes de physique dans les lycées notamment. En réalité, ce sont

²⁵⁶ Le 16 avril 1930 l'entrée en classe de 6e, cesse d'être payante. En 1933, la gratuité est étendue à la 5e, 4e et 3e. Le gouvernement de Vichy supprimera en 1941, ce principe de gratuité qui ne réapparaîtra qu'après la libération.

²⁵⁷ Le ministère de l'instruction publique est renommé ministère de l'éducation nationale en 1932.

²⁵⁸ Jean Zay contribuera entre autre à l'obligation scolaire jusqu'à quatorze ans.

²⁵⁹ Loi du 10 juillet 1934, sur les conditions de délivrance et d'usage du titre d'ingénieur diplômé. Paru au Journal officiel le 13 juillet 1934.

les programmes des sciences naturelles qui sont effectivement remodelés. En juin 1925²⁶⁰, une réforme structurelle est engagée, notamment motivée par la volonté de promouvoir davantage l'enseignement des sciences dans les différentes sections en leur conférant un programme de sciences commun : « *l'enseignement moderne ne [doit pas être un enseignement de « seconde zone », d'une valeur inférieure à celle de l'enseignement classique, mais que tous deux soient mis sur le même pied [...] il faut qu'il n'y ait qu'un seul enseignement secondaire, c'est-à-dire que les sections classiques et modernes ne diffèrent que par l'option langues anciennes et l'option langues vivantes* »²⁶¹. L'organisation de l'enseignement secondaire est alors refondue dans le second cycle : trois sections latin-grec, latin-sciences et langues vivantes-sciences conduisent aux deux baccalauréats de philosophie et de mathématiques et remplacent les quatre sections de 1902 : la section latin-langues disparaît totalement.

La réforme de 1912 ne modifie pas les thèmes abordés dans l'enseignement de la thermodynamique. La classe de seconde reste inchangée pour le thème "chaleur". Quant aux classes de philosophie et de mathématiques, l'énoncé du principe de Carnot est complété par son théorème. Il est intéressant de noter que la distinction entre *théorème* et *principe de Carnot* n'est pas précisée dans les programmes. Ce sont les manuels qui en donnent l'interprétation. Certains auteurs associent au principe de Carnot l'idée de *dégradation de l'énergie*. Le théorème de Carnot ferait, quant à lui, référence au rendement maximum obtenu sur une machine et cela indépendamment de la nature de l'agent. Mais, d'autres auteurs font le choix inverse. En outre, on peut également lire d'autres interprétations du principe de Carnot. C'est le cas par exemple de Bouasse qui n'hésite pas à présenter le principe de Carnot sous une forme proche de l'énoncé du deuxième principe proposé par Clausius : « *Par exemple, au lieu de poser comme principe de Carnot l'identité des rendements des cycles de Carnot entre les mêmes températures, indépendamment de l'agent, on prendra le postulat qu'il est impossible, sans qu'intervienne une opération équivalente, de transporter de la chaleur d'un corps chaud sur un corps froid. Les propositions sont logiquement identiques.* »²⁶²

L'allègement pour le module énergie ne vient que pour la classe de mathématiques où est supprimée « *l'idée de la dégradation de l'énergie* » ce qui d'un certain point de vue est un non-sens d'autant qu'elle est maintenue en classe de Philosophie mais seulement jusqu'en 1925. En effet, sous cette forme le deuxième principe de la thermodynamique se prête avec une particulière aisance à l'exposition. Selon Bernard Brunhes (1867-1910), il s'agit d'une formule simple qui se grave très bien dans les esprits : « *conservation et dégradation apparaissent ainsi comme les deux aspects de la loi générale des transformations de l'énergie : maintien de la quantité, perte de la*

²⁶⁰ Arrêté ministériel paru au journal officiel du 13 décembre 1923 et Rapport au président de la République par décret le 13 mai 1925 paru au BO n° 2563 du 1^{er} juillet 1925.

²⁶¹ (BO, 1er juillet 1925) p.6

²⁶² (Bouasse, 1913a) p.x

qualité »²⁶³. Néanmoins, cette réforme ne modifie pas non plus l'organisation globale de l'enseignement de la thermodynamique dans le secondaire qui, malgré la réforme du 30 avril 1931, perdure jusqu'en 1942. On peut noter néanmoins une référence au théorème ou à l'énoncé du principe de Carnot qui fluctue quelque peu. A titre d'exemple, le programme de la classe de mathématiques en 1925, utilise le libellé « *rendement d'une machine thermique – simple énoncé du principe et du théorème de Carnot* » alors que pour la classe de philosophie il est stipulé simplement « *machine thermique : rendement.* »²⁶⁴

2. La thermodynamique dans le second cycle

a. Le choix des auteurs

De 1902 à 1942, la thermodynamique est introduite en classe de seconde à travers la notion de *température*. La thermométrie apparaît comme le premier thème de la partie "chaleur" et la calorimétrie en est alors une application. Le thème énergie est, lui, toujours présent en classe de terminale. La question qui se pose est donc : Les manuels de sciences physiques ont-ils fait évoluer leur présentation des concepts de température, de chaleur et d'énergie ?

Pour cela, nous allons nous intéresser à quatre auteurs. Tout d'abord Chassagny, présenté dans l'analyse des programmes de 1902 avec qui nous avons comparé le travail de référence de Bouasse. Chassagny édite en 1917 les *Leçons élémentaires : classes de Philosophie A et B* et en 1918 le *Précis de physique : classes de seconde C et D*, conformément aux programmes de 1912. Nous étudierons également le *Nouveau cours de physique élémentaire* pour la classe de mathématiques de Faivre-Dupaigre publié en 1930²⁶⁵, conforme aux programmes de 1925 et le résumé *Aide-mémoire Physique* publié en 1929 de Henri Fraudet, également professeur au lycée Saint Louis, puis Inspecteur général honoraire de l'Instruction Publique. Enfin, nous étudierons le cours de Physique pour les classes de Mathématiques publié en 1930 de Frédéric Ollive (1853-1926) professeur dans un autre établissement parisien de renom : le Lycée Louis-Le-Grand. Cet ouvrage se démarque notamment par les nombreuses applications que Ollive propose dans son développement. En effet, la construction du cours se fait dans l'esprit d'une méthode inductive. De nombreux exemples et illustrations, s'appuyant sur des applications numériques, viennent généralement introduire les points théoriques importants présentés comme les conclusions de chaque partie.

²⁶³ (Brunhes, 1991) p.31

²⁶⁴ Extrait de l'Arrêté ministériel paru au Journal officiel du 13 décembre 1923 tirés de (BUP, février Mars 1924) p.172 et 174

²⁶⁵ Ouvrage coécrit avec J. Lamirand et E. Carimey, professeur de physique au Lycée Saint Louis

Il sera également possible qu'au cours de notre développement, nous précisions notre propos en faisant référence ponctuellement à d'autres ouvrages et auteurs.

b. La notion de température et de chaleur dans les manuels de seconde

Dans la première partie de ce 20^{ème} siècle, les auteurs de manuels introduisent dans les premières lignes la notion de température à travers les sensations du *chaud* et du *froid*. Le sens du toucher reste généralement pour les auteurs une première appréciation de la température, comme pour Fraudet dans le chapitre « *XI-Température. Thermomètre à mercure* » de son *Résumé-aide-mémoire de seconde* qui énonce : « *La notion de température nous est révélée par le sens du toucher [...] Le sens du toucher nous fait dire qu'un corps est chaud ou froid, qu'il a une température plus ou moins élevée ; il permet en principe de repérer la température d'un corps par rapport à celle d'un autre corps.* »²⁶⁶ Ce texte mérite d'être commenté et analysé soigneusement. Rappelons qu'Aristote, qui formula ses théories en termes de qualités sensibles, voyait dans le chaud et le froid deux qualités élémentaires opposées (Cf. Chapitre 1). Aujourd'hui encore, certains désignent par « chaleur » la propriété d'un corps d'être chaud au toucher. Or, la physique présentée par Fraudet emploie une terminologie légèrement différente en associant la propriété d'un corps d'être chaud ou froid non à la notion de chaleur, mais à celle de température. D'un autre côté, ces phrases sont ambiguës pour ne pas dire inexactes. En effet, ce qui est proposé est tout simplement un critère purement qualitatif et qu'il est complètement insuffisant pour une description quantitative. Pour le montrer, il suffit de citer l'expérience suivante bien connue par beaucoup de nos contemporains : Supposons trois vases contenant respectivement de l'eau froide, tiède et chaude. Si nous plongeons une main dans l'eau froide et l'autre dans l'eau chaude, nous recevons de la première le message qu'elle est froide et de la seconde qu'elle est chaude. Si ensuite nous plongeons les deux mains dans la même eau tiède, les messages que nous recevons de chaque main se contredisent. Heureusement, Fraudet nuance un peu plus tard dans son développement, son propos en ajoutant : « *les indications du sens du toucher nous donne sur la température ne sont valables que dans des limites peu étendues et elle sont peu précises* »²⁶⁷. Plutôt, faudrait-il dire qu'elles ne sont pas du tout précises : la température se repère de manière plus exacte à l'aide d'un thermomètre.

Ces affirmations se rapprochent de celles de Chassagny dans son ouvrage de 1904, mais la réédition de 1918 donne un point de vue beaucoup plus nuancé sur les perceptions données par nos sens. Ainsi on peut lire dans le « *Chapitre I Température* » de son manuel de seconde un long paragraphe destiné à mettre en garde le lecteur sur les ambiguïtés et manquements

²⁶⁶ (Fraudet, 1929) pp.24-25

²⁶⁷ (Fraudet, 1929) pp.24-25

qu'engendre le sens du toucher sur la conception que nous nous faisons de la température : « *C'est par le sens du toucher que nous recevons les impressions de chaud et de froid. Quand nous disons qu'un corps est plus chaud ou plus froid qu'un autre, nous traduisons une impression qui a pour nous un sens précis. Nous ne pourrions pas exprimer plus clairement cette impression à l'aide d'autres mots que les mots : chaud et froid. Toutefois, il serait impossible de faire une étude précise de la chaleur et des phénomènes qui s'y rattachent, à l'aide de ces seules impressions de froid et de chaud. En effet : 1° Nous n'avons pas assez de mots à notre disposition pour traduire les multiples impressions que nous ressentons au point de vue du chaud et du froid ; 2° Des corps très chauds ou très froids produisent des impressions très douloureuses et peuvent désorganiser nos tissus. On ne peut songer à les étudier avec le toucher ; 3° Les sensations de chaud ou de froid nous laissent des souvenirs trop fugitifs et trop peu précis. Elles nous exposeraient donc à des erreurs grossières. Chacun sait quelles divergences d'appréciation on rencontre quand il s'agit de savoir, à quelques jours de distance, si une journée est plus ou moins chaude qu'une autre ; 4° Enfin, le toucher est insuffisamment sensible. Cela veut dire qu'il ne nous permet pas de distinguer entre deux états calorifiques voisins et certainement différents. Plaçons un récipient contenant un ou deux litres d'eau sur un fourneau à gaz et, de minute en minute, plongeons-y le doigt. D'une fois à l'autre, il nous sera impossible d'affirmer que l'eau est devenue plus chaude et, pourtant, il est bien évident qu'elle s'est échauffée. En somme, le toucher est insuffisant pour l'étude précise des états calorifiques d'un corps. »²⁶⁸*

Mais dans son développement, Chassagny ne donne pas de définition de la température, il fait appel à la notion « *d'états calorifiques d'un corps* », notion déjà présente dans son ouvrage de 1904. Là encore, cet état calorifique n'est pas défini et est supposé compris ou admis par le lecteur. Fraudet quant à lui, fait appel au concept de température comme caractéristique d'un état : « *la température est donc l'état, la chaleur est la cause* »²⁶⁹ qu'il compare à « *l'état physique d'un corps* » lui aussi sensible à la chaleur. L'introduction du mot chaleur se fait donc en rapport étroit avec la notion de température dans un lien cause-conséquence. Mais pour Fraudet comme pour Chassagny, température et chaleur se distinguent toutes deux par la mesure : « *La température n'est pas une grandeur mesurable* »²⁷⁰, la « *quantité de chaleur est une grandeur mesurable.* »²⁷¹

Le langage employé par Fraudet et Chassagny n'est pas identique lorsqu'ils abordent la notion de chaleur. Aussi, Fraudet utilise indifféremment l'appellation « *chaleur* » ou « *quantité de chaleur* », pour désigner ce qui peut modifier l'état d'un corps, c'est-à-dire sa température ou son état physique.

²⁶⁸ (Chassagny, et al., 1918) pp.179-180

²⁶⁹ (Fraudet, 1929) p.27

²⁷⁰ (Chassagny, et al., 1918) p. 186

²⁷¹ (Chassagny, et al., 1918) p.192

Chassagny privilégie l'association des termes « *quantité de chaleur* » comme le suggère explicitement le programme officiel, plutôt que le mot *chaleur* qu'il emploie trois fois, comme dans « *action de la chaleur.* »²⁷²

En revanche, Chassagny considère que la notion de quantité de chaleur mérite d'être développée. Aussi pose-t-il la question en débutant son chapitre consacré à la calorimétrie « *Qu'est-ce qu'une quantité de chaleur ?* » La réponse qu'il donne n'en est pas une. Il se contente de signifier qu'une quantité de chaleur est une grandeur qui peut s'échanger entre des corps et qui est mesurable par les méthodes calorimétriques.

La calorimétrie est d'ailleurs le bon vecteur pour introduire en thermodynamique, les expériences chères à la réforme de 1902 et confirmées par les réformes successives. Mais la méthode proposée dans les manuels de Fraudet ou de Chassagny n'est clairement pas inductive et donc en désaccord avec les suggestions des réformes. Les auteurs proposent une « *équation calorimétrique* »²⁷³ qui découle de « *Principes fondamentaux sur les échanges de chaleur entre les corps. Les méthodes calorimétriques reposent sur des principes très simples.* »²⁷⁴ Chassagny les énonce ainsi :

« *Premier principe : Nous admettons que :*

S'il faut fournir à un corps une certaine quantité de chaleur pour lui faire subir une " transformation déterminée (l'échauffement, fusion, vaporisation), la transformation inverse abandonnera exactement la même quantité de chaleur.

Un litre- d'eau, qu'on chauffe de 20° à 30°, exige une quantité de chaleur égale à celle qu'il abandonne, en se refroidissant de 30° à 20°.

Un kilogramme d'eau exige, pour se vaporiser, une quantité de chaleur précisément égale à celle qu'abandonne la vapeur en se condensant et en reprenant l'état liquide.

Deuxième principe : (Principe des mélanges). Nous admettons que :

Lorsqu'on met en contact plusieurs corps à des températures différentes, la quantité de chaleur abandonnée par ceux qui se refroidissent, est égale à la quantité de chaleur absorbée par ceux qui s'échauffent. »²⁷⁵

En réalité, l'introduction de la calorimétrie en seconde est délicate dans la mesure où les concepts énergétiques ne sont pas développés. Aussi, les auteurs font admettre « *certaines principes* » pour établir les bilans calorimétriques, sans préciser, en plus, que ces bilans ne sont valables que dans des conditions isobares ou isochores. Ils préfèrent alors adopter une démarche déductive, laissant sous-entendre en conséquence que *la chaleur se conserve*. Dans le livre de seconde de Bouasse, il faut noter avec quelle prudence il introduit la calorimétrie et la

²⁷² (Chassagny, et al., 1918) p.188

²⁷³ (Fraudet, 1929) p.29

²⁷⁴ (Chassagny, et al., 1918) p.194

²⁷⁵ (Chassagny, et al., 1918) p.194

« conservation de la chaleur ». Dans ce cadre, il signale : « dans les échanges de chaleur par conduction, convection et rayonnement, la chaleur se conserve malgré les variations de température. Si la chaleur était de la matière, ce serait évident ; mais nous avons vu que, dans certains phénomènes, elle peut être créée ou détruite. Nous faisons donc bien une hypothèse en admettant qu'elle se conserve dans les conditions qui viennent d'être précisées. »²⁷⁶

En définitive, les concepts de température et de chaleur introduits en classe de seconde ne sont pas objectivement définis ; les auteurs faisant généralement appels aux sens commun et pratique de ces termes. En revanche, l'introduction du concept d'énergie va permettre une nouvelle approche du concept de chaleur et de la température en classe de terminale.

c. Le concept de chaleur en classe de terminale

Les œuvres de Chassagny de 1917 et de Faivre-Dupaigre de 1930 suivent désormais l'organisation proposée dans le programme en introduisant le concept d'énergie dans un chapitre ou un livre qui lui est entièrement consacré : « Livre sixième : L'énergie et ses transformations »²⁷⁷ pour Faivre-Dupaigre et « Sixième partie : L'énergie et ses transformations »²⁷⁸ pour Chassagny.

Comme nous l'avons vu précédemment, le programme indique « Diverses formes d'énergie (mécanique, thermique, électrique, chimique, etc.) ». Si l'on retrouve les concepts d'énergie mécanique dans les deux ouvrages à travers l'énergie potentielle et cinétique, d'énergie électrique, d'énergie chimique, d'énergie lumineuse²⁷⁹, il en est différemment pour « l'énergie thermique ». En effet, chez Faivre-Dupaigre elle n'est pas immédiatement explicitée comme une forme d'énergie. Il introduit en premier lieu le concept de chaleur : « la chaleur se présente à nous comme ayant avec l'énergie mécanique une relation, au moins qualitative, analogue à celle que nous savons exister entre l'énergie potentielle mécanique et l'énergie cinétique. »²⁸⁰ Mais une certaine ambiguïté s'installe au fur et à mesure de la lecture. Ainsi, on peut lire chez Faivre-Dupaigre : « cette forme d'énergie [chimique] peut, en disparaissant, fournir autre chose que de l'énergie thermique... »²⁸¹, ou encore il y a « équivalence des formes mécanique et thermique de

²⁷⁶ (Bouasse, et al., 1930) p.175

²⁷⁷ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.81

²⁷⁸ (Chassagny, et al., 1917) p. 466

²⁷⁹ Chassagny et Faivre-Dupaigre parlent également de chaleur solaire (Chassagny, et al., 1917) p. 472, (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.160. En revanche Chassagny n'introduit plus la notion de « chaleur rayonnante » à laquelle il avait consacré un chapitre entier dans l'édition de son cours en 1904. (Chassagny, 1904) p.716 mais parle de « rayons calorifiques » (Chassagny, et al., 1917) p.316

²⁸⁰ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.101

²⁸¹ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.103

l'énergie »²⁸². *In fine*, aucun lien explicite n'est établi entre chaleur et énergie thermique. L'auteur laisse ainsi probablement sous-entendre au lecteur que les deux concepts sont *a priori* identiques. En revanche, Chassagny présente « *l'énergie thermique* » comme une forme d'énergie et conclut : « *Nous devons donc regarder la chaleur comme une forme particulière d'énergie ; c'est l'énergie thermique.* »²⁸³ On trouve également chez Chassagny « *énergie calorifique* »²⁸⁴ présentée comme un synonyme de chaleur ou d'énergie thermique. Enfin, il est à noter que contrairement à son édition de 1904, Chassagny n'aborde plus la théorie cinétique des gaz pour définir la notion de chaleur.

Ollive utilise également l'appellation « *énergie calorifique* »²⁸⁵ pour désigner la chaleur. Il s'agit même du titre de son chapitre destiné à introduire le principe d'équivalence. Il précise « *le théorème des forces vives*²⁸⁶ *est en défaut quand il y a apparition ou disparition de chaleur* »²⁸⁷. Ollive utilise préférentiellement le mot chaleur (l'expression *énergie calorifique* n'étant finalement employée que dans les titres) et précise clairement : « *la chaleur n'est pas un fluide* »²⁸⁸ sans pour autant donner sa nature. Il se contente de la présenter comme une forme d'énergie mise en jeu dans les « *échanges* »²⁸⁹.

Le grand nombre d'appellations utilisées pour désigner le concept de chaleur (auxquelles on peut ajouter le terme « *quantité de chaleur* ») est le signe d'un malaise chez les auteurs à présenter la thermodynamique de manière claire et concise. En réalité, cette richesse du vocabulaire constitue d'énormes problèmes sémantiques et qui d'un point de vue pédagogique se traduit par une montagne d'obstacles presque infranchissable par les étudiants. Ce qui finalement explique pourquoi certains enseignants et étudiants gardent de mauvais souvenirs de l'enseignement de la thermodynamique. D'abord, si les mots « calorifique » et « thermique » utilisés dans les expressions « énergie calorifique », « énergie thermique », « phénomènes calorifiques », « phénomènes thermiques » ou encore « effet thermique » et « effet calorifique » sont littéralement synonymes et ayant rapport à la chaleur, il n'en est pas de même chez tous les scientifiques ou d'autres auteurs.

On peut citer, par exemple, Emilio Damour (1862-1940), Jean Carnot(1881-1969) & Etienne Rengade (1875-1947) qui ont écrit dans leur ouvrage de 1912, *Les sources de l'énergie calorifique* :

²⁸² (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.104

²⁸³ (Chassagny, et al., 1917) p.471

²⁸⁴ « *Toutes les formes d'énergie, quelles qu'elles soient, tendent, en se transformant, à prendre la forme calorifique* » (Chassagny, et al., 1917) p.488. L'expression « énergie calorifique » se retrouve également dans le livre de mathématiques de Bouasse, (Bouasse, et al., 1905) p.128

²⁸⁵ (Ollive, 1930) pp.127-149

²⁸⁶ Note de bas de page : « *ou théorème de l'énergie cinétique.* »

²⁸⁷ (Ollive, 1930) p.127

²⁸⁸ (Ollive, 1930) p.176

²⁸⁹ Le mot apparait en italique dans le texte d'Ollive, pour illustrer le principe d'équivalence. (Ollive, 1930) p.129

« L'énergie calorifique dégagée par l'oxydation des combustibles, n'est qu'une des manifestations de l'énergie chimique : nous lui consacrons un chapitre spécial immédiatement suivi de l'étude de l'énergie thermique ou chaleur sensible, parce que, dans les fours utilisant les combustibles, ces deux chaleurs, sensible et latente, sont si étroitement liées, si interchangeables, souvent par des équilibres réversibles, qu'il serait impossible de les disjoindre »²⁹⁰. Ce texte montre clairement que « chaleur », « énergie thermique » et « énergie calorifique » ne sont pas synonymes et qu'il existe deux types de chaleur. L'énergie thermique correspond à la chaleur sensible c'est-à-dire celle présentée habituellement par l'expression algébrique $Q = m c \Delta T$. Par contre les auteurs ne disent rien sur ce que représente l'énergie calorifique. On peut néanmoins retrouver une remarque sur ce concept dans un ouvrage plus ancien. En effet dans ses leçons de thermodynamique professées à la Sorbonne, entre 1895 et 1896, Henri Pellat (1850-1909) donne quelques éclaircissements : « *Echauffons un corps en maintenant son volume invariable : le travail des forces extérieures agissant sur ce corps est nul, la relation générale $\Delta U = JQ - W$ se réduit donc à $\Delta U = JQ$. Si on a fourni de la chaleur au corps, Q est positif; donc ΔU est positif, il y a eu accroissement d'énergie quand on a fourni de la chaleur au corps. Nous appellerons cette forme d'énergie énergie calorifique. Nous avons défini la chaleur par : « ce qui est en plus dans un corps qui est devenu plus chaud » nous voyons maintenant que ce qui est en plus dans le corps, c'est une certaine quantité d'énergie calorifique. Quantité de chaleur ou énergie calorifique sont donc une même grandeur, mais évaluées avec des unités différentes : la quantité de chaleur s'évalue en calories, l'énergie calorifique s'évalue avec l'unité de travail mécanique ... »²⁹¹ Malheureusement, Pellat traite la chaleur comme un contenu énergétique au même titre que l'énergie. Et quand il dit que « Quantité de chaleur ou énergie calorifique sont donc une même grandeur » ; la grandeur dont il s'agit est évidemment la chaleur. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que l'énergie calorifique n'est dans ce cas qu'un cas particulier de la chaleur puisqu'elle est définie à partir du premier principe de la thermodynamique dans les conditions où le travail est nul. Ceci est dit clairement en 1928 par Héloïse Henri Ollivier (1879-19 ??) dans son livre *Cours de physique générale* : « Il peut arriver que la transformation se réduise à un dégagement ou une absorption de chaleur, le travail t étant nul ; l'énergie interne s'appelle alors, si l'on veut employer une tournure elliptique : énergie calorifique. »²⁹²*

Par ailleurs, le mot « calorifique » fait référence à la chaleur en tant que substance (le calorique) et selon Jules Moutier (1829-1895) c'est aussi le cas pour l'expression « *quantité de chaleur* » : « L'expression *quantité de chaleur* est empruntée à l'hypothèse du calorique »²⁹³; ce qui n'est visiblement pas le cas avec le mot « thermique ». Cependant, comme ce dernier mot

²⁹⁰ (Damour, et al., 1912) p.10

²⁹¹ (Pellat, 1897) p.61

²⁹² (Ollivier, 1928) p.24

²⁹³ (Moutier, 1885) p.52

apparaît de plus en plus dans des livres récents de la thermodynamique, nous reviendrons dans les prochains chapitres à sa signification dans l'expression « *énergie thermique*. »

Finalement, définir la chaleur de manière claire et précise semble une difficulté importante. C'est pourquoi, nous proposons de voir dans la suite si le principe de conservation de l'énergie peut être un moyen pour les auteurs de présenter différemment le concept de chaleur.

d. Le concept d'énergie : conservation

Le concept de chaleur se retrouve dès que les auteurs abordent le principe d'équivalence. Mais les présentations pour aborder ce principe diffèrent selon les ouvrages, comme c'est le cas chez Chassagny et Faivre-Dupaigre.

Influencé par Bouasse, Faivre-Dupaigre introduit le concept d'*énergie interne*, qu'il présente comme « *une nouvelle forme d'énergie* »²⁹⁴, notion qui n'est toujours pas introduite chez Chassagny. Cette introduction a une conséquence majeure dans la façon d'aborder le principe de conservation. Aussi Faivre-Dupaigre présente : « *D'une manière générale, si un système se transforme, et que pendant la transformation il reçoive du milieu extérieur une quantité de chaleur Q ; si d'autre part, δU représente la variation de son énergie interne, et W le travail que le système accomplit contre les forces extérieures, on pourra écrire l'équation $Q = \delta U + AW$ [... qui] sera l'expression correcte du principe de la conservation de l'énergie* »²⁹⁵. Cet énoncé très général du principe de conservation, Faivre-Dupaigre l'applique alors aux cas des cycles fermés « *$Q = AW$ [faisant de] ce théorème [...] un cas particulier de principe de la conservation de l'énergie et que l'on doit appeler proprement le principe d'équivalence de la chaleur et du travail.* »²⁹⁶ Un principe finalement que Faivre-Dupaigre vient de démontrer !

La démarche proposée par Chassagny est toute autre. Le chapitre III intitulé « *principe de l'équivalence* » commence ainsi : « *L'un des plus grands progrès qui aient été réalisés dans le développement des sciences expérimentales a consisté à étendre progressivement [Le principe de la conservation de l'énergie mécanique] à tous les modes d'énergie connus. C'est là, pour le philosophe, un sujet de méditations intéressantes sur le rôle important que jouent l'induction et la généralisation dans la méthode des sciences physiques. Les expériences de Joule sont de celles qui ont le plus contribuées à l'extension du principe de la conservation de l'énergie. De ces expériences résulte que : de quelque façon que l'on transforme l'énergie mécanique en chaleur, que ce soit par le frottement ou le choc, ou par tel autre procédé, la quantité de chaleur produite est toujours proportionnelle au travail disparu. Sous cette forme particulière, le principe, qui*

²⁹⁴ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.109

²⁹⁵ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.109

²⁹⁶ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) pp.109-110

nous occupe, est habituellement désigné sous le nom de : Principe de l'équivalence. »²⁹⁷. Chassagny poursuit alors par « Généralisation du principe de l'équivalence » qui dans « sa forme la plus générale, [...] porte le nom de principe de la conservation de l'énergie. »²⁹⁸

On voit dans la démarche de Chassagny une volonté d'approcher le principe par une méthode inductive à partir des expériences de Joule qu'il décrit. Il généralise le principe d'équivalence en principe de conservation de l'énergie. Sa démarche s'écarte d'autant plus de celle de Faivre-Dupaigre par l'absence de mathématisation des principes.

Si Ollive choisit également une démarche inductive pour présenter le principe d'équivalence (il présente notamment l'expérience de Joule qu'il décrit de manière quantitative) , il introduit le concept d'énergie interne pour présenter le principe d'équivalence sur des cycles non fermés : « lorsqu'un système matériel passe de l'état initial A à l'état final B , il y a entre la quantité de chaleur Q calories et la quantité d'énergie de forme quelconque τ échangées entre le système matériel et le milieu ambiant une relation générale de la forme :

$$JQ - \tau = \text{constante}$$

Cette constante ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système. Elle est indépendante des transformations intermédiaires. On lui donne le nom de variation d'énergie interne du système matériel. »²⁹⁹ Mais, la manière dont le principe est écrit peut porter à confusion. L'appellation constante pour désigner la quantité $JQ - \tau$ n'est pas tout à fait exacte, il s'agit plutôt du fait que cette quantité ne dépend pas du chemin suivi mais peut varier d'une transformation à une autre. En outre, Ollive ne définit pas l'énergie interne dans l'énoncé du principe d'équivalence. En revanche, à la fin du chapitre consacré au principe de Carnot, Ollive en donne une interprétation moderne : « on admet qu'un corps est à une température d'autant plus élevée que ses molécules sont animées d'un mouvement plus rapide, possèdent une énergie interne plus grande. Emprunter Q calories à un corps, c'est diminuer son énergie interne de JQ »³⁰⁰ Cette interprétation permet à Ollive de distinguer le concept de chaleur, comme grandeur d'échange et d'énergie interne comme énergie stockée au sein d'un système. Pourtant, le raisonnement de Ollive est insuffisamment développé et peut engendrer des confusions. Le lien entre température et chaleur laisse sous-entendre que le volume du corps reste constant. Aussi quand T augmente, U augmente et en vertu du premier principe si on enlève Q au système l'énergie interne de celui-ci diminue à l'unique condition que le travail soit nul !

²⁹⁷ (Chassagny, et al., 1917) p.474

²⁹⁸ (Chassagny, et al., 1917) p.476

²⁹⁹ (Ollive, 1930) p.139

³⁰⁰ (Ollive, 1930) p.177

e. Transformation de chaleur en travail : les machines thermiques

« Nous savons déjà que l'on peut créer du travail en détruisant de la chaleur. Rien ne fera mieux ressortir ce fait qu'une étude, même sommaire, des machines thermiques utilisées par l'industrie. »³⁰¹

Ainsi s'exprime Chassagny dans l'introduction de son cours sur la transformation de chaleur en travail illustrée sur les machines à vapeur et moteurs à explosion.

Aussi bien Chassagny, Ollive que Faivre-Dupaigre, les auteurs détaillent les éléments constitutifs des machines. Pour estimer le rendement de telles machines, Chassagny énonce simplement le principe et le théorème de Carnot : « *Ce rendement maximum est indépendant de la nature de l'agent de transformation (Théorème de Carnot) ; et ne pourrait d'ailleurs être atteint que pour un cycle particulier de transformations qu'on appelle le cycle de Carnot. Nous ne chercherons pas à préciser en quoi consiste le cycle de Carnot : il nous suffira de savoir qu'il serait pratiquement irréalisable et qu'il ne peut être employé ni dans la machine à vapeur, ni dans le moteur à explosions.* »³⁰² On peut alors se demander quel est l'intérêt de présenter ce théorème ? En effet, Chassagny n'insiste pas sur l'importance des transformations du cycle de Carnot. Sans cette connaissance, il sera difficile pour un élève de comprendre en quoi une machine réelle ne pourra jamais atteindre le rendement maximal.

Faivre-Dupaigre en revanche, signale que le principe d'équivalence est insuffisant pour illustrer la limitation du rendement et qu'il est nécessaire d'introduire un autre principe. Mais il se contente de l'énoncé du principe et du théorème de Carnot, comme cela est suggéré dans le programme. Pourtant, malgré son approche mathématique des principes, il ne montre pas la complémentarité des deux principes de la thermodynamique (conservation et dégradation) comme a pu le faire Bouasse.

L'étude des machines thermiques est en outre, une occasion de proposer les représentations graphiques, pour illustrer la thermodynamique sans recours à un formalisme développé. Aussi, Ollive et Faivre-Dupaigre s'appuient sur les représentations donnant les cycles de fonctionnement dans le diagramme indicateur (pression-volume) et dans le diagramme indicateur de Watt (Cf. Figure 20). Le travail total effectué par la vapeur (dans le cas d'une machine à vapeur) correspond à l'aire de la courbe dans le diagramme (pression, volume).

³⁰¹ (Chassagny, et al., 1917) p.477

³⁰² (Chassagny, et al., 1917) pp.486-487

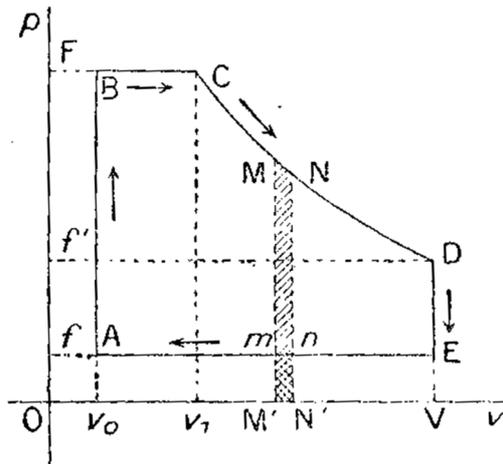


Fig. 72.

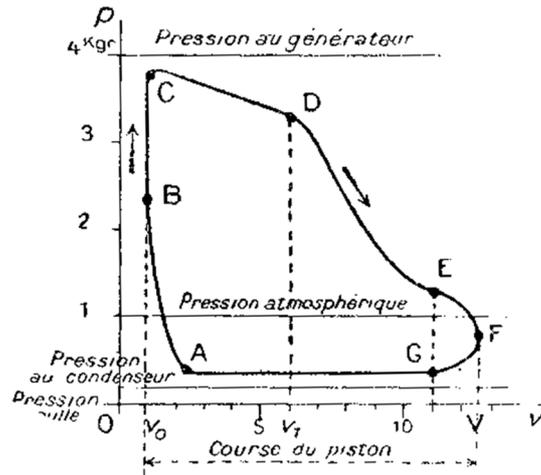


Fig. 75.

Figure 20 Diagrammes indicateurs du travail dans une machine à vapeur³⁰³

Faivre-Dupaigre conclue : « Le diagramme que nous avons tracé est purement théorique ; la courbe obtenue au moyen de l'indicateur en diffère notablement en pratique [...] le travail moteur est donc diminué [...] le travail résistant [...] est augmenté [ceci est dû] aux déficiences de l'admission et de l'échappement, ainsi que sur les accidents qui peuvent survenir aux organes de distribution »³⁰⁴ : ce qui limite en conséquence le rendement pratique des machines par comparaison au rendement théorique déjà limité par le principe de Carnot-Clausius. Cette approche graphique répond ainsi aux exigences initiales du programme de 1902 et qui sont également confirmées dans les réformes suivantes. En effet, les consignes suggèrent qu'à chaque fois que cela est possible, l'enseignant doit illustrer les notions présentées par des outils mathématiques de représentation ; le chapitre sur les machines thermiques en est une excellente opportunité.

f. Le concept d'énergie : dégradation

Le programme sur l'énergie en classe de terminale évolue finalement peu dans les années post 1902. Mais la façon d'aborder le contenu peut varier énormément selon les auteurs, comme nous venons de le constater. La seule mutation notable des programmes en classe de terminale est la disparition de « l'idée de la dégradation de l'énergie » malgré le maintien des machines thermiques et du principe et/ou théorème de Carnot.

Or dans l'introduction de son *Cours de Thermodynamique de 1913*, Bouasse juge très sévèrement l'« idée de... ». On peut ainsi lire à propos de « l'idée du facteur de puissance » : « le

³⁰³ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.144 et p.148

³⁰⁴ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) pp.148-149

mot d'ordre est aujourd'hui d'être superficiel, de parler de tout, de remplacer le raisonnement par de vagues expériences. Oh ! ne vous récriez pas. Je lis dans l'arrêté ministériel du 4 mai 1912 (programme de Mathématiques A et B) : « idée du facteur de puissance. » voilà le résumé de leur pédagogie, l'aboutissement de trente ans d'égarement : ils veulent qu'on donne « l'idée d'un cosinus » que sans calculs ; on fournisse aux élèves des « notions » sur les courants alternatifs ! » et il poursuit « Après cela, tirons l'échelle : que pourront-ils inventer de plus fort ? Le mot « principe » revient à chaque ligne dans leurs programmes : ils ont la prétention de traiter d'une manière élémentaire, SANS CALCULS, les questions les plus difficiles AU MOYEN D'EXPERIENCES IMPOSSIBLES A ANALYSER »^{305, 306} Mais cette critique s'applique-t-elle à la thermodynamique ? Chez les auteurs tels que Chassagny ou Faivre-Dupaigre la réponse est clairement non. Cette « idée de... » arrive comme la conclusion de leur chapitre consacré aux machines. Et bien qu'elle soit exclue du programme on peut lire chez Chassagny :

« Pour conclure, la science des transformations de l'énergie est donc régie par deux grands principes que nous pourrions énoncer sous une forme abrégée, en disant :

1° La quantité d'énergie se conserve (Principe de la conservation de l'énergie) ;

2° La qualité de l'énergie (sa puissance de transformation) se dégrade (Principe de Carnot). »³⁰⁷

Ou encore chez Faivre-Dupaigre :

« Il y dans le monde quelque chose qui se conserve, c'est la quantité d'énergie, mais il y a aussi quelque chose qui s'use, c'est la qualité de cette énergie. »³⁰⁸

Les auteurs ne suivent donc pas les consignes du programme d'autant que cette idée de dégradation de l'énergie permet de montrer que le principe de conservation n'est pas suffisant à la thermodynamique. La critique de Bouasse, peut-elle probablement se justifier par le fait que dans son manuel du baccalauréat Bouasse fait appel au concept d'entropie. Mais est-il réellement nécessaire pour amener l'élève à comprendre que « les diverses formes de l'énergie, équivalentes en quantité, peuvent donc être de qualités différentes »³⁰⁹ ?

Cette dégradation de l'énergie nous ramène encore vers le concept de chaleur et de sa représentation. La phrase de Faivre-Dupaigre : « la chaleur [...] a une tendance naturelle encore plus grande à se dégrader par rayonnement et conductibilité, elle se précipite d'elle-même pour

³⁰⁵ (Bouasse, 1913b). p.XX

³⁰⁶ On peut noter que l'appellation « idée de... » n'ait jamais employée dans les œuvres de Bouasse concernant la dégradation de l'énergie.

³⁰⁷ (Chassagny, et al., 1917) p.488. On retrouve une formulation proche de la présentation des principes résumée par Clausius en 1865.

³⁰⁸ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.157

³⁰⁹ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.156

descendre l'échelle des températures »³¹⁰ se rapproche de celle de Bouasse « la chaleur tend elle-même à se dégrader. En effet, la chaleur passe d'elle-même des corps chauds sur les corps froids, les températures tendent à s'égaliser. »³¹¹ La chaleur forme d'énergie serait donc elle-même de qualité supérieure à une autre énergie ? Quelle serait la forme d'énergie la plus dégradée ? La réponse que propose Bouasse ne peut pas satisfaire le lecteur « le monde va lentement, mais surement, vers un état de repos où toutes les formes de l'énergie seront transformées en chaleur. »³¹²

Enfin, cette dégradation sous-entend une hiérarchisation de l'énergie. Pour Ollive « les diverses formes d'énergie employées usuellement ne sont que des manifestations de l'énergie rayonnante qui nous est envoyée par le Soleil »³¹³. Cette énergie rayonnante est donc la forme la plus noble de l'énergie. Ainsi, parle-t-il de récupérer directement l'énergie rayonnante : « par une journée bien ensoleillée, un mètre carrée, éclairé normalement par les rayons solaires, reçoit une quantité d'énergie de l'ordre de 150kgm par minute ! L'état actuel de la science ne permet pas de tirer parti de cette énergie commodément et surtout avec un bon rendement. Nous en sommes réduits à utiliser l'énergie solaire à la croissance des végétaux et à faire ensuite brûler ceux-ci. »^{314,315}

En outre, Ollive estime que le progrès de la science permettra sans aucun doute d'améliorer l'exploitation de l'énergie : « En somme l'industrie moderne est une application journalière des transformations d'énergies les unes dans les autres. Au fur et à mesure que la science progresse, elle découvre des formes nouvelles d'énergie plus ou moins facilement utilisables au point de vue pratique. »³¹⁶

Si tous les auteurs nous font comprendre que l'énergie ne se perd pas et que dans l'énergie que possède un système isolé, livré à lui-même, il y a quelque chose qui se perd ; ils ne disent pas qu'est-ce que c'est ! Et pourtant Brunhes donnait déjà la réponse dans son livre : « Ce quelque chose, c'est peut-être précisément ce que bien des esprits croient voir-ou entrevoir- derrière le mot énergie. Ce n'est pas, à coup sûr, ce que le physicien appelle énergie : de cela, la dose reste invariable ; ce qui se perd, c'est l'énergie utilisable ; ce qui diminue sans cesse, c'est la fraction de l'énergie totale susceptible de servir à quelque chose. Si l'on a le droit de parler d'une quantité totale d'énergie fixe dans l'univers, on a le même droit de parler de l'énergie utilisable de l'univers

³¹⁰ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.157

³¹¹ (Bouasse, et al., 1905) p.129

³¹² (Bouasse, et al., 1905) p.129

³¹³ (Ollive, 1930) p.136

³¹⁴ Le kilogrammètre (kgm) est l'unité du travail mécanique tel que 1kgm représente le travail nécessaire à l'élévation d'une masse d'un kilogramme à la hauteur d'un mètre.

³¹⁵ (Ollive, 1930) p.136

³¹⁶ (Ollive, 1930) p.136

et d'affirmer que cette énergie utilisable est chaque jour moindre qu'elle n'était la veille. Il n'y a pas déperdition d'énergie, mais il y a dégradation de l'énergie. »³¹⁷

La situation est-elle meilleure dans le supérieur ?

3. La place de la thermodynamique dans le supérieur

a. Les programmes des classes préparatoires

Le programme des classes de mathématiques spéciales de 1903 est confirmé dans la circulaire relative au programme de la classe de mathématiques spéciales préparatoires parue au bulletin officiel le 3 novembre 1917³¹⁸.

Mais, l'année 1925 marque une modification importante des programmes de sciences physiques, notamment sous l'autorité de l'Ecole Polytechnique qui souhaite développer en classe de spéciale, l'électricité. Cette volonté est notamment motivée par le fait que l'étude des charges et des courants paraît indispensable à une époque où la considération des électrons pénètre de plus en plus la physique.

Ainsi, dans le Journal Officiel, du 1 juillet 1925, on ne peut que constater que, l'introduction de l'électricité entraîne un appauvrissement de la partie liée à la thermodynamique intitulée « *chaleur* ». (Cf. Figure 21)

³¹⁷ (Brunhes, 1991) p.37

³¹⁸ (BO, 3 novembre 1917) p.867

CHALEUR

Mesure des températures. Thermomètre normal. — Thermomètre à mercure (1).

Définition et mesure d'une quantité de chaleur. — Méthode des mélanges, corrections pratiques.

Résultats généraux des mesures des chaleurs spécifiques des solides, des liquides et des gaz à pression constante.

Lois de compressibilité et de dilatation des gaz. — Lois de Mariotte et de Gay-Lussac comme première approximation ; résultats des expériences d'Amagat ; réseaux d'isothermes.

Changements d'état. — Énoncé de la règle des phases et des lois du déplacement de l'équilibre.

Vaporisation, liquéfaction. — Courbes d'Andrews ; point critique. — Liquéfaction des gaz.

Ébullition d'un corps pur et d'un mélange de deux liquides. — Chaleur de vaporisation ; formule de Regnault pour l'eau (2).

Fusion et solidification. — Chaleur de fusion. — Dissolution, point d'eutexie.

Influence d'un corps dissous sur le point de fusion et sur le point d'ébullition, lois de Raoult.

Figure 21 Extrait du Programme de Mathématique spéciale, 1925³¹⁹

En effet, l'équivalence entre la chaleur et le travail ainsi que la détermination de l'équivalent mécanique de la calorie disparaissent. Seules subsistent « *la définition et la mesure de la quantité de chaleur.* » Aimé Auguste Cotton (1869-1951), au nom de la sous-commission des sciences physiques, explique ce choix au sujet de cette réforme : « *L'introduction de l'électricité au programme devait nécessairement entraîner des suppressions. On a été ainsi conduit à laisser de côté l'étude détaillée des instruments (le cathétomètre), toute la pesanteur (traitée d'ailleurs en grande partie dans le cours de mécanique), la capillarité, les expériences de Joule (traitées dans les cours de mathématiques élémentaires) et, dans la chaleur, des chapitres entiers : les dilatations et presque toute la calorimétrie.* »³²⁰

Aussi, la thermodynamique déjà auparavant peu développée en classes préparatoires, est désormais totalement privée de ses principes. Il apparaît donc nécessaire comme nous l'avions fait dans la partie précédente, de nous tourner vers les programmes de l'agrégation.

³¹⁹ (BO, 1er juillet 1925)

³²⁰ Rapport de Cotton citation extraite de (BUP, octobre 1925) p.27

b. La thermodynamique dans la formation des enseignants

La réforme de 1912 modifie l'organisation de la partie consacrée à la thermodynamique de l'agrégation des sciences physiques. Le mot *chaleur* disparaît du titre du paragraphe qui s'intitule désormais : « *Propriétés générales de la matière – Thermodynamique* »³²¹. La calorimétrie et la thermométrie disparaissent explicitement du programme, mais le principe d'équivalence, l'entropie et le principe de Carnot sont conservés. Les potentiels thermodynamiques sont quant à eux déconnectés des seuls changements d'état et sont traités au même rang que l'énergie et l'entropie. (Cf. Figure 22)

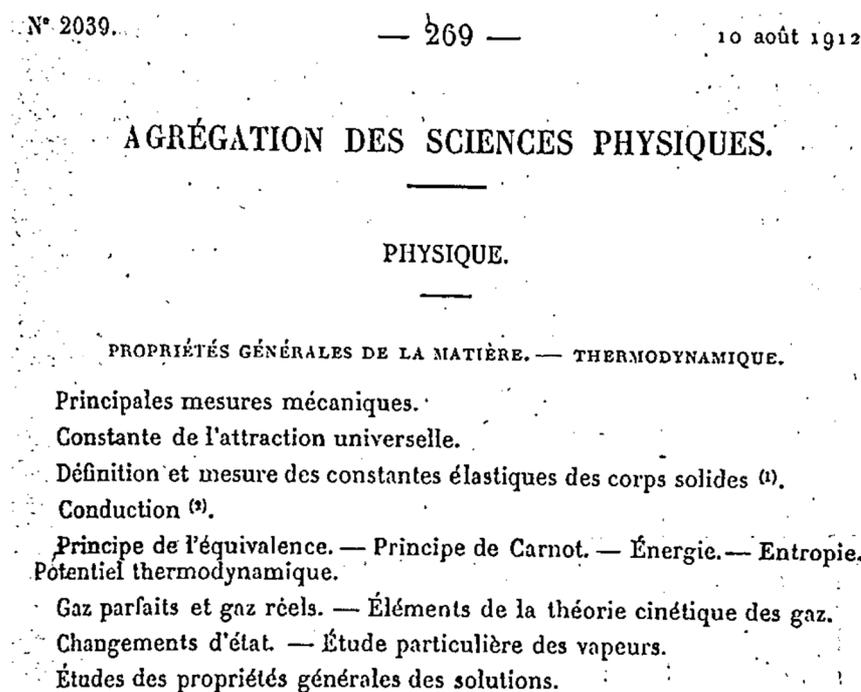


Figure 22 Extrait du programme de l'Agrégation des sciences physiques, 1912³²²

Il est à noter que dans le programme de l'agrégation de la section des sciences physiques et naturelles³²³ pour les Lycées et Collèges de Jeunes Filles, le mot « *chaleur* » reste présent mais dans une partie indépendante de la partie « *thermodynamique* ». Ainsi, dans la section « *chaleur* », on retrouve la thermométrie, la calorimétrie : « *définition et mesure d'une quantité de chaleur* », les changements d'états et la notion de gaz parfait. Alors que dans la partie « *thermodynamique* », on retrouve les bilans d'énergie comme le principe de conservation de l'énergie, pour lequel il est précisé sous « *forme analytique* » et présenté comme la généralisation du « *principe d'équivalence entre une quantité de chaleur et une quantité de travail mécanique* ». En outre, le programme développe volontiers les machines thermiques pour lequel il est précisé :

³²¹ (BO, 10 août 1912) p.269

³²² (BO, 10 août 1912) p.269

³²³ (BO, 17 août 1912) p. 335

« notions sur les machines thermiques (machines motrices et machines frigorifiques) ; cycle de transformations ; rendement. Principe de Carnot ; idée de dégradation de l'énergie. Théorème de Carnot : expression analytique ». Enfin, les changements d'état sont à nouveau présents mais cette fois en leur appliquant les « deux principes de la thermodynamique. »

Mais cette organisation n'est pas une généralité. En effet, dans le programme du certificat d'aptitude à l'enseignement du secondaire³²⁴, le mot “*thermodynamique*” est toujours absent alors que le mot “*chaleur*” reste omniprésent. Pourtant, on retrouve dans cette section : le principe d'équivalence, le principe de conservation de l'énergie (introduit postérieurement au principe d'équivalence), l'énergie interne et le principe de Carnot, concepts qui ne sont pas liés uniquement à la notion de chaleur.

En outre, l'idée de dégradation de l'énergie n'apparaît plus dans les programmes du secondaire comme nous l'avons vu mais reste présent dans les formations des enseignants. Il est à noter également, que la dégradation est absente de l'agrégation masculine au profit du concept d'entropie, qui lui en revanche n'est pas développé chez les jeunes filles. On peut se poser la question de ce décalage dans les programmes ...

Le 28 septembre 1918, les nouveaux programmes de l'agrégation des sciences physiques restent identiques, notamment pour la partie « *propriétés générales de la matière* » à ceux de 1912. (Cf. Figure 23) Mais, pour la première fois apparaît une référence aux programmes des classes du secondaire et du cycle préparatoire des classes de mathématiques spéciales, qui en outre n'évolueront quasiment pas jusque les années 1950 : « *Toutes les matières faisant partie des programmes de l'enseignement secondaire, premier cycle, second cycle et classe de mathématiques spéciales.* »³²⁵

³²⁴ (BO, 24 août 1912), p. 399

³²⁵ (BO, 28 septembre 1918), p.532

AGRÉGATION DES SCIENCES PHYSIQUES.

PHYSIQUE.

1° Toutes les matières faisant partie des programmes de l'enseignement secondaire, premier cycle, second cycle et classe de mathématiques spéciales;

2° Les matières du programme suivant :

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE. — THERMODYNAMIQUE.

Principales mesures mécaniques.

Constante de l'attraction universelle.

Définition et mesure des constantes élastiques des corps solides ⁽¹⁾.

Conduction ⁽²⁾.

Principe de l'équivalence. — Principe de Carnot. — Énergie. — Entropie.
Potentiel thermodynamique.

Gaz parfaits et gaz réels. — Éléments de la théorie cinétique des gaz.

Changements d'état. — Étude particulière des vapeurs.

Propriétés générales des solutions.

Figure 23 Extrait du programme de l'Agrégation de sciences physiques, 1918³²⁶

On constate que dans les programmes de l'agrégation de 1912 et 1918, les applications pratiques sont peu développées. Pourtant, les enseignants sont censés répondre aux exigences des réformes de l'enseignement secondaire sur la mise en application pratique de leurs cours. Aussi devront-ils se former en dehors des exigences des programmes, comme le soulignait déjà Bouasse en 1913 :

« La situation morale des professeurs des lycées est actuellement singulière. Poussés par l'opinion publique, ceux qui dirigent l'enseignement secondaire invitent à être concrets dans leurs cours, à ne pas négliger les applications, à fixer les idées de leurs élèves en rattachant la Physique aux phénomènes usuels. Louons ces messieurs de comprendre que les temps sont abolis où sans remords ni déchéance, le physicien se désintéressait des questions pratiques. Malheureusement, ils oublient de mettre les professeurs en état de suivre leurs excellents conseils. Ceux-ci ont devant eux des fils d'industriels habitués aux machines, [...] ou des fils d'ouvriers qui s'intéressent de naissance aux mécaniques [...] Or rien dans l'éducation reçue ne permet aux professeurs de répondre à la demande du renseignement le plus élémentaire, surtout de ne pas s'en laisser imposer par la science superficielle et de catalogue que donne la possession d'une machine dont on ignore la théorie. »³²⁷

³²⁶ (BO, 28 septembre 1918), p.532

³²⁷ (Bouasse, 1913b) Introduction pp. V-VI

Il est donc nécessaire pour compléter notre étude de consulter certains ouvrages destinés aux études supérieures pour appréhender la façon dont l'enseignement de la thermodynamique est dispensé.

4. L'évolution de l'enseignement de la thermodynamique à travers quelques manuels de l'enseignement supérieur

a. Le choix des auteurs

L'étude que nous allons proposer fait naturellement référence aux *Cours de Thermodynamique* 2^{ème} édition que Bouasse publie en 1913 et dont le contenu a été « complètement transformé et considérablement augmenté. »³²⁸ Nous allons également parcourir les ouvrages d'auteurs dont l'objectif d'enseignement dépasse celui des classes préparatoires, tant le programme de thermodynamique y est peu développé.

Aussi, nous aborderons le travail de Georges Bruhat (1887-1944). Spécialiste de l'optique, Bruhat publie son *Cours de physique générale* en quatre tomes : *Electricité* en 1924, *Thermodynamique* en 1926, *Optique* en 1930 et *Mécanique* en 1934. Dans ce cours, qui devient rapidement une référence pour les préparateurs (notamment par les nombreuses rééditions³²⁹), Bruhat y développe l'enseignement qu'il a dispensé à l'université de Lille et en deuxième et troisième année à l'École normale supérieure de jeunes filles comme suppléant de Jean Perrin.

Enfin, nous étudierons l'ouvrage de Edmond Brun (1898-1979) et Emile Jockey (18 ??-19 ??), tous deux agrégés de l'université, intitulé « *Chaleur classes de mathématiques spéciales* » publié en 1936. Cet ouvrage salué par Charles Fabry (1867-1945), membre de l'Institut et de l'Académie des sciences et auteur de la préface de l'ouvrage, apparaît comme nous allons le voir, comme une des premières volontés d'innovation dans l'approche de certaines notions de thermodynamique.

b. Le concept de température

Précédemment, nous avons montré que le concept de température est préférentiellement abordé par les sensations du chaud et du froid. Mais, l'imperfection de nos sensations tactiles ne permet pas d'avoir un jugement objectif. En revanche, la sensation visuelle permet de constater des modifications de propriétés d'un corps lorsqu'il est échauffé, et cela de façon totalement

³²⁸ (Bouasse, 1913a) Page de couverture. Le cours de Thermodynamique est désormais réparti en deux tomes : le premier est désormais consacré aux principes généraux, gaz et vapeurs et le second aux machines thermiques et à la chimie physique.

³²⁹ 2^{ème} édition en 1933, 3^{ème} édition en 1942, 4^{ème} édition 1947, puis 5^{ème} édition en 1962 reprise par Alfred Kastler (1902-1984), prix Nobel de physique en 1966, dont nous étudierons le contenu un peu plus loin, 6^{ème} édition en 1968...

objective. Les thermomètres peuvent alors jouer sur les phénomènes de dilatation pour repérer la température sur une échelle donnée. Mais, il existe autant de définitions de température que d'espèces de thermomètres. Aussi, en 1919, paraît au Journal officiel la loi fixant les unités de mesure à adopter. Pour la température il est ainsi énoncé : « *Le degré centésimal est la variation de température qui produit la centième partie de l'accroissement de pression que subit une masse d'un gaz parfait quand, le volume étant constant, la température passe du point 0 ° (température de la glace fondante) au point 100 ° (température d'ébullition de l'eau) tels que ces deux points ont été définis par la conférence générale des poids et mesures de 1889 et par celle de 1913.* »³³⁰ Cette loi offre donc une définition de l'échelle légale, mais comme l'énonce Brun, cette proposition pose problème « *puisque les gaz parfaits n'existent pas ; puisque l'utilisation, sous une pression extrêmement faible d'un gaz réel (qui dans ces conditions, s'identifie avec un gaz parfait) est impossible, comment atteindre la température légale ?* »³³¹ Aussi, l'on doit proposer une échelle pratique de températures concordant avec l'échelle légale. Les thermomètres à gaz (encombrant et au maniement long et délicat) servent à déterminer les points fixes qui étalonnent les thermomètres pratiques.³³²

Mais l'échelle de température ne définit pas en soi le concept de température. Aussi quelle définition donner à la température ? Les auteurs vont proposer deux réponses pour aborder le concept de température de façon indirecte.

L'interprétation microscopique du gaz basée sur la théorie cinétique des gaz parfaits est un choix possible pour présenter le concept de température (dite température absolue). Aussi Brun énonce « *l'énergie cinétique moyenne de translation d'une molécule [d'un gaz est] indépendante de la pression et indépendante de la nature du gaz [mais est] proportionnelle à la température absolue* »³³³ ; formulation que l'on retrouve chez Bruhat également³³⁴. Cette définition de la température est une conséquence de l'acceptation qu'un gaz est constitué de molécules en mouvement rapide et désordonné, dont on peut donner des propriétés moyennes indépendantes du temps, comme la pression ou encore la température.

L'autre choix est l'introduction du concept de température thermodynamique à travers le principe de Carnot ; faisant de la température une grandeur mesurable et non plus repérable. Aussi, les auteurs présentent la température thermodynamique à partir du concept de chaleur, comme le fait Bruhat dans son cours de 1926 :

³³⁰ Loi du 2 avril 1919 sur les unités de mesure. Version consolidée au 15 janvier 1948.

³³¹ (Brun, et al., 1936) p.305-306

³³² La conférence des Poids et Mesures de 1927 préconise l'emploi du thermomètre à résistance de platine (domaine -190° à 660°) du thermocouple platine-platine rhodié (600°-1063°) comme instruments d'interpolation, et le pyromètre optique au-delà de 1063° comme instrument d'extrapolation.

³³³ (Brun, et al., 1936) p.188

³³⁴ (Bruhat, 1926) p.231

« La définition de la température thermodynamique Θ est [...donnée par] le rapport des températures thermodynamiques de deux sources de chaleur est égale au rapport des quantités de chaleur échangées avec ces deux sources par un moteur thermique réversible fonctionnant entre elles :

$$\frac{\Theta_2}{\Theta_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$$

[...] l'échelle thermodynamique est définie par une propriété tout à fait générale et peut théoriquement être retrouvée à partir de n'importe quel corps ou de n'importe quel système de corps. [...] la température thermodynamique est identique à la température absolue définie à partir du thermomètre à gaz parfait. »³³⁵

Bruhat souligne en outre l'importance de cette définition de la température car la fonction entropie qu'il introduit dans le deuxième principe la fait intervenir directement.

Aussi le concept de température peut donc être abordé à travers le concept de chaleur. Il apparaît donc nécessaire de voir comment les auteurs présentent cette notion incontournable de la thermodynamique dans les ouvrages du supérieur.

c. Le concept de chaleur

Le concept de chaleur dans ce deuxième quart du 20^{ème} siècle, va connaître quelques évolutions majeures dans sa présentation et dans sa représentation. Bouasse fait de la chaleur une grandeur énergétique par principe, il énonce :

« Le principe d'équivalence consiste à admettre que la chaleur est une forme d'énergie. Peu importe pour l'instant sa véritable nature ni comment elle existe à l'intérieur des corps ; toujours est-il que l'on peut concevoir la transformation intégrale d'une certaine quantité de chaleur en une certaine quantité de travail, et inversement [...] le grand progrès réalisé au milieu du siècle dernier est d'avoir posé l'équivalence entre deux quantités au premier abord très différentes. »³³⁶

Ces deux quantités ont en commun qu'elles dépendent des états initial et final du système mais aussi de l'ensemble des états intermédiaires. Aussi des points de vue mathématiques, la différentielle du travail $d\tau$ ou de la chaleur dQ ne sont pas au même titre que l'énergie interne, des différentielles totales exactes³³⁷.

Chez Bruhat, le point de vue semble différent et beaucoup plus complexe. En effet, dans son cours de 1926, Bruhat utilise la notion d'« énergie calorifique » qu'il définit à travers un

³³⁵ (Bruhat, 1926) p.160, p.162

³³⁶ (Bouasse, 1913a) p.71

³³⁷ Au niveau du formalisme, rien ne distingue à cette époque une différentielle exacte et une différentielle non exacte. Nous verrons qu'une écriture distincte sera proposée plus tardivement. (Cf. Chapitre 4)

exemple : « le mercure chauffé dans l'état 1 possède une énergie calorifique U_1 que le mercure froid dans l'état 2 possède une énergie calorifique U_2 et qu'il nous cède en passant de l'état 1 à l'état 2 une quantité de chaleur égale à la diminution $U_2 - U_1$. »³³⁸

Puis Bruhat introduit le premier principe :

«

$$JQ + W = U_2 - U_1$$

La somme $JQ + W$ quantités de chaleur et de travail reçues par le système lorsqu'il passe d'un état à un autre, par des transformations au cours desquelles il n'échange avec le milieu extérieur que du travail et de la chaleur, est égale à la différence de valeurs que prend pour ces deux états une certaine fonction U des paramètres qui définissent l'état du système. Cette fonction U s'appelle l'**énergie** du système [...] l'énergie est la somme de l'énergie mécanique [elle-même somme de l'énergie cinétique et potentielle] et de l'énergie calorifique »³³⁹. Bruhat précise en outre « L'énergie calorifique se distingue toutefois de l'énergie cinétique mécanique ordinaire en ce qu'elle est une énergie cinétique d'agitation désordonnée. »³⁴⁰

L'ambiguïté apparaît lorsque Bruhat considère JQ comme « l'énergie calorifique que [le système] a reçu. »³⁴¹ La grandeur d'échange JQ « chaleur » devient alors une grandeur énergétique « énergie calorifique » caractérisant le système.

L'énergie calorifique de Bruhat s'identifie alors à l'énergie interne en l'absence de travail, il s'agit alors de la partie cinétique de l'énergie interne, comme on le voit dans l'expression « énergie cinétique d'agitation désordonnée ». Cette ambiguïté encourage certains auteurs à la prudence et deux questions apparaissent progressivement : peut-on qualifier réellement Q de forme d'énergie ? Le mot chaleur doit-il être conservé ?

L'ouvrage que propose Brun en 1936 apparaît comme original et profondément novateur comme le souligne Fabry dans la préface : « Sous le titre « Chaleur », les anciens ouvrages classiques de Physique exposaient des questions assez disparates formant un ensemble d'un médiocre intérêt. Les descriptions trop détaillées de mesures faites par des méthodes périmées, d'appareils qui ne sont plus que des pièces de musée, y tenaient une grande place, au grand ennui des élèves, et je n'ose pas dire des lecteurs, car seuls les candidats tenus par des programmes impératifs avaient le courage de les lire. Sous le même titre, MM. Brun et Jockey présentent une œuvre d'un tout autre niveau, où ils ont à la fois élargi la base, modifié heureusement l'ordre dans lequel les matières sont traitées, et modernisé la documentation »³⁴².

³³⁸ (Bruhat, 1926) p.103

³³⁹ (Bruhat, 1926) p.114-115

³⁴⁰ (Bruhat, 1926) p.240

³⁴¹ (Bruhat, 1926) p.116

³⁴² (Brun, et al., 1936), préface p.8

Dès le début de son ouvrage, Brun tient à avoir une précaution de langage. Aussi, pour illustrer la tendance à l'égalisation des températures lorsqu'un corps chaud et un corps froid sont en présence l'un de l'autre, il utilise l'appellation « *échanges thermiques* » et s'exprime en note de bas de page : « *prisonniers d'un vieux langage, nous sommes obligés d'utiliser très souvent des termes qui ne pourront être expliqués que plus tard et qui sont, d'ailleurs, le plus souvent impropres. Dans ce cas, la présence des guillemets veut dire que la signification littérale du terme ou de l'expression ne doit pas être recherchée.* »³⁴³

Bien que son ouvrage s'intitule chaleur, le mot n'apparaît qu'au chapitre III de l'ouvrage. Dans les faits, Brun distingue clairement le phénomène qu'il nomme « *échange thermique* » de son appréciation mathématique qu'il nomme « *quantité de chaleur Q mise en jeu par ces « échanges thermiques* » »³⁴⁴ et qui est définie à travers le principe de conservation de l'énergie pris sous la forme suivant :

« [...] quand il existe des « échanges thermiques » ; on [a] :

$$\tau + Q = U_B - U_A$$

Qui définit la quantité de chaleur Q mise en jeu par ces « échanges thermiques », puisque, par ailleurs τ et $U_B - U_A$ ont été définies [par respectivement la somme algébrique du travail électrique et du travail mécanique des forces extérieures et $U_B - U_A$ variation d'énergie interne du système »³⁴⁵

La chaleur Q est définie comme tout ce qui n'est pas travail et qui permet une variation de l'énergie interne d'un système³⁴⁶.

d. Du principe de conservation de l'énergie au premier principe

Le concept d'énergie interne est désormais présent dans la plupart des ouvrages. Les définitions s'accordent toutes sur celle énoncée par Bouasse en 1913 : « *Nous admettons que dans chaque état bien défini, l'unité de masse d'un corps contient une quantité bien déterminée d'énergie qui est son énergie interne ; nous la désignerons par la lettre U . Nous ne connaissons par expérience directe ni sous quelle forme (potentielle ou cinétique) se trouve l'énergie interne, ni quel est l'ordre de grandeur de la quantité contenue dans un gramme, nous n'avons pas à nous [en] occuper pour l'instant. Le seul fait expérimental à retenir est celui-ci : l'existence d'une*

³⁴³ (Brun, et al., 1936), note de bas de page p.31

³⁴⁴ (Brun, et al., 1936), p.47

³⁴⁵ (Brun, et al., 1936), pp.45-47

³⁴⁶ Cette présentation de la chaleur se retrouve dans l'ouvrage de Thermodynamique que Fermi publie pour la première fois en 1937. Fermi énonce ainsi : « *Q can be interpreted physically as the amount of energy that is received by the system in forms other than work* » (Fermi, 1956) p.17 L'édition citée est une réédition intégrale et sans modification de l'œuvre originale publiée par Prentice Hall Company en 1937.

réserve parfaitement déterminée d'énergie et la possibilité de mesurer ses variations. »³⁴⁷ Cette généralisation du concept d'énergie interne est saluée dans la préface du livre de Brun « *Les auteurs ont, à mon avis, très bien fait d'introduire dès le début la notion d'énergie interne, qui préservera le lecteur de toute idée fausse sur la création et la destruction de la chaleur.* »³⁴⁸

En outre, le vocabulaire évolue peu à peu pour parler du principe de conservation de l'énergie. Aussi on trouve pour désigner le principe de conservation appliqué aux transformations non fermées d'un système l'appellation « *principe de l'état initial et final* »³⁴⁹ ou encore « *premier principe de la thermodynamique.* »³⁵⁰ Aussi, le principe de conservation s'applique préférentiellement à un système fermé sur lequel des échanges sont envisageables, plutôt qu'à un système isolé où les échanges de tout type sont exclus.

La mise en forme du principe continue également à évoluer. Tout d'abord, Bouasse propose « *l'expression générale du principe d'équivalence [...]* :

$$dQ = d\tau + dU$$

Conformément à l'hypothèse fondamentale la quantité de chaleur est exprimée en unités mécaniques (kilogrammètres, ergs ou joules) »³⁵¹. Aussi l'équivalent mécanique de la chaleur J n'apparaît plus. Bruhat, reviendra lui à un énoncé faisant apparaître J , mais ce n'est pas le choix de Brun qui aussi propose « *la quantité de chaleur est donnée directement, en unités de travail (joules par exemple)* »³⁵², même s'il signale l'existence de J pour exprimer la quantité de chaleur en calories ou kilocalories comme « *unités des techniciens* ». Dans ce cas Brun le nomme « *premier principe de la chaleur.* »³⁵³

Le second aspect est l'algébrisation de la chaleur et du travail. Comme nous l'avons vu dans l'énoncé proposé par Brun et Bruhat, les grandeurs « chaleur » et « travail » sont algébrisées de façon à ce qu'elles soient toutes deux comptées positivement si elles sont effectivement reçues par le système et négativement au contraire. Le système auquel on applique le bilan, devient alors la seule référence pour comptabiliser les échanges.

e. Illustration des machines thermiques

L'ouvrage de Brun se distingue par une approche innovante de la chaleur, en mettant en évidence l'ambiguïté portée par ce concept, fortement liée à son histoire. En revanche, Brun ne

³⁴⁷ (Bouasse, 1913a) p.71

³⁴⁸ (Brun, et al., 1936), préface p.8

³⁴⁹ (Bouasse, 1913a) p.91 et (Bruhat, 1926) p.114

³⁵⁰ (Bruhat, 1926) Chapitre IV pp.94-107

³⁵¹ (Bouasse, 1913a) p.72

³⁵² (Brun, et al., 1936), p.47

³⁵³ (Brun, et al., 1936), p.54

fait jamais référence à l'entropie. En outre, la référence au cycle de Carnot est l'occasion de définir, comme nous l'avons vu, uniquement le concept de température et d'admettre, sans autres développements que « *le rendement [du cycle ditherme] est toujours inférieur à l'unité* »³⁵⁴.

L'ouvrage de Bouasse paru en 1913 est considérablement augmenté par comparaison à l'édition de 1907, puisqu'il paraît sous deux volumes dont l'un est en grande partie consacré à l'étude des machines thermiques. Bouasse prévient néanmoins le lecteur qu'un « *cours de machine ne doit pas être un catalogue* »³⁵⁵ mais doit « *montrer pourquoi les machines fonctionnent.* »³⁵⁶ Aussi, son ouvrage constitué de 376 pages dont 184 sont consacrées aux machines thermiques, donne les principes de fonctionnement des machines à air chaud, machines à air comprimé ou raréfié, machines à froid, machines frigorifiques à vapeur, moteurs à vapeur et à explosion. La description des éléments constitutifs y est minutieuse et Bouasse s'applique à appuyer ses propos sur les diagrammes (pression volume) théoriques et pratiques. Il détaille également les explosifs en donnant des ordres de grandeurs et les techniques de mesure des température, pression et du travail disponible engendré par ces réactifs chimiques. Il propose en outre des éléments théoriques sur l'écoulement des fluides dans des tuyères.

La démarche proposée par Bruhat est beaucoup plus sommaire, puisqu'il ne consacre qu'une quarantaine de pages aux machines. En revanche, Bruhat développe davantage les représentations graphiques en proposant les représentations dans le diagramme (température-entropie) : « *[la] représentation de Clapeyron a l'avantage de fournir immédiatement la valeur du travail mis en jeu dans une transformation ou le long d'un cycle fermé. Les mécaniciens emploient également la représentation obtenue en prenant comme variables la température thermodynamique T et l'entropie S . [...] elle a surtout l'avantage qu'un cycle de Carnot [...] y est représenté par un rectangle [...] le diagramme entropique se prête particulièrement bien à l'étude des moteurs thermiques, dans lesquels on cherche autant que possible à se rapprocher du cycle de rendement maximum, c'est-à-dire le cycle de Carnot.* »³⁵⁷

³⁵⁴ (Brun, et al., 1936) p.60

³⁵⁵ (Bouasse, 1913b) Introduction p.vi

³⁵⁶ (Bouasse, 1913b) p.1

³⁵⁷ (Bruhat, 1926) p.204

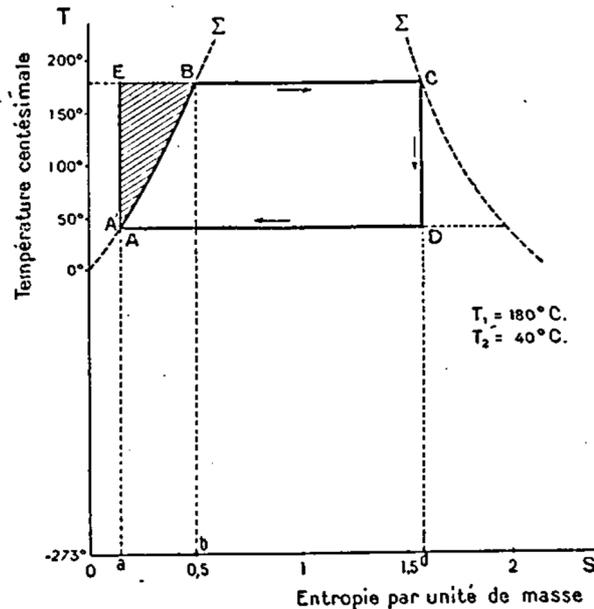


FIG. 132.

Figure 24 Diagramme Température Entropie pour un cycle de Rankine³⁵⁸

Bruhat illustre cette propriété sur le cycle de Rankine (Cf. Figure 24). Le cycle de Carnot AECD diffère de celui de Rankine ABCD, par la quantité hachurée. La diminution du rendement théorique produite par substitution du cycle de Rankine au cycle de Carnot est alors visuellement accessible.

f. Le deuxième principe de la thermodynamique et dégradation de l'énergie

L'introduction du diagramme (température, entropie) chez Bruhat, laisse entendre que ce dernier introduit clairement le concept d'entropie dans son ouvrage à travers le deuxième principe de la thermodynamique. Il y consacre trois chapitres : le premier aux transformations isothermes, le second sur les cycles mettant en jeu deux sources de chaleur et un dernier intitulé « *expression générale du second principe.* »

Pour Bruhat, le deuxième principe a un but : « *déterminer le sens dans lequel une transformation est possible* »³⁵⁹ et se distingue du premier principe par le fait que « *le premier principe s'exprime par une égalité, le second par une inégalité.* »³⁶⁰

³⁵⁸ (Bruhat, 1926) p.347

³⁵⁹ (Bruhat, 1926) p.129

³⁶⁰ (Bruhat, 1926) p.130

Bruhat introduit également la notion de dégradation de l'énergie. Aussi, le concept de chaleur est de nouveau abordé : « *L'énergie mécanique perdue se retrouve naturellement sous forme de chaleur : il y a conservation de l'énergie, mais dès que les phénomènes sont irréversibles, il y a transformation de l'énergie, toujours dans le même sens, d'énergie mécanique en énergie calorifique : c'est ce qu'on exprime en disant qu'il y a **dégradation de l'énergie**, que la chaleur est une forme d'énergie dégradée par rapport au travail.* »³⁶¹

A nouveau le concept d'énergie calorifique, caractéristique du corps, se retrouve confondu avec le concept de chaleur présentée comme un échange du système avec le milieu extérieur. (Conformément à ce qui a été dit au paragraphe 2.) Cette remarque peut se faire au même titre pour l'énergie mécanique et le travail. Cette constatation peut se faire également chez Bouasse : « *Nous sommes habitués à voir l'énergie sous forme potentielle et sous forme cinétique. Pour assimiler l'énergie calorifique à de l'énergie cinétique, nous sommes conduits à considérer les molécules comme se déplaçant et vibrant. La température est alors déterminée par la concentration moyenne de cette énergie cinétique. Dès lors le principe de Clausius revient à poser que de l'énergie de translation ou de vibration moléculaire ne peut se transformer en énergie sensible que grâce à la dilution concomitante de l'énergie moléculaire qui constitue la chaleur : c'est en cela que l'énergie se dégrade.* »³⁶² L'énergie calorifique apparaît à nouveau comme la partie cinétique de l'énergie interne. Sa conversion en « énergie sensible », qui n'est pas définie dans le texte de Bouasse, laisse sous-entendre que l'énergie calorifique devient chaleur. Bouasse ajoute en outre : « *De la chaleur ne peut être transformée en travail que si de la chaleur à une certaine température devient de la chaleur à une autre température* »³⁶³. Cette phrase risque de laisser un lecteur dans une ambiguïté vis-à-vis des concepts de chaleur et de température ; A moins que la chaleur dont parle Bouasse ici, se confonde avec l'énergie calorifique au sens de la partie cinétique de l'énergie interne...

Nous venons de voir à travers la première partie de ce chapitre que même si les programmes n'évoluent que très peu au cours de ces trente années postérieures à 1902, les auteurs proposent des innovations dans la présentation du cours de thermodynamique. Certains comme Brun, soulignent également des problèmes de langage qui peuvent engendrer à la lecture des ouvrages quelques incompréhensions. Nous proposons maintenant d'étudier les réformes consécutives à la période d'après-guerre au cours des années 1940.

³⁶¹ (Bruhat, 1926) p.137

³⁶² (Bouasse, 1913a) p.135

³⁶³ (Bouasse, 1913a) p.135

II. LES REFORMES DES ANNEES 1942-1947

1. Le contexte politique des réformes

Après la défaite de juin 1940, l'enseignement est dénoncé comme un coupable à part entière. L'ordre primaire est notamment montré du doigt et les instituteurs désignés comme en partie responsable du désastre national. En effet, l'enseignement primaire, primaire supérieur et l'Ecole normale d'Instituteurs, profondément imprégnés par une idéologie républicaine, anticléricale, sont ouvertement hostiles au régime de l'État français.

Aussi, en 1941, Jérôme Carcopino (1881-1970), ministre de l'Education du régime de Vichy, ferme les Écoles normales, supprime le Brevet d'Études Primaires supérieures. Les EPS sont intégrées au secondaire en les transformant en collèges modernes³⁶⁴. Ainsi, malgré une politique en réaction contre l'école unique (la loi du 15 août 1941 supprime notamment la gratuité du second cycle), Carcopino poursuit l'œuvre de Jean Zay en incorporant l'ordre du primaire à l'ordre secondaire.

Hormis la gratuité de l'école qui sera réinstaurée dès la libération, la réforme Carcopino va perdurer encore quelques années avant une refonte complète de l'enseignement dans les années 1950.

2. Le contenu des réformes

Suite à la rénovation de l'éducation de Carcopino, sont publiées au Journal officiel du 7 Janvier 1942, les instructions des nouveaux programmes de l'enseignement secondaire. La réforme supprime « l'égalité scientifique »³⁶⁵ de 1925 et revient à un système de bifurcations des études comme celui de 1902 ; même si l'horaire de sciences physiques est diminué. Néanmoins, dans les instructions ministérielles jointes aux programmes, il est stipulé : « *la réduction de l'horaire des sciences physiques ne doit pas modifier le caractère expérimental de leur enseignement tel qu'il a été précisé par les instructions antérieures.* »³⁶⁶ L'aspect technique est d'ailleurs fondamental puisqu'est créée en 1943 l'option sciences expérimentales.

La thermodynamique disparaît de la classe de seconde. En classe de première, le concept de chaleur est l'une des trois grandes parties de l'enseignement de la physique. C'est ainsi que le thème « *chaleur* » regroupe : la notion de température, les dilatations des corps, la calorimétrie

³⁶⁴ Les C.C. continuent eux d'exister et se développeront en marge de l'enseignement secondaire.

³⁶⁵ Cf. paragraphe I.1 du chapitre 3 ; il s'agit de la volonté en 1925, de promouvoir l'enseignement des sciences dans les différentes sections en leur conférant un programme de sciences commun, on parle alors de « l'égalité scientifique » des filières. (Belhoste, et al., 1996) p.32

³⁶⁶ *Instructions ministérielles relatives à l'application des nouveaux programmes de l'Enseignement Secondaire*, Journal officiel du 7 janvier 1942, extrait cité de (BUP, janvier 1942) p.101

et les changements d'état. Le programme précise en outre les unités de « *quantité de chaleur : calorie-gramme, kilocalorie, thermie.* ». En classe de mathématiques, l'énergie est un des six thèmes de la physique. (Cf. Figure 25)

Energie.

**Diverses formes de l'énergie. Leurs transformations mutuelles. Enoncé du principe de l'équivalence. Equivalent mécanique de la calorie. Enoncé du principe de conservation de l'énergie. Application du principe de l'équivalence aux gaz parfaits ($pV = RT$).
Expérience de Joule. Chaleur spécifique à pression constante et à volume constant; formule de Mayer.
Moteurs thermiques. Leur fonctionnement (sans description détaillée des organes essentiels). Puissance; frein de Prony; indicateur de Watt. Rendement pratique. Rendement maximum (énoncé du théorème de Carnot).**

Figure 25 Extrait du programme de mathématiques de 1942

Le thème « énergie » possède une structure assez proche des programmes précédents dans un premier temps, mais place le gaz parfait comme outil d'étude privilégié du principe d'équivalence. Les machines thermiques sont également davantage développées puisque le programme suggère l'étude de leur fonctionnement, faisant suite aux développements déjà proposés dans les manuels. La référence à Carnot est moins soulignée préférant mettre en avant un vocabulaire pratique tel que « *rendement maximum* ». L'accent est également donné sur l'aspect pratique de la thermodynamique « *indicateur de Watt. Rendement pratique.* » Là encore, nous avons vu que les œuvres de Faivre-Dupaigre proposaient déjà l'introduction de ces notions.

En 1946, la notion de chaleur réapparaît en seconde au détriment de la classe de première. Sont introduits dans le programme : la notion de température et les thermomètres en lien avec la dilatation des corps. La calorimétrie est, elle, développée dans le paragraphe « *quantité de chaleur* » où est également évoqué le lien entre la chaleur et le travail : « *exemples de transformation de la chaleur en travail et du travail en chaleur : valeur numérique de l'équivalent mécanique de l'unité de quantité de chaleur (sans mesure)* »³⁶⁷. Le programme de mathématiques reste lui globalement inchangé. Mais, avant son application en octobre 1947, paraissent au Journal officiel du 20 juin 1947, les instructions officielles relatives à l'interprétation des programmes de Sciences Physiques. Dans le thème énergie, il est suggéré à l'enseignant les recommandations suivantes : « *l'étude des diverses formes de l'énergie et de leurs transformations mutuelles a été reportée à la fin de l'énergétique et c'est en conclusion de cette partie du programme que le professeur énoncera le principe de conservation de l'énergie, généralisation du principe d'équivalence.* »³⁶⁸. Cette recommandation mise en relief dans les

³⁶⁷ (BO, 31 janvier 1946) p.3275

³⁶⁸ (BO, 26 juin 1947) p. 728-729

instructions de 1947, marque une nouvelle étape dans la conception de l'enseignement de la thermodynamique³⁶⁹ qui n'est pas nécessairement suivi, comme nous l'avons vu par les différents auteurs.

A compter du 1^{er} octobre 1941, les classes de Mathématiques spéciales préparatoires prennent la dénomination de Mathématiques supérieures. Si la statique des fluides fait son entrée dans le programme de physique, avec notamment l'étude des propriétés caractéristiques des fluides et la définition de la pression en un point d'un fluide en équilibre, le thème « thermodynamique » reste sensiblement aussi pauvre que celui de la réforme de 1925. Ces programmes sont d'ailleurs reconduits en 1948 comme « *programme minimum qui doit avoir été intégralement traité à la fin de l'année scolaire.* »³⁷⁰ Il faudra attendre quinze ans pour que paraisse au Journal officiel une directive de réorganisation des enseignements en classes préparatoires.

In fine, les réformes issues du gouvernement de Vichy n'apportent rien de fondamentalement nouveau à l'enseignement de la thermodynamique et l'ensemble s'inscrit globalement dans la continuité des programmes de 1902.

III. UN BILAN DE 1914 A LA FIN DE LA PREMIERE MOITIE DU 20^{EME} SIECLE

1. L'avancée de la science

En parallèle des bouleversements de l'enseignement du secondaire et du supérieur, les avancées de la science au cours de ce deuxième quart du 20^{ème} siècle, sont nombreuses.

Au début du 20^{ème} siècle, Walther Nernst (1864-1941) s'intéressant à la calorimétrie, et notamment à la mesure des chaleurs spécifiques des solides à très basses températures, remarque que la variation d'enthalpie³⁷¹ ΔH et d'énergie libre $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ s'égalisent à basse température. Aussi déduit-il que ΔS doit nécessairement tendre vers zéro lorsque la température se rapproche du zéro absolu. Il présente alors ses résultats au cours de deux meetings à Berlin et les publie en 1906 dans *l'ouvrage Experimental and theoretical applications of thermodynamics to chemistry*. Nernst réalise un nombre important de mesures qui lui permettent de valider son hypothèse et énonce le « *troisième principe de la thermodynamique* ». Max Planck (1858-1947)

³⁶⁹ Cette organisation était déjà proposée dans le programme de 1942 mais le fait qu'une instruction paraisse sur ce sujet en 1947 laisse entrevoir que ce point doit être un élément essentiel de l'enseignement de la thermodynamique.

³⁷⁰ (BO, 29 juillet 1948) p.917

³⁷¹ Cf. Chapitre 4 § III. 1. c. concernant l'introduction de l'enthalpie dans la littérature scientifique.

développe les travaux de Nernst et propose conventionnellement qu'à $T = 0K$, l'entropie de tout corps est égale à zéro³⁷². La conséquence la plus importante de ce résultat est que la capacité thermique d'un corps tend vers zéro aux basses températures. En outre, ce résultat amène le quatrième principe de la thermodynamique, ou principe zéro que Planck énonce en 1906 dans ses *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*³⁷³ :

« Si un corps A est en équilibre thermique avec deux autres corps, B et C , alors B et C sont en équilibre thermique entre eux »³⁷⁴

En outre de 1925 à 1935, la mécanique quantique se fonde grâce aux travaux d'innombrables scientifiques tels que Einstein, Niels Bohr (1885-1962), Arthur Compton (1892-1962), Louis De Broglie (1892-1987), Werner Heisenberg (1901-1976), Erwin Schrödinger (1887-1961) *etc.* Le microscopique devient alors un monde où la physique peut proposer des interprétations. La mécanique quantique vient à la rescousse d'une mécanique statistique « classique » en échec sur la problématique du corps noir, en introduisant la notion de quanta, suggéré par Planck. En 1920, le photon est effectivement introduit pour désigner le modèle corpusculaire de la lumière, et permet à Einstein d'interpréter l'effet photoélectrique découvert quinze ans auparavant.

La thermodynamique n'est pas à la marge de ces avancées. Einstein applique en 1907, la mécanique quantique à l'étude des chaleurs spécifiques des solides. En 1912, Peter Debye (1884-1966) étend la théorie d'Einstein en considérant les contributions des vibrations du réseau d'atomes formant le solide.

Le concept d'énergie prend en outre une dimension encore plus fondamentale. En effet, la notion d'énergie entre dans le nouveau cadre de la physique liée aux mathématiques, que certains appellent le cadre des « *superlois* » : invariance, symétrie et conservation. Cette considération de la physique « moderne » va marquer les avancées futures de la science. Il est possible d'illustrer par exemple cette évolution de pensée sur l'hypothèse d'existence du *neutrino*. En effet, en 1914, le principe de conservation de l'énergie semble mis en défaut dans la radioactivité bêta. Lorsqu'un électron s'échappe d'un noyau radioactif (rayonnement bêta), seule particule a priori éjectée, son spectre en énergie est continu : l'énergie moyenne est d'environ 40 % de l'énergie maximale. Pour expliquer cet écart, Wolfgang Pauli (1900-1958) propose en décembre 1930³⁷⁵ l'existence d'une

³⁷² L'hydrogène liquide obtenu pour la première fois en 1898 a permis d'atteindre une température de 14K. A cette température les capacités thermiques des solides sont clairement diminuées. En 1908, les 2K sont atteints par liquéfaction de l'hélium et confirment les tendances de décroissance des capacités thermiques et par là-même le postulat de Nernst-Planck.

³⁷³ *Cours sur la théorie du rayonnement thermique*, édité en 1906 à Leipzig

³⁷⁴ « If a body A , be in thermal equilibrium with two other bodies, B and C , then B and C are in thermal equilibrium with one another » (Planck, 1914) p.2

³⁷⁵ *Lettre ouverte au groupe des radioactifs à la réunion du Gauverein à Tübingen*, le 4 décembre 1930, par Pauli.

particule sans charge et de masse « très faible » qui partagerait avec l'électron l'énergie libérée dans la désintégration. Cette hypothèse permet alors de sauver le principe de conservation de l'énergie. C'est la naissance du neutrino³⁷⁶, qui ne sera découvert expérimentalement que vingt-six ans plus tard³⁷⁷. Aussi, comme le signale Michel Hulin dans son analyse en 1988 « *la structure de la [physique] s'est, en quelque sorte décalée ; ce n'est plus l'objet particule qui devient prioritaire, ce sont les règles de pensée et d'action sur lesquelles on va fonder l'analyse. Il y a là un saut conceptuel, intellectuel, épistémologique phénoménal.* »³⁷⁸

2. Un bilan des réformes de l'enseignement

Alors que la physique est en plein bouleversement aussi bien sur le plan des avancées que de la réflexion, les programmes de physique en ce qui concerne la thermodynamique, restent globalement identiques à ceux des années 1902. Bien que l'organisation des thèmes soit parfois modifiée, le contenu est sensiblement le même. Il faut donc se tourner vers les manuels, destinés aux secondaires ou aux études supérieures pour avoir une remarque concernant les avancées de la science.

Aussi, progressivement au cours des années 1920 et 1930, le concept d'énergie et sa conservation prend une importance de plus en plus significative. Certains auteurs comme, Faivre-Dupaigre dans la 9^{ème} édition de son *Nouveau cours de physique élémentaire*, paru en 1934 manifestent : « *[le principe de conservation de l'énergie] joue un très grand rôle dans la physique moderne.* »³⁷⁹, remarque absente de la 8^{ème} édition, où seule la référence à l'expérience de Joule venait illustrer le principe de conservation³⁸⁰. D'autres vont même au-delà en faisant référence aux découvertes récentes de la physique moderne. Ainsi Louis-Joseph Olmer (19 ??-19 ??), professeur à la Faculté libre des Sciences et à l'Institut Catholique de Paris, dans son cours de Physique pour classe de mathématiques en 1929 écrit : « *ce principe est la base de toute la Physique moderne ; il est tellement bien admis maintenant, à la suite de milliers d'expériences, que si l'on rencontre par hasard une expérience qui paraît le contredire, on incrimine, non le principe mais l'interprétation de l'expérience ; on admet qu'il y a dans la transformation étudiée une variation d'énergie insoupçonnée, variation de grandeur telle qu'elle satisfait au principe de*

³⁷⁶ Initialement nommé neutron par Pauli (le neutron que l'on connaît sous cette appellation aujourd'hui sera découvert en 1932) il est nommé neutrino par Edoardo Amaldi (1908-1989) et Enrico Fermi (1901-1954) en 1932

³⁷⁷ Le neutrino est découvert en 1956, par Frederick Reines (1918-1998) et Clyde Cowan (1919-1974) (Nobel en 1995).

³⁷⁸ *Quelques réflexions sur la culture scientifique*, interview non publiée de Diane Saumier, Michel Hulin, citation extraite de (Belhoste, et al., 1996) p.62

³⁷⁹ (Faivre-Dupaigre, et al., 1934) p.157

³⁸⁰ (Faivre-Dupaigre, et al., 1930) p.104

la conservation de l'énergie. »³⁸¹ ; comme ce fût le cas comme nous l'avons présenté pour le neutrino.

En outre, en 1936, dans son ouvrage *Chaleur*, Brun aborde les notions de chaleurs spécifiques et fait référence sans le signaler aux avancées issues des travaux de Einstein ou de Debye : « *Le grand intérêt théorique des lois [de Dulong et Petit et de Kopp et Neumann]³⁸² tient à ce qu'elles ont été justifiées par les théories modernes sur la constitution des corps et qu'elles en apportent en quelque sorte, la confirmation* »³⁸³.

Certains auteurs comme Bruhat, souhaitent dépoussiérer l'enseignement de la thermodynamique : « *la science a progressé depuis que les fondateurs de la Thermodynamique en énonçaient, il y a presque un siècle, les deux lois fondamentales : les expériences grossières et les calculs approchés qu'ils en donnèrent comme démonstration nous paraissent aujourd'hui de bien peu d'intérêt, lorsqu'on les compare au rôle essentiel que joue leur application dans toutes les parties de la Physique moderne. [...] Dès lors il suffit de quelques pages pour énoncer les deux principes, d'abord en langage ordinaire, puis en langage mathématique* »³⁸⁴. Il présente à ce propos un document centré sur les deux principes de la thermodynamique qu'il applique ensuite à une multitude d'exemples. Il propose également un chapitre consacré à la théorie cinétique des gaz dans lequel il donne une interprétation statistique de l'entropie en introduisant la relation de Boltzmann. Nous ne détaillerons pas davantage ce point qui dépasse les limites de cette étude consacrée à la thermodynamique classique.

3. Les évolutions sur l'enseignement de la thermodynamique

L'étude des quelques manuels du supérieur notamment, montre que certains auteurs tentent d'apporter un regard novateur sur les concepts développés en thermodynamique.

Le concept d'*énergie interne* se trouve désormais dans la plupart des ouvrages, même si aucun des auteurs ne se risque à en donner une définition. En outre, l'énoncé du premier principe appliqué à des systèmes fermés (i.e. échangeant de l'énergie avec l'extérieur) est désormais présenté comme point de départ du cours de thermodynamique. Le principe d'équivalence et même le principe de conservation de l'énergie étant désormais traités comme des cas particuliers du premier principe.

³⁸¹ (Olmer, 1929) p.153

³⁸² La loi de Kopp et Neumann (1865) donne une estimation de la capacité calorifique des métaux, ainsi que de celle des alliages, à partir de celle des éléments.

³⁸³ (Brun, et al., 1936) p.420

³⁸⁴ (Bruhat, 1926) Avant-propos p.V

En outre, l'algèbrisation homogène des grandeurs Q et de W est privilégiée (dans le sens négatif pour ce qui est cédé par le système et positif pour ce qui est reçu) de même que l'utilisation courante de l'unité *Joule* pour quantifier la grandeur « chaleur ».

Les machines thermiques sont l'occasion pour les auteurs d'introduire les représentations graphiques habituelles comme le diagramme (pression-volume). Mais d'autres représentations comme les diagrammes (température-entropie) qui restaient jusque-là absents des ouvrages, commencent à apparaître, comme dans ceux de Bruhat. Ces considérations graphiques permettent notamment de comparer rapidement le cycle de Carnot aux machines usuelles.

Nous avons également signalé que certains auteurs du secondaire comme Ollive, ont un regard sur l'enseignement de la thermodynamique tout à fait singulier. Ollive montre notamment dans son ouvrage de nombreuses applications (moteurs à vapeur, explosion *etc.*) mais n'hésite pas à introduire des idées novatrices comme sur la récupération de l'énergie solaire, comme nous l'avons vu, ou encore sur les machines thermiques en suggérant une utilisation des machines frigorifiques comme systèmes innovants de chauffage : « *Théorème de Carnot appliqué aux machines frigorifiques. Solution économique du problème de chauffage domestique.* »³⁸⁵ Il présente une machine réversible fonctionnant comme une machine frigorifique, mais il s'intéresse à la chaleur qui est fournie à la source chaude. Il propose alors d'utiliser cette énergie « *pour chauffer dans un certain temps l'air intérieur d'un appartement, ce que l'on réalise d'ordinaire au moyen d'un poêle.* » Il montre alors que : « *il y a dix fois moins d'énergie pour chauffer un appartement à l'aide d'une machine qu'à l'aide d'un poêle. Le résultat est paradoxal ! C'est une conséquence extrêmement curieuse du théorème de Carnot.* »³⁸⁶ Et Ollive conclut : « *Il est inutile de dire que tout ceci n'est donné qu'à titre de curiosité. A l'heure actuelle, on se heurte à trop de difficultés pour appliquer le mode de chauffage dont nous venons de donner l'exemple. En premier lieu nos machines ne sont pas réversibles. En second lieu, l'énergie fabriquée par notre industrie est malheureusement le plus souvent d'origine thermique. Il n'est pas absurde, cependant d'envisager pour un avenir plus ou moins proche, l'application de ces idées.* »^{387, 388}

³⁸⁵ (Ollive, 1930) p.176

³⁸⁶ (Ollive, 1930) p.177

³⁸⁷ (Ollive, 1930) p.177

³⁸⁸ L'idée d'utiliser les machines frigorifiques comme moyen de chauffage n'est pas récente. En effet, Thomson, avait suggéré dans une communication *On the economy of the heating or cooling of buildings by means of currents of air*, publié en 1882, qu'il était possible d'utiliser une machine thermique pour chauffer l'air d'un bâtiment. Ce projet, bien que non réalisé pour le moment, permettrait de valoriser les chaleurs « perdues » lors de fonctionnement de machines et réaliser de réelles économies. (Thomson, 2011) p.515

La réalisation technique des pompes à chaleur n'a eu lieu qu'aux alentours des années 1930, notamment aux Etats Unis. Elles commencent à voir le jour durant la seconde guerre mondiale en Europe, et notamment en Suisse, à cause de difficultés d'approvisionnement en charbon. Pour plus d'informations sur

En revanche, l'analyse de ces œuvres soulève une ambiguïté naissante et sous-jacente sur la notion de chaleur. La chaleur désigne-t-elle une énergie ou un mode de transfert d'énergie ? Brun est un des premiers à s'interroger à ce sujet. Et on le voit dans son développement, Brun reste extrêmement prudent quant à l'utilisation du vocabulaire employé, sans pour autant préciser effectivement les concepts. Ollive par exemple propose une distinction entre énergie calorifique et énergie interne, mais cette différence ne semble pas présente dans l'ensemble des ouvrages...

Aussi nous proposons de poursuivre notre étude en s'intéressant aux projets de rénovation de l'enseignement au cours des années 50-60 notamment marqués par une augmentation importante des effectifs et par une nécessité d'orienter davantage d'élèves dans les voies scientifiques pour répondre aux besoins de la nation.

le sujet, voir l'article *A short history of heat pumps who uses them and why ?* par Gerald C. Groff, paru dans le numéro 2 du The REHVA European HVAC Journal de mars 2010.

CHAPITRE 4

L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DE L'APRES- GUERRE AUX ANNEES 1970

I. LE CONTEXTE DES REFORMES DES ANNEES 50-60

1. Refonder les valeurs de l'éducation de l'après-guerre

A la Libération, une remise en question globale de l'enseignement est amorcée. Elle est notamment due à l'explosion des effectifs du secondaire. Devant l'afflux d'élèves venus de toutes les couches de la population, l'élitisme de l'ordre secondaire et les pratiques obsolètes commencent à faire sentir que les méthodes anciennes sont en échec. En 1944, Paul Langevin (1872-1946) alors directeur de l'ESPCI³⁸⁹ et Henri Wallon (1879-1962), professeur au Collège de France sont nommés respectivement président et vice-président de la commission de réforme de l'enseignement. Celle-ci est chargée d'élaborer les nouveaux objectifs de l'école. Cette réforme,

³⁸⁹ Paul Langevin a été directeur de l'ESPCI (École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris) de 1925 à 1946. Il s'agit d'une des plus prestigieuses écoles d'ingénieurs de physique et de chimie de France. Fondée en 1882, son histoire est notamment marquée par les prix Nobel qu'elle a accueillis : comme Pierre Curie, Marie Curie, Irène Joliot-Curie, Frédéric Joliot-Curie, Pierre-Gilles de Gennes et Georges Charpak.

nommées en l'honneur de leurs auteurs, *le plan Langevin-Wallon*, doit proposer pour la France un grand système éducatif démocratique avec une profonde refonte des structures et de la pédagogie. On peut y voir une opportunité pour la France de rattraper le retard, notamment dû à la guerre, sur les autres pays comme le Royaume-Uni ou les États-Unis. Pourtant, malgré une reprise de la croissance de l'économie et de la démographie d'après-guerre qui impose l'urgence des réalisations et leur planification, le projet est mort-né³⁹⁰. La IV^{ème} république (1946 -1958) se caractérise alors par une inertie profonde de l'éducation nationale.

En revanche, même si le plan Langevin-Wallon ne se concrétise pas, progressivement une prise de conscience et un consensus s'établissent autour des valeurs de cette éducation nouvelle : créer des lieux d'éducation communs, lutter contre l'encyclopédisme, rendre l'élève davantage actif dans une réelle démarche inductive *etc.* L'école doit former les travailleurs de demain, capable de prendre des initiatives, des décisions mais aussi capable de mobilité dans un monde en pleine mutation. Pourtant, le rêve de l'école unique est encore loin d'être concrétisé. En effet en 1958, seulement 15% des enfants scolarisés dans les lycées ou collèges classiques ou modernes sont des enfants d'ouvriers, contre 33% des enfants de professions libérales, cadres supérieurs ou moyens *etc.* L'avènement de la V^{ème} république va tenter de répondre à ces attentes d'autant que les effectifs connaissent une croissance de plus en plus importante³⁹¹. L'ordonnance du 6 janvier 1959³⁹² prolonge l'obligation scolaire de deux ans et la porte à seize ans révolus³⁹³. En revanche, le cloisonnement vertical subsiste entre les lycées et les collèges (enseignement secondaire) et les cours complémentaires (enseignement primaire supérieur). Le 6 août 1960 est proposé un changement de dénominations des établissements scolaires : les *Lycées* deviennent *Lycées d'Etat*, les *collèges classiques et modernes nationalisés* deviennent *Lycées nationalisés classiques et modernes* et les *cours complémentaires* deviennent *Collèges d'enseignement général*. Enfin, l'organisation en terme de cycle prend le pas sur l'ordre : Le *cycle élémentaire* pour les 6-11 ans, le *cycle d'observation* entre 11 et 13 ans, le *premier cycle* de 13 à 15 ans et le *second cycle* de 15 à 18 ans.

³⁹⁰ Le projet global de réforme est remis en juin 1947, en pleine période de guerre froide. Les idées de Wallon et Langevin tous deux proches du Parti Communiste Français sont alors écartées.

³⁹¹ En 1961, le sociologue Louis Cros (1908-2000) fait paraître un ouvrage intitulé « *L'explosion scolaire* ». Alors directeur de l'Administration générale au ministère de l'Éducation nationale, Cros chiffre les besoins (en locaux, laboratoires, enseignants...) en estimant qu'en 1970 il y aura seize fois plus d'élèves qu'en 1900 dans le second degré et vingt fois plus dans le supérieur.

³⁹² Jean Berthoin (1895-1979) est alors ministre de l'éducation nationale et défenseur de la ligne du rapport Langevin-Wallon.

³⁹³ La mesure initialement prévue pour les enfants qui devaient atteindre 6 ans à partir du 1er janvier 1959 ne deviendra effective seulement en 1967, c'est-à-dire pour les élèves nées à partir de 1953.

Les décrets du 3 août 1963³⁹⁴ instituent un nouveau type d'établissements polyvalents : le Collège d'Enseignement Secondaire (CES) qui regroupe trois groupes de section :

- Un enseignement général long, classique ou moderne, dispensé par des professeurs agrégés ou certifiés³⁹⁵.
- Un enseignement moderne court, assuré par des professeurs bivalents. Il mène, dans beaucoup de cas, à une future entrée en lycée technique.
- Un enseignement terminal est dispensé par des instituteurs en principe spécialisés. Il débouche le plus souvent directement sur la vie active. (Jusqu'à 16 ans)

Cette mise en forme du système se poursuit par la restructuration des filières du second cycle. Le décret du 10 juin 1965³⁹⁶ fixe dès la classe de seconde la filière conduisant au baccalauréat en quatre séries générales : série A (littéraires), série B (sciences économiques et sociales), série C (mathématiques) et série D (sciences expérimentales).

2. La mutation de l'enseignement des sciences

En 1955, la répartition des étudiants est fortement déséquilibrée : 58 % d'étudiants s'orientent vers des études en lettres contre seulement 26 % en sciences alors que la demande dans le secteur tertiaire (professions libérales, enseignants, chercheurs, carrières commerciales et scientifiques) et dans le secteur secondaire (personnels qualifiés : agents techniques, techniciens, techniciens supérieurs) ne cesse de croître. Il est donc impératif de rénover profondément l'enseignement des sciences afin de rééquilibrer les filières et répondre aux demandes des différents secteurs d'emploi.

Il s'agit entre autre de remettre en question dans les pratiques d'enseignement la position magistrale du professeur. Car, malgré les vœux des réformateurs de 1902, les pratiques des professeurs n'ont quasiment pas évolué. En effet, l'expérience est toujours utilisée comme outil de démonstration, et la démarche mathématique est toujours dominante, au lieu d'une induction expérimentale souhaitée. Certains représentants du monde éducatif comme Charles Brunold (1893-1984) notamment, directeur de l'enseignement du second degré de 1951 à 1960, vont condamner ces pratiques vieillissantes qui ont perduré pendant ces cinquante années. Cependant,

³⁹⁴ Cette réforme est notamment portée par le ministre de l'Éducation nationale Christian Fouchet (1911-1974) et de Jean Capelle (1909-1983) directeur des lycées au Ministère de l'Éducation nationale. C'est sous l'impulsion du ministre Fouchet (28 novembre 1962 au 1er avril 1967), que nombre de réformes contribueront à moderniser les programmes des études scientifiques.

³⁹⁵ Le décret du 1er avril 1950 institue un professorat du second degré (CAPES) ; il est obtenu par concours (pour des candidats ayant obtenu un niveau licence), pour répondre notamment à une demande croissante d'enseignants. Nous y reviendrons un peu plus loin dans ce chapitre.

³⁹⁶ BO n° 24 du 24 juin 1965

la volonté du changement de méthodes n'a jamais pu aboutir car elle s'est heurtée à l'inertie des mentalités mais également à la conception de la physique selon laquelle l'affirmation du principe doit être première, notamment défendue par Bouasse, comme nous l'avons vu dans l'analyse de ses ouvrages.

Les années 1950-1960 sont aussi marquées par la parution d'ouvrages d'enseignement de cours universitaires proposés par des physiciens de premiers plans. Aussi Richard Feynman (1918-1988) publie en 1963 *Le Cours de physique de Feynman* recueil en cinq volumes de ses cours donnés entre 1961 et 1963 au California Institute of Technology. La série *Berkeley physics course* est éditée pour la première fois en 1962. Elle est constituée de manuels de physique rédigés principalement par les professeurs de l'Université de Berkeley. Les objectifs clairement affichés par ces ouvrages, sont de proposer les fondements de base et d'introduire les notions de physique moderne (mécanique quantique, relativité...) Aussi, les orientations penchent vers les questions des *superlois* : invariances, symétries, conservation et la description microscopique de la matière prend un réel essor. En effet, les réticences vis-à-vis des idées atomistes qui ont marqué le début du siècle vont progressivement céder la place à l'acceptation des conceptions atomistes présentées non plus comme des hypothèses³⁹⁷ mais comme une théorie. Aussi, on peut lire dans la préface du volume 5 de la collection Berkeley consacré à la physique statistique : « *l'ordre non conventionnel de la présentation [a] pour but d'insister sur le rapport entre la description au niveau macroscopique et au niveau atomique.* »³⁹⁸ La description microscopique est alors au cœur de l'ouvrage afin de présenter les concepts de thermodynamique et de chaleur. En revanche, l'auteur souligne que « *bien qu'une étude historique soit rarement l'introduction la plus logique ou la plus claire à un sujet, une certaine connaissance de l'évolution des lois scientifiques est à la fois intéressante et instructive.* »³⁹⁹

Ces influences anglo-saxonnes vont progressivement se propager en France et engendrer une modification des conceptions de la thermodynamique notamment.

³⁹⁷ Le mot hypothèse est clairement employé dans les manuels pour désigner la théorie atomique. Ainsi peut-on lire dans l'ouvrage de Chimie de Lamirand de 1951 : « *la théorie atomique repose sur trois hypothèses fondamentales : 1. l'hypothèse moléculaire ;2. l'hypothèse d'Avogadro ;3. l'hypothèse atomique* » (Lamirand, et al., 1951) p.13

³⁹⁸ (Reif, 1972) préface pp.viii

³⁹⁹ (Reif, 1972) préface pp.-ix

II. L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DANS LE SECOND CYCLE

1. Contenu des réformes pour l'enseignement de la thermodynamique

La réforme de 1957, propose une toute nouvelle présentation de la thermodynamique. En classe de seconde (notamment pour la section C), le lien entre chaleur et travail disparaît et le programme revient ainsi à l'étude de la thermométrie et de la calorimétrie. Le thème *énergie*, présent en classe de terminale, est quant à lui, clairement restructuré. (Cf. Figure 26)

Energie

Energie potentielle mécanique d'un système. Transformations mutuelles des énergies mécaniques potentielle et cinétique.

Principe de l'état initial et de l'état final ; équivalence de la chaleur et du travail.

(*) Diverses formes de l'énergie ; leurs transformations mutuelles.

(*) Principe de la conservation de l'énergie. Inertie de l'énergie ; énoncé de la relation d'Einstein.

(*) Moteurs thermiques : principe du fonctionnement de la machine à vapeur alternative et du moteur à explosion à quatre temps. Puissance indiquée. Puissance effective ; frein de Prony. Rendement thermique et rendement industriel. Idée du principe de Carnot ; énoncé du théorème de Carnot.

Figure 26 Extrait du programme de Mathématiques paru au BO du 25 juillet 1957

Dans la continuité de ce que l'on trouvait dans les ouvrages des années 30 (Cf. chapitre 3), le « *principe de l'état initial et de l'état final* » remplace le principe de conservation de l'énergie. La conséquence immédiate de ce principe est l'équivalence de la chaleur et du travail ; comme l'énonce les recommandations du programme : « *Le principe de l'équivalence est introduit à propos des transformations ouvertes, ce qui permettra de faire comprendre aux élèves le sens du mot « équivalence »* ». De même, le « *principe de la conservation d'énergie* », devient une application du « *principe de l'état initial et de l'état final* ». On peut donc ici noter un retour à une présentation du premier principe basée sur un développement historique de la thermodynamique, bien que l'expérience de Joule soit absente. En effet, la conservation de l'énergie (i.e. une énergie constante pour un système isolé) n'apparaît que comme une autre formulation du principe de l'état initial et de l'état final. On peut néanmoins comprendre le choix du rédacteur du programme en soulignant l'aspect pratique (et calculatoire) de cette forme du principe qui rend systématique la réalisation des bilans lors d'interactions entre le système et le milieu extérieur. Le programme souligne à ce propos l'existence de : « *diverses formes de l'énergie ; leurs transformations mutuelles* ». Le thème énergie se termine par l'application aux

machines thermiques et la dénomination « *idée de...* » apparaît de nouveau, mais cette fois en référence au principe de Carnot : « *Idee du principe de Carnot.* »⁴⁰⁰

Cette réforme de 1957 avait déjà été amorcée une année plus tôt, en proposant des aménagements du programme précédent. Il était par exemple demandé de « *généraliser la notion d'énergie* » et d'utiliser clairement la notion de « *conservation d'énergie* » en insistant sur « *la limitation de la convertibilité de la chaleur en travail.* »⁴⁰¹. Enfin, le programme se veut novateur car fait clairement référence à la physique moderne : « *L'introduction de la notion d'inertie de l'énergie et de la relation d'Einstein éclairera les notions de physique moderne* ». Il est à noter que cette ouverture a néanmoins lieu quarante-quatre ans après la parution de l'article de Langevin « *L'inertie de l'énergie et ses conséquences* » en 1913. Enfin, la démarche globalement choisie reste à dominante déductive, les expériences venant conforter les principes énoncés en premier lieu.

La réforme de 1966⁴⁰² modifie à nouveau l'organisation de l'enseignement de la thermodynamique. En effet, elle est présente en seconde quelle que soit la filière, puis est abordée soit en première pour les sections littéraires (A et B) soit en terminale pour les sections scientifiques (C et D). Ainsi en classe de seconde, le thème « *chaleur* » reste présent à travers la calorimétrie et la thermométrie, et l'enseignant peut également donner des « *exemples de transformation du travail en chaleur et de chaleur en travail* » sans référence explicite à l'expérience de Joule ni au principe d'équivalence. Le joule est à cette occasion reconnu dans les programmes officiels comme unité de la « *quantité de chaleur* » bien que la calorie soit encore évoquée⁴⁰³ (Cf. le paragraphe *Bilan* du Chapitre 3). De plus, le programme fait référence à des « *notions succinctes sur la théorie cinétique des gaz et l'interprétation des propriétés des gaz dans cette théorie* ». Cette nouveauté va être un point fondamental dans l'approche du concept de température comme nous le verrons à travers l'étude des manuels scolaires.

Le thème « *énergie* » pour les classes de première (A et B) se résume à : « *énergie mécanique* », « *énergie calorifique* » et « *énergie électrique* ». Il y est notamment abordé le principe de l'état initial et final et l'idée du principe de Carnot.

Le programme de la classe de terminale (pour les sections C et D) n'est pas beaucoup plus ambitieux. En effet, on retrouve « *le principe de l'état initial et final et l'idée du principe de Carnot* » et « *L'idée du principe de Carnot. Énoncé du théorème de Carnot* ». D'après les commentaires du programme, ce théorème devra être donné sans démonstration. Il doit se ramener exclusivement « *à donner l'expression du rendement thermique maximal sans aucune*

⁴⁰⁰ (BO, 25 juillet 1957) Applicable en classe de premières et de terminales à compter d'octobre 1958

⁴⁰¹ (BO, 29 novembre 1956) pp.40-41

⁴⁰² (BO, 07 juillet 1966) p.1476

⁴⁰³ « *Le joule unité de quantité de chaleur* ». (BO, 07 juillet 1966) p. 1479.

indication sur les conditions dans lesquelles cette limite serait atteinte ⁴⁰⁴. En définitive, ne reste de la thermodynamique que des applications du premier principe et les grandes idées conductrices telles que la conservation ou la dégradation de l'énergie disparaissent du libellé des programmes. Enfin, le mot chaleur, qui est présent dans le programme de seconde, disparaît dans ceux de première et de terminale. En revanche c'est l'association « *énergie calorifique* » qui apparaît, et ce pour la première fois, de manière explicite dans le programme de Première A et B. Elle est présentée comme titre au paragraphe relatif au « *principe de l'état initial et final* » et est classée au même rang que l'énergie mécanique et l'énergie électrique. Pourtant, aucune indication n'est donnée sur sa signification ou son lien éventuel avec la chaleur. Or comme nous l'avons souligné au chapitre 3 cette expression peut avoir diverses interprétations. Aussi pour avoir une vision de la science enseignée, il est nécessaire de s'orienter à nouveau vers les manuels scolaires.

2. La “thermodynamique” dans le second cycle

a. Le choix des auteurs

Pour l'étude de l'enseignement de la thermodynamique sur la période des années 1950-1960, nous nous sommes intéressés à la collection Fernand Nathan, dont l'auteur principal est Georges Tréherne (1905-19 ??), professeur agrégé au Lycée Janson de Sailly. Entre 1939 et 1972, il a participé à la publication d'environ soixante-cinq manuels destinés à l'enseignement secondaire allant de la seconde à la terminale. Il s'est notamment associé avec Jean Cessac (1900-1987) inspecteur général de l'instruction publique et Bernard Roulet (19 ??-20..), professeur à l'IUT de Ville-d'Avray. Cessac et Roulet feront tous deux partie de la future commission Lagarrigue⁴⁰⁵, visant à rénover les programmes dans les années 1970⁴⁰⁶.

Les premiers ouvrages de Tréherne rencontrent un tel succès auprès du corps enseignant qu'ils sont immédiatement adoptés comme ouvrages officiels des lycées publics. Les autres parutions (ouvrages de différents niveaux) et les rééditions successives conserveront le même statut pendant encore trente ans. Les différentes versions (quatorze pour la seule rentrée de 1966) ont pour objectifs de répondre aux exigences des programmes des différentes sections et filières modernes. Les ouvrages de physique et de chimie sont à destination des enseignants et des élèves des classes de secondes, premières et terminales littéraires ou scientifiques. Il est estimé à plusieurs millions d'exemplaires le nombre de manuels de cette collection qui ont été diffusés en France. La plupart des physiciens, étudiants ou professeurs, pour ne pas dire la quasi-totalité ont donc eu, à un moment ou à un autre, un ouvrage de Tréherne entre les mains.

⁴⁰⁴ (BO, 07 juillet 1966) p.1484

⁴⁰⁵ (Guignier, juillet, août, septembre 1971) pp.1110-1111

⁴⁰⁶ Cf. Chapitre 5

Dans l'avertissement du manuel de seconde, on peut lire que le manuel est conforme à l'esprit du programme et que « *le texte en est léger et conçu pour entraîner les élèves à observer, à interpréter les faits expérimentaux dans le but d'en découvrir les causes et d'établir, chaque fois que l'on peut, les relations entre les causes et les effets.* »⁴⁰⁷ Pour se faire Tréherne illustre son ouvrage avec de nombreux schémas et photographies.

b. Le concept de température en classe de seconde

Comme nous l'avons vue, la réforme de 1946 permet de mettre en avant la distinction entre le concept de chaleur et celui de température. En effet, en supplément de la calorimétrie, le programme suggère d'évoquer en outre la notion de chaleur en comparaison avec le travail. Cet aspect de la réforme, qui a disparu en 1957, réapparaît dans la réforme de 1966 et permet alors aux auteurs des manuels de structurer différemment le thème « chaleur » en classe de seconde. Ainsi, on trouve dans le livre de Physique de seconde de Tréherne deux chapitres distincts : l'un est consacré exclusivement à la notion de température⁴⁰⁸, l'autre à la notion de quantité de chaleur⁴⁰⁹.

Comme dans les ouvrages des années précédentes, l'introduction au concept de température est toujours reliée aux sensations de froid et de chaud (Cf. Figure 27).

⁴⁰⁷ (Tréherne, et al., 1971) p.3

⁴⁰⁸ (Tréherne, et al., 1971) « *Chapitre 18. La notion de température. Les thermomètres* » pp. 209-219

⁴⁰⁹ (Tréherne, et al., 1971) « *Chapitre 22. La notion de quantité de chaleur* » pp. 267-285

A. LA NOTION DE TEMPÉRATURE

1. Les sensations de froid et de chaud.

La notion de température a son origine dans les sensations de *froid* ou de *chaud* que nous éprouvons en touchant les corps.

C'est ainsi que par simple immersion du doigt nous sentons que l'eau du robinet est plus chaude que l'eau glacée et plus froide que l'eau de la casserole (fig. 1), ce que nous traduisons en disant que la *température* du liquide A est *supérieure* à celle du mélange B et *inférieure* à la température du liquide C.

De même, si nous tenons à la main une tige métallique dont une extrémité est placée dans la flamme du gaz, nous la sentons devenir de plus en plus chaude et nous disons que *sa température s'élève*; par contre, nous la sentons se refroidir quand la même extrémité est immergée dans l'eau froide et nous disons que *sa température s'abaisse*.

2. L'insuffisance de notre sens de la température.

Le même corps paraît froid ou chaud selon qu'avant lui nous avons touché un corps plus chaud ou plus froid.

En touchant un corps très chaud ou très froid nous éprouvons une sensation de brûlure et non une sensation de température.

Les indications que nous apporte notre sens de la température manquent donc de précision et ne concernent qu'un domaine restreint de températures.

Aussi, pour classer sans ambiguïté les températures de différents corps et évaluer quantitativement une élévation ou un abaissement de température, est-il nécessaire de faire appel à divers phénomènes physiques liés aux variations de température des corps; le plus accessible est le *phénomène de dilatation*.

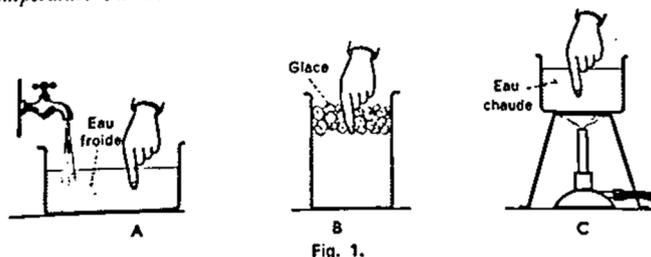


Figure 27 La température et les sensations de chaud et de froid⁴¹⁰

Mais l'insuffisance du toucher est à nouveau évoquée : « *les indications que nous apporte notre sens de la température manquent de précision [...] il est nécessaire de faire appel à divers phénomènes physiques liés aux variations de température des corps : le plus accessible est le phénomène de dilatation* »⁴¹¹. Il s'en suit alors une description détaillée des différents thermomètres en abordant en plus le phénomène de dilatation des solides.

Pour se faire, Tréherne s'emploie à ne jamais utiliser le mot « chaleur » pour exprimer les modifications des dilatations des corps. Aussi, présente-t-il simplement « *la dilatation est l'accroissement de volume qui accompagne une élévation de température* »⁴¹².

En outre, le programme de 1966 permet d'aborder la théorie cinétique des gaz. Aussi, avant d'approcher la notion de quantité de chaleur, un chapitre est consacré à la compressibilité et la dilatation des gaz⁴¹³. Cette partie est l'occasion d'évoquer pour la première fois l'interprétation microscopique de la pression et de la température. Chassagny l'avait utilisée succinctement au début du siècle dans son premier ouvrage mais cette idée avait disparu dans les éditions suivantes

⁴¹⁰ (Tréherne, et al., 1971) p.209

⁴¹¹ (Tréherne, et al., 1971) p.209

⁴¹² (Tréherne, et al., 1971) p.216

⁴¹³ (Tréherne, et al., 1971) « Chapitre 21 La compressibilité et la dilatation des gaz » pp. 243-264

et rarement reprise dans le secondaire. Aussi, Tréherne se saisit de cette occasion pour donner un sens à la température et ce indépendamment de la notion de chaleur.

Il présente alors « la structure lacunaire des gaz [...] où la matière est répartie en un très grand nombre de particules extrêmement petites appelées molécules, toutes identiques et en moyenne très largement espacées les unes des autres. »⁴¹⁴ Il donne alors quelques ordres de grandeurs sur la taille des molécules et leur nombre colossal dans un millimètre cube.

L'objectif n'est pas de développer la théorie cinétique des gaz mais faire comprendre à l'élève que « dans les conditions ordinaires de pression et de température, toutes les molécules d'un gaz sont animées de mouvements incessants et très rapides. Il en résulte que chaque molécule entre en collision avec d'autres molécules et heurte la paroi du récipient un très grand nombre de fois dans un intervalle de temps même très court [...] La pression lue sur le manomètre mesure alors l'effet moyen de ces chocs innombrables par unité de surface.»⁴¹⁵ Tréherne illustre, comme toujours, ces notions par des schémas explicatifs. (Cf. Figure 28)

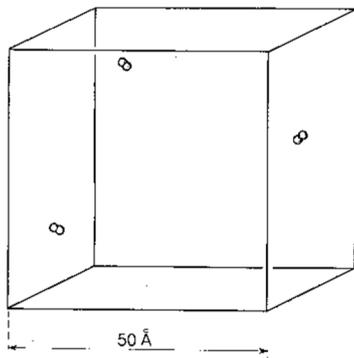


Fig. 8. Dans de l'oxygène à la température ordinaire et sous la pression atmosphérique, la très petite portion de volume représentée ci-dessus ne contient en moyenne que 3 molécules, dont la plus grande dimension, de l'ordre de 2,4 Å, n'atteint pas le 1/20 de l'arête du cube.

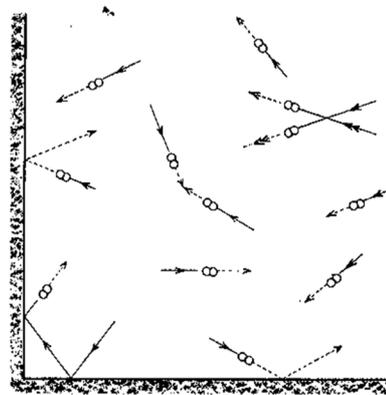


Fig. 9.

Entre les chocs successifs sur d'autres molécules ou sur les parois, les vitesses des molécules sont très variables, mais leur valeur moyenne, à une température donnée, est caractéristique du gaz considéré.

Figure 28 Illustration de la théorie cinétique des gaz : mise en évidence de la structure lacunaire (à gauche) et illustration du chaos moléculaire (à droite)⁴¹⁶

Pour aborder l'interprétation microscopique de la température, Tréherne est obligé de choisir un chemin détourné. En effet, les concepts d'énergie et d'énergie cinétique ne sont pas développés en classe de seconde⁴¹⁷. Aussi, Tréherne doit utiliser une approche non énergétique pour accéder à la température. Il énonce alors : « la pression croit avec le nombre de molécules par unité de

⁴¹⁴ (Tréherne, et al., 1971) p.255

⁴¹⁵ (Tréherne, et al., 1971) p.256

⁴¹⁶ (Tréherne, et al., 1971) p. 256

⁴¹⁷ Seules les notions de travail et de puissance sont abordées dans le programme de seconde.

volume [et] la vitesse moyenne des molécules »⁴¹⁸. Alors en admettant la loi de Charles $\frac{P}{T} = cte$ pour une transformation à volume constant d'un gaz, Tréherne conclut :
« L'augmentation de pression due à l'élévation de température ne peut donc être attribuée qu'à un accroissement de la vitesse moyenne des molécules. Nous découvrons là la signification profonde de la température : élever la température d'un gaz, c'est accroître l'agitation moléculaire. »⁴¹⁹ Cette appellation « agitation moléculaire » employée par Tréherne, permet sans faire référence à l'énergie (en l'occurrence à l'énergie cinétique microscopique), de faire comprendre de façon détournée la signification microscopique de la température (ici la température cinétique).

c. La notion de chaleur en classe de seconde

La notion de chaleur est introduite dans une partie distincte de celle de la température. Elle est présentée dans un premier temps, chez Tréherne, comme « la cause »⁴²⁰ de l'élévation ou de l'abaissement de la température d'un corps ou encore d'un changement d'état physique. Il énonce ainsi le deuxième principe de la thermodynamique, sans le nommer, « quand des corps échangent spontanément de la chaleur, la chaleur passe toujours des corps chauds sur les corps froids. »⁴²¹ Mais si Tréherne présente la chaleur comme une grandeur d'échange énergétique (on retrouve d'ailleurs l'appellation « échange thermique »⁴²² pour présenter le phénomène de convection), l'utilisation de l'expression « la chaleur passe » est très critiquable. En effet, cette faiblesse de langage pourrait laisser sous-entendre que la chaleur est quelque chose de matériel.

La réforme de 1966 est aussi l'occasion d'associer à la chaleur le joule comme unité internationale. Cette décision est probablement le fruit de la résolution adoptée par le Comité international des Poids et Mesures au cours de la Session de 1956 harmonisant l'unité de « travail, énergie, quantité de chaleur en Joule. »⁴²³ Mais comme nous l'avons vu précédemment, certains auteurs, notamment au cours des années 1930-1940 proposaient déjà l'utilisation du joule pour l'unité de la chaleur. Aussi, après avoir énoncé que « l'unité usuelle de la quantité de chaleur est

⁴¹⁸ (Tréherne, et al., 1971) p. 259

⁴¹⁹ (Tréherne, et al., 1971) p. 259

⁴²⁰ (Tréherne, et al., 1971) p. 267

⁴²¹ (Tréherne, et al., 1971) p. 268

⁴²² (Tréherne, et al., 1971) p. 268

⁴²³ Article consultable dans le BUP n°438 de janvier février 1958.

la calorie », ⁴²⁴ Tréherne ajoute « le joule [est] l'unité internationale et légale de [la] quantité de chaleur. » ⁴²⁵

Cette harmonisation est d'autant plus légitime que « un travail et une quantité de chaleur sont des grandeurs de la même espèce. » ⁴²⁶. Aussi après le lien de causalité avec la température, Tréherne montre que la chaleur et le travail sont deux grandeurs *équivalentes*. Pour illustrer cette proximité entre le travail et la chaleur, Tréherne ne présente pas l'expérience de Joule mais celle de Tyndall. (Cf. Figure 29)

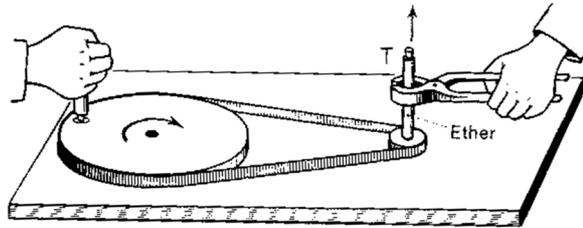


Fig. 4. Un exemple de transformation de travail en chaleur. (Expérience de Tyndall.)

Figure 29 Illustration de l'équivalence Chaleur Travail sur l'expérience de Tyndall⁴²⁷

L'expérience consiste à faire tourner rapidement un tube bouché contenant de l'éther entre les mâchoires d'une pince, le frottement engendre la vaporisation de l'éther qui fait sauter le bouchon. Ce choix peut se justifier, au-delà du souhait probable de se démarquer de l'expérience de Joule maintes fois présentée depuis le début du siècle, par une comparaison simple avec « des observations familières [...] une lame de scie qui entaille du bois, un foret qui perce un trou dans une pièce de métal s'échauffent... » ⁴²⁸

La conversion travail-chaleur est aussi abordée à travers les machines thermiques. C'est l'occasion pour Tréherne de mettre en garde le lecteur sur les restrictions de cette conversion, introduisant ainsi l'ébauche du principe de Carnot : « une remarque importante s'impose ici : alors qu'en

⁴²⁴ Jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle la calorie, associée à la notion de chaleur et de réaction chimique, restait dans le vocabulaire du monde scientifique. Mais le chimiste américain Wilbur Atwater (1844-1907) fait de la notion de calorie une constante de la nutrition. La calorie nutritionnelle, avec un C majuscule est l'équivalent d'une kilocalorie. Il faut attendre les années 1920 avec Lulu Hunt Peters (1873-1930) pour que la Calorie se démocratise dans le cadre de régimes alimentaires. Avec la première et la seconde guerre mondiale la Calorie se retrouve alors dans le langage courant car il était important pour l'effort de guerre "d'économiser les calories" ou lors de la reconstruction "d'ingérer suffisamment de calories". Des brochures étaient distribuées décrivant les besoins en calories en fonction de l'âge et du sexe ainsi que le contenu en calories de différents plats. Ainsi la calorie était devenue une unité courante et usuelle.

⁴²⁵ (Tréherne, et al., 1971) pp.270-271

⁴²⁶ (Tréherne, et al., 1971) p.271

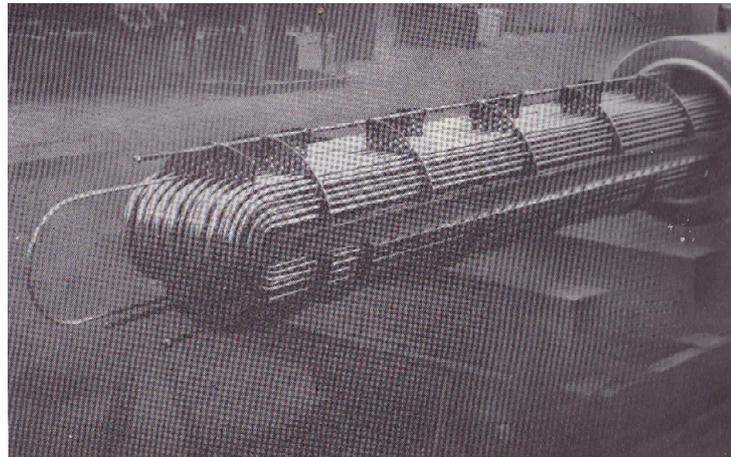
⁴²⁷ (Tréherne, et al., 1971) p.271

⁴²⁸ (Tréherne, et al., 1971) p.271

faisant intervenir des forces de frottement on peut transformer intégralement du travail en chaleur, un moteur thermique ne peut transformer en travail qu'une fraction de la chaleur que lui fournit la combustion d'un carburant. »

En outre, la calorimétrie est également abordée à travers un « principe de l'égalité des échanges de chaleur » : « à l'intérieur d'une enceinte thermiquement isolée, la somme des quantités de chaleur cédée par les corps qui se refroidissent est égale à la somme des quantités de chaleur que reçoivent tous les corps qui s'échauffent. »⁴²⁹ Aussi, Tréherne préfère introduire un principe supplémentaire laissant sous-entendre une conservation de la chaleur. Cette idée est malheureusement trop souvent présente dans les ouvrages (même assez récents) traitant de la calorimétrie. Il aurait été préférable de présenter que cette égalité est une conséquence d'un principe plus général : le premier principe de la thermodynamique dans des conditions particulières de transformation (isobare ou isochore), faisant ainsi le lien entre l'enseignement en classe de seconde et celui en classe de terminale.

Enfin, le programme étant commun avec celui des sections technologiques, Tréherne a souhaité ajouter dans son ouvrage des « pages techniques ». Il y étudie des machines ou des dispositifs empruntés au monde industriel, qui mettent en application les propriétés de la leçon. Aussi trouve-t-on dans le chapitre dédié à la chaleur deux applications : « montages de chauffage par circulation d'eau chaude » ainsi que « les échangeurs de chaleur ». (Cf. Figure 30)



Société Franco-Belge de Matériel

Un faisceau tubulaire pour centrale thermique E. D. F. en cours de montage (masse : 19 tonnes). Le faisceau tubulaire a 546 tubes en U de diamètre intérieur 12 mm, et de diamètre extérieur 16 mm ; sa longueur totale est 8,900 m. La pression du fluide est 179 bars et sa température 256° C.

Figure 30 Application industrielle des échanges de chaleur⁴³⁰

⁴²⁹ (Tréherne, et al., 1971) p.274

⁴³⁰ (Tréherne, et al., 1971) pp.282-283

Il est intéressant de remarquer que le langage choisi par Tréherne se rapproche davantage d'un langage industriel (proche du langage courant) qui n'est plus tout à fait celui présenté précédemment. En effet, il introduit par exemple : « *la puissance calorifique* » ou encore le « *rendement calorifique* »⁴³¹ de l'installation. Or le concept d'énergie calorifique ni même de capacité calorifique (Tréherne parle de chaleur massique ou de capacité thermique) n'ont jamais été abordées dans son cours.

d. Le concept d'énergie en classe de terminale

Le concept d'énergie est introduit en classe de terminale via le cours de mécanique, en présentant la conservation de l'énergie mécanique. Aussi, pour introduire le concept de chaleur, Tréherne présente dans son ouvrage, la restriction de cette conservation : « *il n'y a conservation de l'énergie mécanique que si aucune autre force n'intervient dans le mouvement considéré ; en particulier, il ne doit y avoir ni frottement, ni choc [...] en fait, l'énergie mécanique se dissipe plus ou moins rapidement et nous verrons dans le prochain chapitre qu'on doit admettre qu'elle se transforme peu à peu en chaleur.* »⁴³² Aussi, la chaleur est pour Tréherne, une forme particulière de l'énergie qui apparaît par dissipation de l'énergie mécanique.

Il présente alors l'énoncé du principe d'équivalence en l'illustrant notamment sur l'expérience de Tyndall, comme dans son ouvrage de seconde. Mais, Tréherne ajoute également à son exposé, l'expérience de Joule pour déterminer la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur. Le principe d'équivalence est ensuite illustré sur le chapitre des machines thermiques. On retrouve alors la description des machines avec de nombreux schémas représentatifs. Les diagrammes de Clapeyron et l'indicateur de Watt sont présentés pour évaluer les rendements des machines. Enfin, le principe et théorème de Carnot sont proposés avec un développement habituel. En outre, Tréherne suit le programme en énonçant le principe de conservation de l'énergie, qu'il nomme premier principe, en toute fin de la grande partie « *Energétique* » faisant office de conclusion générale. Sa présentation s'inscrit ainsi dans une démarche historique en ce qui concerne le premier principe.

Néanmoins, Tréherne est à l'avant-garde sur la présentation du deuxième principe de la thermodynamique. En effet, il tient à suggérer l'existence de celui-ci, qu'il nomme explicitement dans son document. Il va donc au-delà du programme, en justifiant que le rendement des moteurs est limité à cause d'une dégradation de l'énergie. Aussi résume-t-il :

« S'il est vrai que, selon le premier principe de la Thermodynamique, l'énergie d'un système isolé se conserve, il n'est pas moins vrai que ses transformations la rendent de moins

⁴³¹ (Tréherne, et al., 1971) pp. 280-281

⁴³² (Tréherne, 1955) p.118

en moins utilisable, ou si l'on veut, la **dégradent**, cette dernière conclusion pouvant être considérée comme une généralisation du second principe de la Thermodynamique.»⁴³³

On peut noter que Tréherne utilise un terme globalement absent des manuels du secondaire : le mot *Thermodynamique*.

L'originalité de la présentation se fait également par l'ouverture à la physique moderne du concept d'énergie. Il généralise ce concept en le comparant et en le liant au concept de masse. On retrouve ainsi à la toute fin de son chapitre *Energétique*, l'énoncé d'Einstein :

« Jusqu'à présent, dans nos cours de Physique et de Chimie, la masse et l'énergie ont été présentées comme deux grandeurs essentiellement distinctes, toutes deux conservatives. [...]

Au contraire la théorie de la relativité, affirme qu'à toute variation ΔW de l'énergie d'un système correspond une variation Δm (de même sens) de sa masse, ces deux variations étant liées par la formule d'Einstein :

$$\Delta W = \Delta m c^2$$

[...] remarquons l'énormité du facteur c^2 : il entraîne une grande disproportion entre les énergies et les masses qui correspondent. » et ajoute après avoir donné quelques ordres de grandeurs :

« [...] aucune balance ne peut déceler cette variation de masse de quelques millièmes de milligrammes : aussi est-il parfaitement légitime de la négliger dans tous les calculs de Chimie ordinaire et de continuer à leur appliquer la loi de Lavoisier [ce qui n'est pas le cas] dans les réactions nucléaires. »⁴³⁴

Comme nous l'avons vu, le Bulletin de l'Union des Physiciens est aussi un excellent support pour le partage et la diffusion des connaissances. Il permet entre autre aux enseignants d'échanger sur certaines approches pédagogiques ou certains concepts en physique. C'est donc aussi à travers ces articles que l'on peut étudier les conceptions des enseignants sur certaines notions. Aussi en 1958, paraît un article intitulé : « *La définition de la chaleur et le principe de l'état initial et de l'état final (Classes terminales)* » écrit par Ulysse Filippi (1905-19 ??), professeur agrégé au lycée de Marseille-Saint -Charles. Il présente dans son article le principe de l'état initial et final. Pour cela il définit le concept d'énergie interne qui a déjà été abordé dans certains ouvrages comme nous l'avons vu, mais qui n'est pas développé par Tréherne. L'énergie interne de Filippi est définie à travers la théorie d'inertie de l'énergie : « *On admettra aisément que toute masse de matière possède une certaine énergie que l'on appelle son énergie interne (la loi d'Einstein nous permettra de l'évaluer)* »⁴³⁵. Aussi énonce-t-il le principe de l'état initial et final : « *La variation d'énergie*

⁴³³ (Tréherne, 1955) p.160

⁴³⁴ (Tréherne, 1955) p.162

⁴³⁵ (Filippi, octobre novembre 1958) p.257

interne d'un système ne dépend que de son état initial et de son état final »⁴³⁶, ramenant l'énergie d'un système à l'énergie de masse uniquement. L'introduction de ces théories modernes apparaît donc comme une option possible pour définir l'énergie interne d'un système mais sans réellement lui donner une signification concrète. D'autant que l'on ne peut ramener l'énergie interne exclusivement à la relation d'Einstein, il est nécessaire de prendre en compte notamment les énergies dues aux déplacements des particules (énergie cinétique microscopique) les énergies dues aux interactions (par exemple interactions dues aux liaisons chimiques, interactions de Van der Waals *etc.*) Aussi la description proposée par Filippi de l'énergie interne est trop restrictive voire erronée.

D'autres aspects de la physique moderne apparaissent également dans l'article de Filippi. En effet, il donne à la fin de son article, une interprétation microscopique de la température : « *Elever la température d'une masse d'eau, c'est accroître l'énergie cinétique des molécules d'eau ; mais il s'agit d'énergie cinétique désordonnée qui ne peut pas être considérée comme de la véritable énergie mécanique.* »⁴³⁷ Mais l'interprétation que donne Filippi peut engendrer une confusion entre différents types d'énergie cinétique. Il aurait dû éclaircir son propos en précisant qu'il existe deux niveaux d'énergie : une à l'échelle macroscopique (dans lequel on retrouve l'énergie mécanique, et donc l'énergie cinétique macroscopique) et une à l'échelle microscopique (où l'on retrouve l'énergie de masse, que lui appelle maladroitement, énergie interne, mais également l'énergie cinétique microscopique).

e. Le concept de chaleur en classe de terminale

Le chapitre sur le principe de la conservation de l'énergie est aussi l'occasion de définir à nouveau le concept de chaleur. Mais comme l'explique Filippi dans son article « *Tous les professeurs de physique savent que notre enseignement ne fournit pas une définition satisfaisante de la chaleur et qu'il s'exprime « comme si » le calorique avait une existence réelle.* »⁴³⁸

Pourtant, il semble que la difficulté soit plus importante encore et que le langage y joue un rôle significatif. En effet, comme l'invite le programme, Tréherne liste les différentes formes d'énergie. Se basant sur la non conservation de l'énergie mécanique, Tréherne s'exprime : « *on est ainsi amené à considérer la chaleur comme une autre forme d'énergie, que l'on appelle **énergie thermique (ou calorifique)*** »⁴³⁹. Cette idée que la chaleur est une forme d'énergie est partagée par Filippi : « *La chaleur est de l'énergie mise en réserve par une substance quand elle subit un changement thermique qui pourrait être obtenu en contrepartie d'énergie mécanique ; Si un*

⁴³⁶ (Filippi, octobre novembre 1958) p.258

⁴³⁷ (Filippi, octobre novembre 1958) p.259

⁴³⁸ (Filippi, octobre novembre 1958) p.255

⁴³⁹ (Tréherne, 1955) p.157

changement thermique absorbe de la chaleur, le changement thermique inverse la restitue. »⁴⁴⁰
Celle-ci se trouve effectivement stockée dans un corps et directement liée à sa température. On retrouve donc les trois termes équivalents « *chaleur, énergie thermique et énergie calorifique* ». Nous avons eu l'occasion de discuter au chapitre 2 et au chapitre 3 de l'utilisation de ces termes qui pour certains auteurs sont totalement équivalents, alors que d'autres conçoivent l'énergie thermique ou l'énergie calorifique comme une forme particulière de la chaleur.

Pourtant certains éléments nous laissent penser que les auteurs ne voient pas en la chaleur ni même en le travail une grandeur énergétique comme les autres. Aussi Tréherne énonce dans le principe général de conservation de l'énergie :

« [...] à la suite de ces généralisations successives du principe de l'équivalence et de la notion d'énergie, tout corps ou système de corps apparaît comme possédant un certain montant d'énergie qui peut augmenter ou diminuer par échanges, avec d'autres systèmes, de travail, de chaleur, ou de toute autre forme d'énergie. »⁴⁴¹ La chaleur ainsi que le travail apparaissent alors comme des grandeurs d'échange qui permettent par interactions avec le milieu extérieur de faire varier l'énergie contenue dans un système. C'est d'ailleurs cette notion de système qui est l'objet du prochain paragraphe, car elle pourra apparaître comme nous le verrons plus tard dans ce chapitre, comme un élément important dans l'approche de la notion de chaleur.

f. L'introduction du concept de système en thermodynamique

A compter de 1957, un changement *a priori* anodin apparaît dans les programmes. Pourtant celui-ci aura un impact important sur l'enseignement de la thermodynamique, comme nous le verrons dans le chapitre 7. On retrouve l'emploi du mot *système* dans le thème « *énergie* » commun à la mécanique et à la thermodynamique. Ainsi dans les programmes de terminale, de 1957⁴⁴² et de 1966⁴⁴³, on trouve la référence à l'« *énergie potentielle mécanique d'un système* ». Mais le concept n'est pas repris dans la suite.

Avec l'introduction du mot « *système* » dans les programmes et les développements sur les bilans énergétiques, comme le principe initial et final, certains auteurs prennent la précaution de définir la notion de « *système* » voir même de « *système thermodynamique* » en préambule au cours sur l'énergie. Aussi, Tréherne en énonçant le principe d'équivalence, donne en préambule la définition suivante :

« On choisit un **système thermodynamique**, c'est-à-dire un corps ou un ensemble de corps capable de subir, entre deux états bien déterminés, une évolution, au cours de laquelle les

⁴⁴⁰ (Filippi, octobre novembre 1958) p.258

⁴⁴¹ (Tréherne, 1955) p.159

⁴⁴² Programmes de Sciences Physiques Terminale Mathématiques, extrait cité depuis (BUP, 1957)

⁴⁴³ Programmes de Sciences Physiques Terminale C et D, extrait cité depuis (BUP, 1966)

corps voisins qui forment le **milieu extérieur** n'échangent avec lui que de la chaleur et du travail »⁴⁴⁴

Cet énoncé nous amène à faire plusieurs remarques. Premièrement, Tréherne estime (en page 124) que la chaleur et le travail sont les deux uniques moyens que possède un système pour échanger de l'énergie avec le milieu extérieur. Alors qu'en page 159, (comme citée plus haut) il affirme que le système peut échanger autre chose que le travail et la chaleur (« *échanges, avec d'autres systèmes, de travail, de chaleur, ou de toute autre forme d'énergie* »). Aussi, l'on voit à travers cet exemple que chez un même auteur des contradictions peuvent facilement apparaître si le langage n'est pas clairement établi.

En outre, Tréherne utilise l'association « *système thermodynamique* » pour désigner le système d'étude. Cette appellation se distingue du système qu'il emploie dans le chapitre de mécanique dans lequel il définit le système par un point ou un ensemble de points matériels⁴⁴⁵ et non pas un corps ou un ensemble de corps. Un choix de vocabulaire qui peut laisser étendre qu'un système mécanique n'est pas la même chose qu'un système thermodynamique. Une distinction qu'il sera difficile à concilier dans l'exemple des machines thermiques.

Tréherne souligne également l'expression milieu extérieur, qui désigne la partie de l'espace avec qui ces échanges énergétiques sont effectués. Même si Tréherne en définitive préfère l'utilisation du mot « système » à « système thermodynamique », il l'emploie dès lors qu'il fait appel au principe de l'état initial et de l'état final, c'est-à-dire dès lors qu'il réalise un bilan d'énergie.

III. LA THERMODYNAMIQUE DANS LE SUPERIEUR

1. La Réforme des études supérieures

a. Une volonté de renforcer les filières scientifiques

Dans les années 1930, les écoles d'ingénieur se réorganisent. Au terme d'un long travail d'homogénéisation et de différenciation, qui dure une trentaine d'années, les écoles d'ingénieurs, s'intègrent dans une pyramide dont les différents niveaux sont déterminés par le concours. Après 1945, les carrières administratives et économiques supérieures s'ouvrent à un public plus large, et l'intégration au mérite est davantage privilégiée. La création de l'ENA en 1945 pour « démocratiser » l'accès à la haute fonction publique de l'État et le développement des grandes écoles de commerce aboutissent à la mise en place dans les années 1960 à un système de grandes écoles tel qu'il existe encore aujourd'hui, et à celui des classes préparatoires qui en est l'appendice.

⁴⁴⁴ (Tréherne, 1955) p.124

⁴⁴⁵ (Tréherne, 1955) p.47

Aussi, laissées en désuétude depuis les années 1941, les classes de mathématiques spéciales sont réorganisées. Dès la rentrée scolaire 1956-1957, les étudiants pourront faire un choix entre trois types⁴⁴⁶ de parcours: type A à prédominance Mathématiques, type B à prédominance Physique-Chimie⁴⁴⁷ et type C à prédominance Sciences Expérimentales⁴⁴⁸ (Sciences physiques et naturelles). Le nombre de concours accessibles augmente également dans le but d'adapter les profils des étudiants aux écoles. Il est en outre, convenu que le programme devra converger vers celui dispensé dans les universités. Mais, malgré cette refonte, le nombre des préparatoires à la fin des années 50 n'est pas supérieur à celui de la fin du 19^{ème} siècle.

Du 1^{er} au 3 novembre 1956 se tient le premier colloque de Caen⁴⁴⁹ pour *l'enseignement et la recherche scientifique* parrainé par Pierre Mendès-France (1907-1982), qui voit dans la recherche scientifique un des moteurs de l'économie française. L'objectif de ce colloque est de définir un certain nombre de mesures qui devraient permettre, dans le cadre d'un plan décennal, de doubler le nombre d'étudiants scientifiques ; tripler les proportions d'ingénieurs ; décupler le personnel de la recherche et celui de l'enseignement supérieur. Ce colloque permet en outre la création de l'A.E.E.R.S., Association d'Etudes pour l'Expansion de la Recherche Scientifique qui réunit régulièrement des chercheurs, des industriels, des savants, des syndicalistes *etc.* autour du développement scientifique. Mais, à la fin des années 1960, le constat reste dramatique et les effectifs notamment des premiers cycles de facultés de sciences sont en déclin, malgré l'instauration de deux filières techniques supérieures courtes : le Brevet de Technicien Supérieur (BTS) en 1962 et le Diplôme Universitaire de Technologie (DUT) en 1966⁴⁵⁰. Ainsi, Mendès-France écrit en marge du second colloque de Caen de 1966⁴⁵¹ :

« [La France] possède un nombre d'étudiants de loin le plus élevé d'Europe, [mais] nous donnera en 1966, moins de nouveaux docteurs en sciences qu'en Angleterre et Allemagne. Or, cette situation n'est pas accidentelle ou momentanée : toutes les informations confirment que, dans les trois ans qui viennent, nous disposerons de classes d'âge d'effectifs encore réduites de 25 % pour l'ensemble des orientations scientifiques [...] En janvier 1964, la Commission

⁴⁴⁶ (BO, 20 juin 1957) p. 2087, (BO, 12 septembre 1957) p. 2689, (BO, 17 octobre 1957) p. 3065. Il est à noter que certaines écoles ont fait le choix de conserver un programme qui leur est propre comme les écoles normales supérieures, Ecoles Nationales d'ingénieurs des Arts et Métiers *etc.*

⁴⁴⁷ Suivant la valeur des élèves et le niveau des concours où ils se présentent, les classes préparant le programme A et B s'intitulent Mathématiques Supérieures et Spéciales, Centrale, E.N.S.I., 1^{ère} et 2^{ème} année.

⁴⁴⁸ Filière notamment destinée aux écoles d'agronomie et de géologie.

⁴⁴⁹ Le choix d'une ville de Province, en l'occurrence Caen a été préféré à Paris, afin de montrer que le sort de la France toute entière ne se joue pas seulement à Paris.

⁴⁵⁰ Réforme Fouchet-Aigrain de juin 1966

⁴⁵¹ Colloque de Caen du 11 au 13 novembre 1966, réunissant 300 participants - au moment de la mise en place du plan Fouchet-Aigrain, aborde les questions de l'organisation et des finalités de l'enseignement et de la recherche, de la formation des maîtres et de l'éducation permanente.

*Boulloche*⁴⁵² calculait que, pour permettre à la France de tenir son rang dans la compétition économique, il nous faudrait au moins 12 000 ingénieurs nouveaux par an au lieu des 6000 que nous formions.»⁴⁵³

Cette désaffection est notamment due comme le dénonce Mendès-France à « *la rigidité de nos structures et de notre administration, l'étroitesse des règlements, l'abus des cloisons étanches...* »⁴⁵⁴ et contre cela suggère « *d'accepter [que] l'enseignement supérieur de masse [comme] un fait, un fait qui, globalement, est bénéfique.* »⁴⁵⁵

Le système de classes préparatoires est lui aussi dénoncé car il reste réservé à l'élite. Aussi peut-on lire dans l'Étudiant de France de 1969 : « *la sous-représentation des couches défavorisées de la population, si elle est déjà considérable dans les Facultés, est [en classes préparatoires aux grandes écoles] de deux à trois fois plus accentuée ! Cela est essentiellement dû à deux phénomènes : l'absence quasi totale d'information sur ces classes, leurs débouchés... hors d'un certain milieu ; si le nom de Polytechnique, de l'E.N.A., de Normal Sup' évoque quelque chose, l'homme de la rue est généralement bien incapable de préciser comment on y entre, ni ce que l'on y fait exactement. De plus la durée des études, la quantité de livres qu'elles nécessitent..., les ferment définitivement aux familles dont les revenus sont trop bas.* »⁴⁵⁶ Une ouverture sociale permettrait probablement une considérable augmentation des effectifs.

Pour répondre à cette désaffection, en sus de la création des filières technologiques courtes et d'un véritable accès méritocratique, les programmes et les pratiques doivent être modernisés, car comme le souligne Mendès-France en 1966 :

« *Je suis troublé encore lorsque des étudiants font état de l'inadaptation de certains programmes [...] Et je suis troublé enfin, quand de jeunes chercheurs, parmi les plus doués, s'irritent de rencontrer dans certaines disciplines ou certains laboratoires, la persistance de pratiques quasi féodales qui ne sont peut-être pas les plus propices à l'efficacité de la recherche.* »⁴⁵⁷

De la même manière que pour la réforme de l'enseignement supérieur, la formation des maîtres est également un enjeu des années post seconde guerre mondiale. C'est ce que nous allons aborder dans le prochain paragraphe.

⁴⁵² La commission Boulloche (du nom de l'homme politique André Boulloche (1915-1978)) émet un rapport en 1964 dans lequel sont dénoncés le système des concours, la durée des préparations aux grandes Écoles qui est jugée trop longue, etc. Le rapport propose en outre, de remplacer le baccalauréat par un certificat de scolarité décerné par un conseil de professeurs. Mais les réticences de ceux qui se sentaient visés par le rapport (la société des agrégés, les associations d'ingénieurs...) ont mis fin au projet.

⁴⁵³ (Mendès-France, 1966) p.48

⁴⁵⁴ (Mendès-France, 1966) p.51

⁴⁵⁵ (Mendès-France, 1966) p.50

⁴⁵⁶ (L'Étudiant de France, octobre 1969)

⁴⁵⁷ (Mendès-France, 1966) p.52

b. La formation des maitres

Pour répondre à la demande croissante d'enseignants, un nouveau corps de professorat du second degré est créé le 1^{er} avril 1950⁴⁵⁸ : Certificat d'Aptitude au Professorat de l'Enseignement du Second degré (CAPES). La forme finale du concours d'entrée dans ce corps est instituée définitivement en janvier 1952 notamment sous l'influence de la Société des Agrégés : le concours pour l'obtention du CAPES comprend deux parties indépendantes : premièrement une partie théorique qui comporte des épreuves écrites et une épreuve orale ; deuxièmement une partie pratique soutenue un an après le succès à la partie théorique. Cette organisation est justifiée par la volonté que le concours du CAPES ait un lien étroit avec celui de l'agrégation.

Mais il importe pour ces formations, au-delà du contenu disciplinaire, de préparer le futur enseignant à son métier. Aussi, le colloque de Caen de 1966 conclut : « *Il est indispensable qu'une année à plein temps de préparation professionnelle soit obligatoire pour être recruté comme professeur, quel que soit le titre académique ou le concours passé : licence, maîtrise, CAPES ou agrégation [...] Fixer des critères de recrutement qui ne soient plus seulement académiques. Progressivement et en annonçant ses décisions suffisamment longtemps à l'avance, le ministère devrait indiquer qu'il exige d'autres connaissances théoriques (psychopédagogiques) et un minimum d'aptitudes pratiques pour ses concours de recrutement (partie théorique du CAPES, agrégation...)* »⁴⁵⁹

Le contenu disciplinaire des concours tant du CAPES que de l'agrégation vont alors progressivement se reposer sur ceux des classes préparatoires. Aussi, en 1964, sont instituées trois options à l'agrégation des sciences physiques : option physique, option physique appliquée et option chimie⁴⁶⁰. Dans le même temps, il paraît le programme, et à titre d'exemple pour l'option physique, il est stipulé que : « *Le programme de l'épreuve A est le programme en physique enseigné dans les lycées classiques, modernes, techniques, ainsi que dans les classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques des types A, B et C, [...] L'épreuve C est un problème de physique, de durée sept heures et de coefficient deux. Cette épreuve porte sur le même programme que l'épreuve A ; elle est envisagée au niveau le plus élevé et au sens le plus large de ce programme.* »⁴⁶¹

⁴⁵⁸ Décret n°50-386 du 1 avril 1950

⁴⁵⁹ (Girod de l'Ain, 1966)pp.156-157

⁴⁶⁰ Arrêté du 27 février 1964 extrait du (BUP, avril mai 1964) p.709

⁴⁶¹ (BUP, avril mai 1964) p.710

c. Le programme de thermodynamique en classes préparatoires

Les réformes de programmes en classes préparatoires font suite à la refonte du système dans les années 1957. Au Bulletin officiel du 14 mai 1964, paraissent les programmes des classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques pour les sections A, B et C qui seront mis en place à la rentrée 1964-1965. Les sections B et B' correspondant au profil physique chimie est celle qui contient le plus important développement de l'enseignement de Thermodynamique.

THERMODYNAMIQUE ÉNERGÉTIQUE DES RADIATIONS

Les principes

* — Les concepts fondamentaux : notions d'état d'un système, caractère macroscopique et statistique de la description d'un état d'équilibre; transformations réversibles, irréversibles; conditions de la réversibilité thermique.

* — Principe de l'état initial et de l'état final; les grandeurs d'état « énergie interne U » et « enthalpie H ».

— Principe de Carnot-Clausius; énoncé pour une transformation cyclique monotherme. Conséquences pour les transformations monothermes ouvertes.

— Transformations cycliques avec deux sources : conséquences de l'énoncé relatif aux transformations monothermes; énoncé de Carnot et de Clausius. Cycle de Carnot. Température thermodynamique, relation avec la température définie par l'échelle du gaz parfait.

— Généralisation au cas d'un nombre quelconque de sources. Inégalité de Clausius. Définition de la grandeur d'état « entropie S ». Expression analytique du second principe.

— Conséquences. Cas des systèmes isolés ; entropie et irréversibilité. Exemples simples de variation d'entropie : chauffage isobare, compression isotherme d'un gaz parfait.

Principales relations entre les coefficients calorimétriques d'un fluide.

Formule de Clapeyron pour un changement d'état.

Figure 31 Extrait du programme section B et B'⁴⁶²

L'évolution est considérable vis-à-vis des programmes précédents. (Cf. Figure 31) Désormais une partie intitulée, « *Thermodynamique* » reprend en un tout cohérent, l'ensemble des deux principes et leurs applications. Le mot « *chaleur* » disparaît quant à lui totalement du programme, alors que les notions d'énergie interne, enthalpie⁴⁶³ et entropie apparaissent clairement. En revanche, aucune référence n'est faite au sujet de la thermodynamique statistique.

⁴⁶² (BUP, juin juillet 1964) p.810

⁴⁶³ Le mot « enthalpie » a été introduit par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) et diffusé dans la littérature scientifique en 1909 par J. P. Dalton. En 1922, Alfred W. Porter (1863-1939) propose que la lettre H devienne le symbole pour désigner l'enthalpie de Onnes. De nombreux débats se sont ouverts au cours du 20^{ème} siècle sur la genèse de ce mot obscurci par erreur, spéculation, et utilisation maladroite. Pour davantage de détails voir l'article *H Is for Enthalpy, Thanks to Heike Kamerlingh Onnes and Alfred W. Porter* de Irmgard K. Howard in *Journal of Chemistry Education*, 1^{er} juin 2002. (Howard, 2002)

Néanmoins le préambule « *les concepts fondamentaux* » où l'on retrouve la notion de système, permet aux auteurs d'introduire quelques notions de la théorie cinétique des gaz à travers le « *caractère macroscopique et statistique de la description d'un état d'équilibre.* » Cette partie permet alors de faire le lien entre les grandeurs macroscopiques caractéristiques du système (pression, température) et leur interprétation microscopique.

Enfin, il est à noter que la thermodynamique apparaît dans le programme indépendamment de la mécanique et se structure autour des deux principes et de leurs applications. Aussi, le programme des classes préparatoires se veut beaucoup plus ambitieux que les précédents et développe une présentation de la thermodynamique qui place les principes comme point de départ incontournable de la discipline.

Plusieurs commentaires peuvent être faits sur l'élaboration de ce programme. On peut tout d'abord noter que le deuxième principe de la thermodynamique est clairement cité ainsi que l'introduction de la notion d'entropie. Cette vision relativement moderne se distingue de celle relative au premier principe qui à travers l'état initial et l'état final apparaît, comme nous l'avons vu plus proche d'un développement historique (les appellations premier principe ou principe de conservation de l'énergie ne sont d'ailleurs pas proposées).

En outre, le concept de température (température thermodynamique) est abordé à travers le deuxième principe de la thermodynamique sous la forme du principe de Carnot-Clausius. Cette présentation est un moyen de distinguer la notion de température de la notion de chaleur, sans faire appel ni à la thermométrie (repère de température) ni à l'interprétation microscopique de la matière (température cinétique).

Enfin, la thermodynamique est abordée en premier lieu avec des « *concepts fondamentaux* » dont les « *transformations réversibles* » font partie. Si l'intérêt de l'étude de telles transformations en thermodynamique paraît évident, il est à noter que le programme ne souligne exclusivement que les conditions de réversibilité thermique. On peut alors se poser la question de savoir si la thermodynamique se limite à la thermique ? Car, il est clairement omis dans le programme, les critères mécaniques, chimiques *etc.* qui jouent un rôle tout aussi important pour établir une voie réversible pour une transformation.

2. Etude de l'enseignement de la thermodynamique à travers quelques manuels

a. Le choix des auteurs

Pour cette période d'après-guerre le choix des auteurs des ouvrages du supérieur s'est porté sur le cours de *Chaleur pour les classes de mathématiques Supérieures* publié en 1964 par Maxime Joyal (1905-1982), professeur au Lycée Charlemagne, qui s'inscrit dans la continuité de Faivre-Dupaigne et Lamirand avec qui il a co-signé certains ouvrages. En outre, nous pourrions peut-être

reconnaitre les influences des auteurs précédemment étudiés, puisque dans l'édition de 1941 de ce même cours, on peut ainsi lire « *Parmi les ouvrages qui nous ont servi pour la mise à jour de ce cours, nous devons citer le Cours de Thermodynamique de M. G. Bruhat, le volume sur les Gaz et Vapeurs du cours de M. Bouasse, et le récent livre Les chaleurs spécifiques de M. E. Brun.* »⁴⁶⁴

Nous étudierons également la cinquième édition du cours de Thermodynamique de Bruhat, publiée en 1962, et entièrement remaniée par Kastler. Aussi s'exprime-t-il dans la préface : « *Pour sa cinquième édition, le cours de Thermodynamique de Georges Bruhat a été profondément remanié, surtout dans l'ordre de présentation des questions. Nous espérons lui avoir conservé ses qualités essentielles qui allient clarté et rigueur. [...] [le but est de] fournir à l'étudiant une introduction à l'étude d'une science considérée à tort comme une partie ennuyeuse et peu attrayante de la physique.* »⁴⁶⁵

En outre, nous étudierons l'ouvrage d'un auteur étranger, qui a eu une influence certaine, notamment en France sur l'enseignement de la thermodynamique. Aussi *l'Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles* de Ilya Prigogine⁴⁶⁶ (1917-2003) parue en 1962 et traduit en 1968 par Jacques Chanu sera présentée dans la partie relative au deuxième principe.

Enfin, comme nous l'avons déjà fait précédemment nous utiliserons certains articles du BUP afin d'avoir un regard complémentaire sur la diffusion des concepts chez les enseignants de physique. Nous présenterons notamment l'article de Jean Mercier (1891-1962), ancien recteur de l'académie de Caen puis professeur à la faculté des sciences de Bordeaux, qui a écrit en 1957 un *Traité de Thermodynamique*, à l'usage de l'enseignement Supérieur des Ecoles d'Ingénieurs.

b. Le langage de la thermodynamique

En 1959, Mercier s'exprime ainsi dans un article du BUP: « *La Thermodynamique, telle qu'on l'enseigne, telle qu'elle est exposée dans les livres, apparaît comme une Science arrivée à son terme et à laquelle, depuis quatre-vingts ans environ, depuis Clausius, il n'y a plus à retoucher. Il suffit pour s'en convaincre d'ouvrir et de comparer les traités de la fin du XIX^{ème} siècle et ceux de maintenant. La présentation en semble figée. On éprouve bien parfois cependant le sentiment de quelque chose de suranné et qui date. Les notions les plus fondamentales comme celles de température et de chaleur sont encore introduites avec un empirisme désuet, et les*

⁴⁶⁴ (Joyal, 1941), préface p.6

⁴⁶⁵ (Kastler, et al., 1962), préface p.10

⁴⁶⁶ Prigogine est l'élève de Théophile De Donder (1870-1957) fondateur de l'Ecole bruxelloise de thermodynamique durant l'entre-deux guerres. Les travaux de De Donder ont eu un rayonnement important puisqu'on retrouve une référence dans l'article *On the irreversible production of Entropy* de Richard Tolman et Paul Fine, en 1948, sur l'introduction du second principe sous forme d'une égalité et non plus d'une inégalité et intégrant un terme de production d'entropie (Tolman, et al., 1948) p.51

principes, les grands principes, sont exposés d'une façon qui n'est pas exempte de toute critique. »⁴⁶⁷

Au cours des années 60, les ouvrages de thermodynamique semblent progressivement s'orienter vers une nouvelle présentation. Un point remarquable des ouvrages choisis, est l'apparition d'un chapitre ou d'un paragraphe, jusque-là absent des éditions précédentes, uniquement consacré à présenter quelques mots usuels dans le langage de la thermodynamique. Cette partie est intitulée chez Joyal simplement « *Définitions* »⁴⁶⁸ en préambule de la troisième partie de son ouvrage consacrée au « *premier principe et ses applications* ». Tandis que dans la cinquième édition du Bruhat le chapitre IV est consacré au « *définition[s] des termes employés dans le langage de la thermodynamique.* »⁴⁶⁹

Aussi, le langage apparaît désormais comme un point fondamental dans la formation de l'étudiant en thermodynamique (le chapitre du Bruhat y consacre par exemple 15 pages) :

« *Le langage utilisé par les thermodynamiciens emploie certains termes auxquels est attaché un sens précis et particulier.* »⁴⁷⁰ Mais Kastler se veut extrêmement prudent : « *nous allons essayer de définir ces notions* »⁴⁷¹

Le premier concept défini par les deux auteurs est la notion de « *système* ». Aussi trouve-t-on chez Joyal :

« *On appelle système un corps ou un ensemble de corps délimité dans l'espace. Tout ce qui n'appartient pas au système, mais est en relation avec lui, constitue le milieu extérieur. L'évolution du système qu'on appelle transformation, entraîne des modifications à l'intérieur du système, mais aussi dans le milieu extérieur. Au cours de cette évolution, il peut y avoir des échanges entre le système et le milieu extérieur.* »⁴⁷²

On retrouve une définition proche chez Kastler :

« *Un système est un corps ou un ensemble de corps de masse déterminée et délimité dans l'espace. Nous aurons à distinguer le système du reste du monde que nous appellerons le « milieu extérieur » La surface de contour qui sépare le système du milieu extérieur peut être une surface idéale, mais elle est le plus souvent matérialisée par des parois réelles. Un système peut échanger avec le milieu extérieur de l'énergie mécanique, calorifique, électrique, etc.* »⁴⁷³.

Sans entrer dans le détail des définitions sur lesquelles nous reviendrons au cours du chapitre 7, il est aisé de constater que la définition du système se fait à travers sa capacité à échanger avec le « *milieu extérieur* » que ce soit de la matière et/ou de l'énergie selon que le système soit ouvert

⁴⁶⁷ (Mercier, 1959) p.452

⁴⁶⁸ (Joyal, et al., 1964) p.89

⁴⁶⁹ (Kastler, et al., 1962) pp.21-36

⁴⁷⁰ (Kastler, et al., 1962) p.21

⁴⁷¹ (Kastler, et al., 1962) p.21

⁴⁷² (Joyal, et al., 1964) p.89

⁴⁷³ (Kastler, et al., 1962) p.21

ou fermé. On peut noter que la définition de Joyal et de Kastler se distinguent par l'introduction de la notion de masse, absente pour l'un mais présente dans l'autre.

Cette définition amène donc les auteurs à définir ces grandeurs d'échange et a fortiori le concept de chaleur. A noter que l'on retrouve chez Kastler la suggestion qu'il existe d'autres grandeurs d'échanges que le travail ou la chaleur, comme on a pu le voir chez Tréherne.

c. Le concept de chaleur

Pour Kastler, « *la thermodynamique a pour objet principal l'étude des relations entre la Mécanique et la Chaleur* ». Aussi, la notion de chaleur est un point fondamental de la thermodynamique. D'ailleurs, Kastler la considère comme présente dans un grand nombre de phénomènes physiques : « *des phénomènes calorifiques interviennent dans [...] les phénomènes électriques, [...] certaines transformations magnétiques, [...] la lumière, [...] les réactions chimiques.* »⁴⁷⁴ La chaleur apparaît ainsi comme un concept général et universel au même titre que l'énergie.

Pourtant, ce concept présente une réelle difficulté, comme le souligne Mercier dans son article de 1959 : « *La Thermodynamique, reconnaissons-le, n'est pas une Science facile. Les seules notions de Chaleur et de Température sont par bien des côtés des notions obscures et délicates. La grande difficulté résulte de ce que la Thermodynamique est une Science à notre échelle de phénomènes qui se passent à l'échelle moléculaire.* »⁴⁷⁵

Malgré cela, les auteurs d'ouvrages doivent nécessairement aborder dans leurs cours les notions de température et de chaleur. Aussi, travail et chaleur apparaissent chez Kastler et Joyal comme des grandeurs d'échange. Joyal donne dans son paragraphe consacré aux définitions :

« *[Les] échanges de travail [sont] dus aux forces d'interaction entre le système et le milieu extérieur. [...]*

[Les] échanges de chaleur à travers les parois limitant le système ; les parois sont dites diathermanes. »⁴⁷⁶

Mais Joyal poursuit :

« *Puisqu'on peut obtenir les mêmes effets d'échauffement soit par apport de chaleur, soit par apport de travail, nous dirons que chaleur et travail sont deux formes d'une même grandeur, l'énergie, et nous exprimerons chaleur et travail avec les mêmes unités. Le travail est de l'énergie mécanique, la chaleur est de l'énergie calorifique* »⁴⁷⁷

⁴⁷⁴ (Kastler, et al., 1962) Première partie, chapitre premier « *la position occupée par la thermodynamique dans l'ensemble des sciences physiques* », p.2

⁴⁷⁵ (Mercier, 1959) p.454

⁴⁷⁶ (Joyal, et al., 1964) p.89

⁴⁷⁷ (Joyal, et al., 1964) p.91

Cette idée d'*énergie calorifique* se retrouve aussi chez Kastler. En effet, il définit dans le chapitre consacré aux définitions, la chaleur et le travail comme des grandeurs d'échange d'énergie que peut effectuer un système avec l'extérieur. Puis, Kastler désigne le travail comme une énergie mécanique et la chaleur comme une énergie calorifique et admet nécessairement qu'« *il existe d'autres formes d'énergie qui peuvent être échangée entre un système et le milieu extérieur* » et cite « *l'énergie électrique, [...] l'énergie lumineuse.* »⁴⁷⁸ Il pose alors la question : « *comment faut-il généraliser le principe d'équivalence lorsque le système étudié échange avec le milieu extérieur non seulement de l'énergie mécanique et de l'énergie calorifique, mais aussi de l'énergie sous forme électromagnétique ?* »⁴⁷⁹ Pourtant concernant le transport de la chaleur, Kastler estime qu'« *il y a entre les deux corps échange de « rayonnement », ce rayonnement étant constitué par des radiations électromagnétiques du domaine infrarouge* »⁴⁸⁰ Aussi la chaleur est-elle déjà un échange d'énergie électromagnétique ?

Kastler donne ensuite « *l'énoncé du principe général de Conservation d'énergie :*
En tenant compte de toutes les formes d'énergie qui peuvent participer à l'échange entre un système et un milieu extérieur (énergie mécanique W , énergie calorifique Q , énergie électromagnétique de conduction ou induction E et énergie électromagnétique de rayonnement E') le principe général de conservation d'énergie qui résulte d'une extension du principe de l'équivalence, peut s'écrire pour un système qui décrit un cycle :

$$W + Q + E + E' = 0$$

Toutes les formes d'énergie étant comptées positivement lorsqu'elles sont fournies par le milieu extérieur au système, négativement lorsqu'elles sont cédées par le système au milieu extérieur. Lorsque l'état final B du système est distinct de l'état initial A , le principe de conservation de l'énergie prend la forme du principe de l'état initial et de l'état final :

$$W + Q + E + E' = U(B) - U(A)$$

Cette relation définit l'accroissement ou la diminution de l'énergie interne U du système. Cette relation s'applique à un système fermé qui n'échange pas de matière avec le milieu extérieur. »⁴⁸¹

On note une présentation historique du premier principe, sous la forme de l'état initial et final, plutôt que par la conservation de l'énergie. De plus, signalons que Kastler fait le choix de l'appellation exclusive d'*énergie calorifique* pour désigner la chaleur dans l'expression du premier principe. En outre, la confusion s'installe entre l'énergie qui ne dépend que de l'état final ou initial du corps et « *les énergies d'échange* » (qui sont *a priori* plus nombreuses que le travail ou la chaleur initialement citées). Pour distinguer ces grandeurs, certains physiciens comme l'a

⁴⁷⁸ (Kastler, et al., 1962) p.60

⁴⁷⁹ (Kastler, et al., 1962) p.61

⁴⁸⁰ (Kastler, et al., 1962) p.20

⁴⁸¹ (Kastler, et al., 1962) p.70

défendu un temps Mercier, ont introduit la notion d'« énergie de transit ». Aussi peut-on lire dans l'article de Gamper publié dans le BUP en 1962 :

« Les énergies qui ont une « forme », telles que travail, énergie électrique, énergie calorifique, énergie gravifique, sont des énergies en mouvement à travers la frontière séparant un système d'un autre système (le plus souvent l'extérieur) et n'ont cette forme que pendant la transformation ; après, c'est de l'énergie contenue dans un système, interne ou cinétique, mais sans « forme ». [...] elles sont fugitives, comme le présent entre le passé et l'avenir et servent de monnaie d'échange entre deux systèmes. »⁴⁸²

En outre, pour les désigner mathématiquement, une recommandation a été donnée à l'issue de la 14^{ème} Conférence internationale de Chimie 1947. *« Le symbole d doit être réservé aux différentielles de variables d'état ou de fonctions de ces variables d'état qui sont d'autres variables d'état thermodynamique, différentielles appelées généralement différentielles totales exactes. Physiquement elles représentent une variation infinitésimale d'une grandeur attachée à un système. (Exemple avec des notations classiques : dv , dp , dT , du). Le symbole δ est réservé à des grandeurs infiniment petites qui ne sont pas des variations d'une variable d'état d'un système, d'une grandeur attachée à un système mais qui représente presque toujours en thermodynamique des « parcelles » de grandeurs en mouvement, en transit, échangées entre systèmes. »⁴⁸³* Aussi, les grandeurs d'échange seront clairement distinctes de grandeurs énergétiques caractéristiques du système.

Mais, bien au-delà de ces considérations, Mercier a un jugement beaucoup plus tranché sur la question de la chaleur et du travail, balayant toutes les définitions que nous venons de présenter précédemment :

« Mais, me direz-vous, et la Chaleur ? On n'en a pas encore parlé ! Eh bien, en fait, la Chaleur ; ça n'existe pas et pas plus d'ailleurs que le Travail. Tous deux ont une existence aussi éphémère que le présent entre le passé et l'avenir. Cela peut sembler paradoxal ! Et pourtant ? [...] Quand un corps chaud, par contact avec un corps froid, lui cède de son énergie interne, on dit qu'il lui cède de la chaleur. C'est une façon de parler ! Et cette chaleur est aussi insaisissable que le travail précédemment ! On ne doit surtout pas la confondre avec une partie de l'énergie interne. Pauvre Chaleur, d'ailleurs. On lui accole des qualificatifs péjoratifs, voire outrageants. On dit d'elle qu'elle est dégradée ! Bienfaisante chaleur, pourtant. Il est vrai que je viens de vous dire qu'elle était inexistante ! Il n'empêche qu'un chapitre entier doit être consacré à l'équivalence de la Chaleur et du Travail, ces deux choses qui n'existent pas ! »⁴⁸⁴

Mercier dénonce alors un abus de langage qui a perduré et perdure encore en thermodynamique. La chaleur a pris dans les esprits et dans le vocabulaire employé la place qu'aurait dû occuper

⁴⁸² (Gamper, janvier février 1962) p.246

⁴⁸³ (Gamper, janvier février 1962) p.246

⁴⁸⁴ (Mercier, 1959) pp.456-457

l'énergie interne. Aussi, selon Mercier il est inévitable qu'il existe une grande confusion entre chaleur et énergie interne ! Nous reviendrons notamment sur ce point dans le chapitre 8.

Mais, la confusion peut venir également de la représentation que l'on se fait de l'énergie interne. En effet, si chaleur et travail ne sont que des grandeurs éphémères, elles restent toutes deux liées à l'énergie stockée au sein du système. Or, si l'on conçoit « facilement » la notion d'énergie cinétique microscopique qui peut être contenue dans un système, que peut représenter l'énergie interne ?

d. Le concept d'énergie interne

Dans son article de 1959, Mercier dresse un constat alarmant au sujet de l'énergie interne :

« Combien d'étudiants d'agrégation n'ont pas la moindre idée de la nature physique de l'énergie interne. Pour eux, ΔU , c'est ($\Delta Q + \Delta W$) alors que cette somme ne sert qu'à en mesurer les variations. Et voilà pour le premier principe. »^{485,486}

Pourtant Mercier ne définit pas non plus clairement la nature de l'énergie interne. Dans son article, il s'exprime ainsi :

*« C'est l'étude de cet ensemble équilibré et doué d'une agitation moyenne de ses éléments ultimes qui constitue l'objet même de la Thermodynamique. On dit alors que l'on est dans un « état défini » et, à notre échelle, il nous suffira de quelques paramètres pour le définir. [...] En particulier, il possèdera une certaine quantité d'énergie bien définie. Cette énergie, dite « énergie interne », est de nature complexe, à la fois mécanique et électrique. »*⁴⁸⁷ En outre, la référence énergie «mécanique ou électrique » ne fait-elle pas référence à la notion de travail ? On voit ainsi que l'énergie interne reste difficilement définissable et comme l'avoue Mercier : « [... elle] comprend en fait tout ce que l'on sait et tout ce que l'on ne sait pas encore, malgré les progrès de ces dernières années qui ne font que reculer les limites de la connaissance. »⁴⁸⁸

Chez Joyal comme chez Kastler, l'approche de l'énergie interne se fait au travers du principe de l'état initial et final :

*« La variation d'énergie interne d'un système dans une transformation est égale à la somme algébrique des énergies mécanique et calorifique reçues par le système. D'après sa définition même, la variation d'énergie interne peut être mesurée expérimentalement ; c'est donc une grandeur parfaitement déterminée. »*⁴⁸⁹

⁴⁸⁵ (Mercier, 1959) p.458

⁴⁸⁶ On peut s'étonner du choix de notion de Mercier, qui utilise la forme ΔQ et ΔW dans l'expression du premier principe. Ce choix de notation n'est pas justifié dans la suite.

⁴⁸⁷ (Mercier, 1959) p.458

⁴⁸⁸ (Mercier, 1959) p.458

⁴⁸⁹ (Joyal, et al., 1964) pp.101

Mais Kastler propose un paragraphe supplémentaire intitulé : «*Différentes formes d'énergie interne*», il énonce : «*l'énergie chimique, l'énergie nucléaire, l'énergie magnétique sont des formes particulières d'énergie interne, liées chacune à un changement de structure déterminée de la matière.*»⁴⁹⁰ Enfin, l'énergie interne est ramenée à l'inertie de l'énergie par la relation d'Einstein :

«*Comme toute variation d'énergie interne ΔU d'un système est liée, d'après la relation d'Einstein, à une variation de masse Δm , il est naturel de faire l'hypothèse que la totalité d'énergie interne U contenue dans un système matériel est liée à sa masse totale par la relation :*

$$U = mc^2$$

Une telle hypothèse fixe la constante indéterminée dans l'expression de l'énergie interne d'un système matériel. L'énergie interne est alors connue en valeur absolue. L'intérêt de cette hypothèse est d'entrevoir la possibilité que la totalité de l'énergie interne d'un système attaché à sa masse puisse être rendue libérable sous forme d'énergie échangeable, en particulier sous forme d'énergie électromagnétique. »⁴⁹¹ On retrouve une définition proche de celle de Filippi que nous avons critiquée précédemment : l'énergie interne ne pouvant se réduire à l'énergie de masse.

Aussi, l'énergie interne, même si ne semble toujours pas clairement définie, apparaît comme une énergie stockée au sein d'un système thermodynamique. Celui-ci est alors comme un réservoir d'énergie capable de l'échanger avec le milieu extérieur. Cette notion de réservoir ou de source d'énergie est en l'occurrence l'objet du prochain paragraphe.

e. Les sources de chaleur

L'existence ou non de la chaleur, renvoie vers une notion introduite au début du cours de Kastler, qui a été et est régulièrement employée en thermodynamique, celle de «*source de chaleur*». Kastler en propose une définition :

«*En thermodynamique on a l'habitude de supposer que l'échange de chaleur entre le système et le milieu extérieur se fait dans des conditions très particulières. On suppose que le système est mis en contact, à l'aide de parois diathermanes, avec un milieu extérieur qui se trouve à température uniforme T_0 , et dont la capacité calorifique est très grande par rapport à celle du système. Dans ces conditions l'échange de chaleur ne modifie pratiquement pas la température de ce milieu extérieur. Un milieu extérieur possédant ces qualités est appelé source de chaleur.* »⁴⁹²

Cette appellation renvoie naturellement à la confusion entre énergie interne et chaleur suggérée par Mercier. En effet, la référence à la capacité thermique et la variation de température fait clairement appel à la variation d'énergie interne du milieu extérieur (de volume constant) : $\Delta U =$

⁴⁹⁰ (Kastler, et al., 1962) pp.70-71

⁴⁹¹ (Kastler, et al., 1962) p.73

⁴⁹² (Kastler, et al., 1962) p.23

$c\Delta T$. Avec une capacité thermique c très grande (i.e. considérée comme infini), il est nécessaire que la variation de température ΔT soit nulle afin de conserver une énergie interne constante. Il s'agit alors d'une source d'énergie capable de la transférer à un autre corps par un mode de transfert particulier : la chaleur. Aussi, le mot source de chaleur paraît mal approprié. Car, comme le suggère Mercier, la chaleur comme « *le travail [sont] insaisissable[s] comme le présent entre le passé et l'avenir* »⁴⁹³ aussi si « *l'on connaît des réservoirs d'énergie, [...] on ne connaît pas de réservoirs de travail* »⁴⁹⁴ et par la conséquence directe, il ne peut exister de réservoirs (ou sources) de chaleur. Cela n'empêchera aucunement Mercier d'employer l'expression source de chaleur : « *On ne peut pas obtenir du travail avec une seule source de chaleur et il faut échanger de la chaleur avec au moins deux sources pour avoir du travail.* »⁴⁹⁵, montrant à quel point le langage utilisant des raccourcis peut être source de confusions.

Aussi, de manière plus générale, on peut trouver la définition de *source thermodynamique* comme on peut le lire dans l'article de Gamper de 1962 : « *On appelle source d'énergie de forme donnée, un système Σ , capable de délivrer ou d'absorber de l'énergie en transit de la forme donnée, sous une tension donnée X à chaque instant. Nous appellerons plus précisément source thermodynamique d'énergie, un système capable de délivrer ou d'absorber une quantité finie d'énergie de forme donnée sous tension constante. On utilise en particulier beaucoup des sources thermodynamiques de chaleur (concrétisées par des systèmes comme l'atmosphère, un océan) ...* »⁴⁹⁶ On est donc ici dans l'idée que le réservoir doit posséder une dimension importante pour avoir une capacité thermique importante, afin que la température reste constante. Gamper aurait pu en outre ajouter qu'il est possible de réaliser de tel réservoir, en utilisant des systèmes diphasiques pour lesquels les apports ou retraits d'énergie ne changent pas la température mais uniquement l'état physique.

f. Chaleur et deuxième principe

Mercier dresse sur l'enseignement du deuxième principe un constat là-encore accablant :

« *Le second principe notamment apparaît comme une espèce de pot-pourri. Ou bien, il n'est que l'expression du postulat de Clausius qui veut que la chaleur ne remonte pas spontanément l'échelle des températures, ou celle du rendement des machines thermiques ou encore l'affirmation de l'irréversibilité des phénomènes. Ou bien encore, il n'est là que pour introduire la notion d'entropie, pour laquelle, entre parenthèses, on adoptera une définition unique en son genre et dont on fera, suivant les circonstances, une notion énergétique ou un*

⁴⁹³ (Mercier, 1959) p.456

⁴⁹⁴ (Mercier, 1959) p.456

⁴⁹⁵ (Mercier, 1959) p.460

⁴⁹⁶ (Gamper, janvier février 1962) pp.353-354

coefficient de probabilité. Aussi bien, pour trancher la question, on fera des mathématiques d'un genre un peu spécial et on énoncera le principe de la façon suivante : $\frac{dQ}{T}$ est une différentielle exacte ou $\frac{1}{T}$ est le facteur intégrant de dQ ⁴⁹⁷. Et, pour répondre aux objections possibles et couper court aux demandes d'explications, on ajoutera : les principes ne se démontrent pas. Ce qui n'empêchera pas d'affirmer un peu plus loin qu'il s'agit d'un principe essentiellement expérimental. »⁴⁹⁸

Mercier souhaite donner à l'entropie une définition à travers la notion de chaleur. Il va tenter par ailleurs de faire comprendre au lecteur que cette notion devrait être bien plus courante et comprise qu'elle ne l'est jusqu'alors :

« *S est donc par essence le facteur de quantité de l'énergie calorifique*⁴⁹⁹. Ce n'est pas une pure construction de l'esprit, ne donnant lieu à aucune manifestation sensible, ainsi que je l'ai lu dans un ouvrage récent. Et ce n'est pas une grandeur plus abstraite que la quantité de mouvement ! Toutes deux ont d'ailleurs la même infortune de ne pas posséder d'unité de mesure et on peut le regretter car cela nuit à leur emploi courant et cela contribue à en faire des grandeurs plus ou moins imaginaires.

L'entropie souffre aussi de ce qu'on ne la mesure pas directement. Alors que pour toutes les autres formes de l'énergie, on mesure les deux facteurs du produit, d'où ce produit lui-même ; ici on mesure Q , on mesure T et on fait le quotient. Ce n'est rien apparemment mais c'est cependant énorme. On dit qu'une masse tombe de h_2 à h_1 et qu'une quantité de chaleur passe de T_2 à T_1 , alors qu'elle ne s'est pas conservée. C'est S qui est passée de T_2 à T_1 en se conservant ! Une telle impropriété de langage nuit beaucoup à la compréhension des choses »⁵⁰⁰

Aussi dans le discours de Mercier, c'est donc encore une fois une erreur de langage qui engendre une mauvaise compréhension de ce qu'est l'entropie. Il justifie son choix de considérer dans un premier lieu les transformations purement réversibles qui représentent un cas idéal, par le fait qu'en mécanique ce sont d'abord les systèmes conservatifs, c'est-à-dire les systèmes pour lesquels l'ensemble du travail d'une force est récupérable, qui sont en premier lieu présentés. Ce choix de présentation permettrait de donner un sens précis à l'entropie, qui sera généralisée ensuite dans le cas où celle-ci ne se conserve plus. Aussi, on peut critiquer l'utilisation par Mercier de l'expression « *en se conservant* » employée pour l'entropie. En effet, elle ne semble pas être appropriée dans la mesure où ce verbe peut laisser entendre que l'entropie se conserve. Il aurait

⁴⁹⁷ On retrouve par exemple cette définition de l'entropie chez Kastler (Kastler, et al., 1962) p.105

⁴⁹⁸ (Mercier, 1959) pp.452-453

⁴⁹⁹ Malgré ses précautions de langage, Mercier emploiera une fois l'expression « *énergie calorifique* » pour désigner la chaleur. (Mercier, 1959) p.461

⁵⁰⁰ (Mercier, 1959) pp.461

été préférable d'utiliser l'expression « *l'entropie reste constante i.e. la transformation est isentropique.* »

Mercier poursuit son exposé sur les transformations irréversibles. Ce que veut dénoncer Mercier est ce que l'on peut retrouver par exemple dans le cours de Thermodynamique de Bruhat :

« *[sur] un chemin réversible [...] : nous pouvons définir une fonction d'état S des variables indépendantes, telles que :*

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} = S(B) - S(A)$$

Pour toute transformation irréversible [...] : on a :

$$\int_A^B \frac{dQ_i}{T} < S(B) - S(A)$$

Lorsqu'un système thermodynamique évolue irréversiblement entre deux états successifs A et B la somme $\int_A^B \frac{dQ_i}{T}$ le long de cette voie irréversible est plus petite que la variation d'entropie $S(B) - S(A)$ »^{501, 502}

Or pour Mercier « *On se trouvait alors devant cette ahurissante anomalie (l'une grandeur dont l'évaluation ne correspondait pas à sa définition ($dS = \frac{dQ}{T}$) et cette anomalie, on la trouve dans tous les traités de Thermodynamique classique.* » Or dans le second cas $\int_A^B \frac{dQ_i}{T}$ ne correspond pas à la variation d'entropie car T y désigne la température des sources ! Aussi, préfère-t-il écrire :

$$\int_A^B \frac{dQ_i}{T'} < S(B) - S(A)$$

Où T' désigne la température des sources et non du système.

Le « *bain de jouvence* » que souhaite donner Mercier à la thermodynamique en la rendant comme il le dit lui-même « *plus vivante, plus claire et même attrayante et se laissant aborder facilement* »⁵⁰³, trouve progressivement écho dans la littérature.⁵⁰⁴ En effet, sous l'impulsion des travaux De Donder, portés par Prigogine, la présentation du deuxième principe va être profondément remodelée. Cette représentation sera un tournant fondamental dans l'enseignement de la thermodynamique, comme nous allons le voir dans ce qui suit.

⁵⁰¹ (Kastler, et al., 1962) pp. 105-106

⁵⁰² La notation δ n'est pas encore adoptée par Kastler.

⁵⁰³ (Mercier, 1959) p. 465

⁵⁰⁴ Les écrits de Mercier s'inscrivent dans une prise de conscience générale sur la difficulté d'enseignement de la thermodynamique.

g. Deuxième principe et entropie produite

Le deuxième principe est absent du cours *Chaleur* de Joyal car il est en priorité destiné aux élèves de mathématiques supérieures. En revanche, la réédition du Bruhat par Kastler, propose une réorganisation profonde pour présenter le deuxième principe. Alors que dans les éditions précédentes, l'énoncé du principe était directement suivi des applications, Kastler énonce les deux principes successivement (*Deuxième Partie* : « *Les Principes* » : chapitre V « *premier principe...* », chapitre VI « *deuxième principe...* »), puis en propose les applications (*Troisième Partie* : « *Relations générales résultant de la combinaison des deux principes* », *quatrième Partie* : « *Applications des principes* »). En revanche, force est de constater que le contenu global reste très proche de ce que proposait Bruhat en 1926 (on retrouve notamment l'expression du deuxième principe que nous avons présenté plus haut (Cf. Chapitre 3). Pourtant, à la fin du chapitre consacré à l'entropie, Kastler conclut :

« *Dans les phénomènes irréversibles (passage de la chaleur d'un corps à un corps plus froid, production de chaleur par frottement ou effet Joule, etc.) il y a toujours augmentation d'entropie lorsqu'on englobe dans le bilan d'entropie l'ensemble des corps qui participent à la transformation. On peut dire que tout phénomène irréversible donne lieu à une « création d'entropie ». La quantité d'entropie créée peut servir à caractériser le degré d'irréversibilité du phénomène.* »⁵⁰⁵ Même si Kastler l'avoue lui-même : « *Le livre présent contient de graves lacunes : on notera par exemple l'absence d'un chapitre sur l'étude thermodynamique des processus non réversibles.* »⁵⁰⁶ Il amorce ainsi la transition que l'on peut voir dans certains articles ou ouvrages concernant la réécriture du deuxième principe.

En effet dans son article de 1962, dont nous avons précédemment parlé, Gamper propose l'écriture du « *Principe de la création d'entropie* » et énonce ainsi :

« *Quand dans une transformation un système reçoit algébriquement la chaleur δQ d'une région extérieure dont la température thermodynamique est T_e et qui est au voisinage de la frontière du système, il reçoit algébriquement en même temps le support de cette énergie c'est-à-dire l'entropie :*

$$\delta S_e = \frac{\delta Q}{T_e}$$

[...généralisable à plusieurs sources]

$$\delta_e S = \sum_j \frac{\delta Q_j}{T_{e_j}}$$

[et] une transformation réelle ne peut avoir lieu que si elle est accompagnée d'une création d'entropie dans le système qui évolue. [...] Ainsi, il s'est créé nécessairement à l'intérieur du système une entropie

⁵⁰⁵ (Kastler, et al., 1962) p. 111

⁵⁰⁶ (Kastler, et al., 1962) préface p. v et vi

$$\delta_i S > 0$$

Donc (propriété extensive) :

$$dS = \delta_e S + \delta_i S$$

[...] l'énoncé précédent s'applique à toutes les transformations réelles et est à la base d'études des phénomènes irréversibles où l'on calcule maintenant l'entropie créée ce qu'on ne fait pas à partir des autres énoncés. [...] On peut donc écrire :

$$\begin{array}{l} \text{Transformation réversible} \\ \Delta_i S = 0 \end{array} :$$

$$\begin{array}{l} \text{Transformation irréversible} : \\ \Delta_i S > 0 \quad \gg^{507} \end{array}$$

Il s'agit d'une des premières présentations de l'énoncé du deuxième principe à partir de l'entropie créée dans un article à destination de l'enseignement. Pourtant, si cet article apparaît comme innovant, l'utilisation de l'adjectif *intérieur* pour désigner l'entropie $\delta_i S$, doit être prise avec une grande précaution. En effet, cette grandeur n'existe que par l'interaction du système avec un milieu extérieur, on ne peut donc la ramener à une quantité caractéristique de l'intérieur du système (il pourrait alors avoir un risque de confusion avec une fonction d'état caractéristique du système). En outre, la grandeur $\delta_i S$ ne peut pas être extensive, i.e. exclusivement ramenée au système : l'adjectif *additif* serait plus approprié pour qualifier cette grandeur.

Notons également que les grandeurs introduites sont associées à la notation δ stipulant qu'elles n'ont pas le caractère de fonction d'état à la différence de l'entropie.

Cette présentation du deuxième principe sous forme d'une égalité se retrouve dans l'ouvrage de Prigogine dont la première parution en anglais avait été proposée en 1962. Dans le document traduit par Chanu en 1968, Prigogine énonce⁵⁰⁸ :

« $d_e S$ est le flux d'entropie dû aux échanges avec l'extérieur et $d_i S$ la contribution due aux modifications intérieures du système [...qui] n'est jamais négatif »⁵⁰⁹

En outre, l'expression $dS = \frac{dQ}{T}$ peut être conservée sous réserve des conditions suivantes : « T est positive, T est une fonction universelle de la température du système obtenue par la mesure d'une propriété arbitraire comme la résistance électrique ; T est une propriété intensive, T est une fonction croissante de la température « empirique » du système. »⁵¹⁰ Soit, en utilisant une écriture du premier principe, Prigogine donne l'expression de la variation d'entropie :

$$dS = \frac{dE + pdV}{T}$$

⁵⁰⁷ (Gamper, janvier février 1962) pp.361-362 et 364

⁵⁰⁸ La notation δ n'est pas choisie par Prigogine pour désigner les quantités élémentaires de grandeurs qui ne sont pas fonctions d'état. En outre, l'utilisation du mot *flux* est dommageable puisque fait penser non pas à une quantité mais à une grandeur relative à une unité de temps.

⁵⁰⁹ (Prigogine, 1968) p.16

⁵¹⁰ (Prigogine, 1968) pp.18-19

Aussi peut-on accéder à l'expression de dS par cette relation et celle de $\delta_e S = \sum_j \frac{\delta Q_j}{T_{e_j}}$ (avec T_{e_j} la température de chacune des sources j) permet de déterminer $\delta_i S$ et conclure sur la réversibilité de la transformation.

On peut revenir également sur l'utilisation de l'adjectif *intérieur* dans l'énoncé de Prigogine. Bien que présent chez Gamper, l'adjectif *intérieur* est ici tout à fait approprié car il désigne cette fois les modifications du système dues aux échanges extérieures. On souligne encore une fois, la nécessaire précaution de langage qu'il faut employer dans les énoncés de thermodynamique.

Pour Prigogine, la force de cette écriture réside dans le fait que « le seul critère général d'irréversibilité est donné par la production d'entropie ... »⁵¹¹

Il est à noter que l'empreinte de Prigogine se retrouve dans la 6^{ème} édition du Bruhat. En effet, le succès de la 5^{ème} édition oblige les auteurs à faire paraître en 1968, une nouvelle édition. Or dans la préface Kastler s'exprime :

« La sixième édition diffère essentiellement de la précédente par d'adjonction d'un chapitre sur la thermodynamique des phénomènes non réversibles dû à Monsieur J. Chanu qui est expert en cette matière. »⁵¹²

Chanu y développe notamment les bilans entropiques sous formes d'égalités, introduisant l'entropie produite comme il l'avait traduit dans l'ouvrage de Prigogine. Notons néanmoins que cette réédition place le chapitre de Chanu à la fin de l'ouvrage, pour, selon les dires des auteurs, « éviter la repagination ». On voit ainsi que Kastler ne prend pas réellement la mesure de l'introduction du deuxième principe sous forme de bilan : les deux principes s'exprimant désormais sous forme d'une égalité. La présentation de Chanu apparaît finalement comme une autre approche possible de l'entropie.

IV. UN BILAN SUR LA PERIODE DE L'APRES-GUERRE

1. Un bilan sur les réformes de l'enseignement

La période d'après-guerre constitue une période où les remises en cause sont nombreuses, mais dont les conclusions ont du mal à se concrétiser. Le plan Langevin-Wallon en est un exemple frappant.

En outre, la réforme du supérieur ne s'est pas faite sans douleur, car un mouvement important de protestation s'est développé à la suite de la réforme Fouchet-Aigrain privilégiant une sélection sociale à une ascension méritocratique. L'agitation se développe dès la rentrée de 1967 dans les villes universitaires. Le 9 novembre 1967, un meeting organisé à Paris par l'UNEF (Union

⁵¹¹ (Prigogine, 1968) p.16

⁵¹² (Kastler, et al., 1968) préface à la sixième édition.

Nationale des Etudiants de France) s'oriente vers la Sorbonne. Cinq mille étudiants affrontent la police aux cris de « *À bas la sélection !* » Au cours des mois suivants d'autres mouvements et grèves éclatent, aboutissant à la grève générale de mai 68 enterrant définitivement le plan Fouchet. Il est remplacée en septembre 1968, par la loi Faure⁵¹³ qui crée les UER (Unité d'Enseignement et de Recherche), met en place une « autonomie » et la participation au fonctionnement de l'université par les étudiants, les enseignants-chercheurs et l'État.

Mais, la remise en cause de l'enseignement est en réalité à cette époque, un phénomène qui dépasse largement les frontières du pays. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, un rapport de près de 300 pages intitulé *General education in a free society*, fruit d'un comité réuni à Harvard au milieu de la seconde guerre mondiale, souligne la nécessité de refonder l'enseignement autour de concepts de base en tenant compte des avancées (rapides) de la science et des technologies. En 1956, le Comité d'étude des sciences physiques (PSSC) a été inauguré au MIT (Massachusetts Institute of Technology). Il a comme mission d'analyser l'enseignement de la physique et de proposer des améliorations. A l'issue des trois années d'expérimentation, un nombre significatif de nouveaux manuels de physique paraissent aux Etats-Unis, soulignant notamment l'unité de la physique et sa capacité d'évolution face aux découvertes récentes. Ce matériel et ces méthodes ont notamment été diffusés dans de nombreux pays (Canada, Colombie, Italie, Suède...) au cours des années 1960 et 1970.

En 1963, l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) publie un mémoire de trente-trois pages intitulé *Une Conception moderne de l'enseignement de la physique* proposant d'orienter la discipline dans une approche moderne et de mettre en relief les aspects récents de la discipline : « *les programmes traditionnels ne sont pas en mesure d'assurer l'équilibre entre disciplines littéraires et scientifiques, face aux exigences d'une société dans laquelle la science joue un rôle chaque jour plus important.* »⁵¹⁴

En France, l'urgence d'une réforme se fait sentir, car la désaffection pour les études universitaires scientifiques pointée par les Colloques de Caen est également due à un défaut d'élèves choisissant un profil scientifique dans le second degré.

La refondation des sciences a d'ailleurs débuté en France par une remise en cause de l'enseignement des mathématiques, dans les années 1950-1960. Une commission dite commission Lichnerowicz⁵¹⁵ voit le jour en 1966 pour favoriser l'introduction des mathématiques

⁵¹³ Edgar Faure (1908-1988) devient ministre de l'éducation nationale au lendemain des événements de mai 68.

⁵¹⁴ *Une Conception moderne de l'enseignement*, OCDE, citation extraite de (Belhoste, et al., 1996) p.64

⁵¹⁵ André Lichnerowicz (1915-1998) est agrégé de mathématiques et docteur ès sciences, avec une thèse sur la relativité générale. Il est élu en 1952 professeur de physique mathématique au Collège de

« modernes ». Car, si la réputation mondiale des mathématiciens français est à son apogée, l'enseignement des mathématiques semble en décalage avec les connaissances du même temps. Pour la physique et la chimie quelques années supplémentaires sont encore nécessaires pour espérer un profond changement des pratiques d'enseignement notamment dans le secondaire, comme nous le verrons au Chapitre 5.

2. Un bilan pour la thermodynamique

a. Un bilan dans le secondaire

Comme nous l'avons vu, le programme de thermodynamique en classe de seconde issu des réformes successives d'après-guerre, apparaît à l'aube des années 1970 comme relativement ambitieux. La théorie cinétique des gaz permet d'aborder la notion de température d'un point de vue microscopique et d'en donner une définition générale. Cette approche permet en outre de distinguer la température de la notion de chaleur. Celle-ci rapprochée de la notion de travail, est présentée en classe de terminale comme une grandeur énergétique : elle est une grandeur d'échange cause d'une modification éventuelle de la température.

Pourtant, comme nous l'avons vu le langage sur le concept de chaleur, comme celui de travail d'ailleurs, met en lien ces grandeurs avec respectivement l'énergie calorifique ou thermique et l'énergie mécanique. Il devient alors difficile de détecter en quoi ces grandeurs se distinguent de l'énergie stockée dans le système, que les auteurs nomment *énergie interne*. En outre, la définition de cette énergie interne n'apparaît généralement qu'à travers le principe de l'état initial et final définissant ses variations à cause « *des échanges de travail et de chaleur* ».

L'introduction de la relation de Einstein apparaît pour les auteurs une possibilité de rapprocher le concept d'énergie d'un concept *a priori* plus abordable, celui de masse. C'est donc par cette approche moderne que la réserve énergétique absolue des corps est présentée, mais là encore une confusion s'installe entre énergie de masse et énergie interne.

Au-delà du programme, les auteurs du secondaire comme Tréherne, présentent et définissent le « *système* » ou « *système thermodynamique* ». Il est la base d'étude des phénomènes thermodynamiques car c'est par rapport à lui que sont fixées les conventions d'échanges d'énergie. Cette volonté de définir les grandeurs et de préciser le vocabulaire employé semble être aussi présente dans les ouvrages du supérieur.

France puis membre de l'Académie des sciences en 1963. Il préside de 1966 à 1973 la Commission ministérielle, dite Commission Lichnerowicz, sur l'enseignement des mathématiques.

b. Un bilan dans le supérieur

En effet, le langage de la thermodynamique semble être devenu un point incontournable dans la transmission du savoir. Chez Bruhat, comme chez Joyal, une partie est consacrée à lister un certain nombre de définitions dont la première d'entre-elles est relative à la notion de « système ». Mais, paradoxalement, malgré une volonté d'éclaircissement de certaines idées en thermodynamique, les concepts d'énergie, de travail, de chaleur, de température ou encore d'entropie laissent souvent le lecteur dans une certaine ambiguïté. Aussi s'exprime Mercier dans son article de 1959, mettant en lumière ces difficultés :

*« Les commentaires donnés ne sont pas toujours très clairs et il semble parfois qu'un auteur cherche à vous faire comprendre ce qu'il n'a pas bien compris lui-même. Les explications varient d'un traité à l'autre et même quelque fois, pour un même auteur, d'une édition à la suivante. Aussi ne faut-il pas trop s'étonner que la Thermodynamique soit un peu un épouvantail pour les élèves qui ont à l'apprendre, pour les professeurs qui ont à l'enseigner et pour les techniciens qui ont à l'appliquer. Et il est bien certain que l'on voit traîner et passer d'un manuel à l'autre des raisonnements pas très clairs sans que l'on ose y toucher, y ajouter ou y retrancher quoi que ce soit, et cela beaucoup plus pour cacher son ignorance que pour faire preuve d'érudition. Je sais ce qu'il en est, car je suis passé par là. »*⁵¹⁶

Preuve de ce malaise, certains articles du BUP proposent de distinguer progressivement les grandeurs d'échange (chaleur et travail) appelées *énergie de transit*, dont l'existence est parfois remise en question, des énergies stockées au sein du système comme l'énergie cinétique ou encore l'énergie interne. Cette grandeur reste d'ailleurs sans définition claire, dans laquelle chacun des auteurs y placent toute sorte d'énergie, au risque comme le souligne Mercier, de confondre l'énergie interne avec la chaleur !

L'introduction de la physique moderne est dans le courant des années 60, présente dans les ouvrages, même si elle n'est pas développée dans les programmes de classes préparatoires. Aussi, Kastler aborde le troisième principe de la thermodynamique de Nernst et Planck et développe sur plus de 240 pages, la thermodynamique statistique. D'ailleurs, c'est dans le cadre de cette partie que Kastler reprend le concept d'énergie interne. Aussi, énonce-t-il dans l'interprétation des lois des gaz parfaits : « *l'énergie cinétique moyenne d'une molécule est indépendante de la pression, elle ne dépend que de la température du gaz. L'énergie interne d'un gaz monoatomique est égale à l'énergie cinétique de translation des molécules : elle est indépendante de la pression, conformément à la loi de Joule.* »⁵¹⁷ Kastler nommera cette même

⁵¹⁶ (Mercier, 1959) p.453

⁵¹⁷ (Kastler, et al., 1962) p.461

énergie cinétique « *énergie d'agitation thermique* »⁵¹⁸ dans les pages suivantes, un terme proche d'énergie thermique qu'il emploie pour désigner la chaleur...

Aussi, c'est à travers la physique statistique que la nature de l'énergie interne aurait pu être amenée dès l'introduction des principes de la thermodynamique. Cette approche pourrait être d'autant plus privilégiée par le fait que dès la classe de seconde est introduite la description microscopique de la matière et la définition microscopique de la température.

Un formalisme nouveau semble aussi progressivement s'imposer, distinguant les grandeurs d'état (comme l'énergie interne, l'entropie) dont les variations élémentaires seront notées "d" des grandeurs d'échange dont les quantités élémentaires sont notées "δ" (chaleur, travail, entropie échangée et entropie créée)

Le formalisme se développe également à propos du deuxième principe, où l'introduction de l'entropie créée permet de le présenter sous forme d'une égalité, comme le premier principe. La différence entre la variation d'entropie du système et l'entropie échangée avec le milieu extérieur doit être nécessairement positive, dans le cas d'une transformation réelle : l'entropie créée devient alors une mesure de l'irréversibilité.

Au-delà du travail que nous réalisons sur l'enseignement français, une remarque de Kastler nous interpelle sur le contenu des Traités de Thermodynamique en France. En effet, il suggère dans la préface de la cinquième édition du Bruhat : « *nous conseillons tout particulièrement aux futurs professeurs la lecture des traités étrangers.* »⁵¹⁹ Kastler écrira d'ailleurs en 1972 la préface du cinquième tome de la collection Berkeley dans laquelle il fait l'éloge des travaux de ces « *grands noms de la physique [...] des hommes connus pour leur œuvre personnelle [...] qui] font comprendre au lecteur que la Physique est une science vivante, une activité humaine en plein développement...* »⁵²⁰ Aussi, la thermodynamique présente dans les ouvrages français, ne semble pas satisfaisante et *a priori* en décalage avec les présentations que l'on peut trouver notamment chez certains auteurs aux Etats Unis, où la description à l'échelle microscopique des grandeurs est première.

La période qui vient de faire l'objet de discussions montre que les années 50-60 présentent de réelles avancées dans la présentation de la thermodynamique. L'introduction des descriptions microscopiques apparaît comme une solution pour donner aux grandeurs de température et d'énergie une signification plus accessible. En outre, le deuxième principe se présente désormais sous forme d'une égalité, et la réversibilité des transformations se mesure à travers la valeur de l'entropie créée. Mais au cours de cette période, certains auteurs comme Mercier, s'interrogent

⁵¹⁸ (Kastler, et al., 1962) p.505

⁵¹⁹ (Kastler, et al., 1962) préface p.vi

⁵²⁰ (Reif, 1972) préface p. v

sur l'importance du langage à employer en thermodynamique ; la notion de chaleur est notamment présentée comme une difficulté majeure dans l'enseignement.

Nous proposons de voir si ces interrogations vont se poursuivre dans la période suivante. Car, les débuts des années 1970 sont marqués en France, par la création d'une commission en faveur d'une refonte complète de l'enseignement des sciences.

PARTIE III

LA RENOVATION DE L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE A COMPTER DES ANNEES 70

CHAPITRE 5

L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE DE LA COMMISSION LAGARRIGUE AU DEBUT DES ANNEES 90

I. LA REFORME LAGARRIGUE

1. Une commission pour réformer l'enseignement des sciences physiques

a. Une « dégradation » de l'enseignement des sciences physiques

La situation dans laquelle se trouve l'enseignement des sciences physiques à la fin des années 1960 et au début des années 1970, est fortement critiquée. En cause notamment, la perte en 1969 d'une heure d'enseignement dans la classe de seconde qui devait être compensée en classe de Terminale à la rentrée 1971⁵²¹. En définitive, au début des années 1970 l'horaire global des sciences physiques est maintenant inférieur à celui dispensé en 1902. Pierre Marck, président de

⁵²¹ (BUP, Juin 1971)

l'Union des Physiciens publie une tribune dans le bulletin dénonçant une « *Dégradation de l'enseignement des sciences physiques.* »⁵²²

Aussi, peut-on lire comme témoignage du malaise des enseignants, des lettres publiées dans le Bulletin de l'union des physiciens mettant en garde les autorités de la nécessité de maintenir un enseignement de sciences physiques digne de ce nom. Jacques Senez, secrétaire de la section de l'Union des Physiciens de l'Académie de Lille, s'exprime ainsi, en 1971, dans une tribune intitulée « *une situation paradoxale et alarmante* » :

« L'allégement des programmes de sciences physiques aggrava encore ce déséquilibre : des chapitres supprimés en Seconde devront être obligatoirement étudiés en Terminale. C'est le cas, notamment, des machines simples, constamment utilisées pour concrétiser des notions nouvelles et abstraites. Citons comme exemples : la dynamique des systèmes de points matériels ; l'énergie mécanique ... Elles sont d'une importance telle, qu'elles font l'objet en classe de Mathématiques supérieures de très nombreux et subtils problèmes de statique sans et avec frottements. Dans un monde où la science fait des prodiges, où tous les pays, notamment, la Russie, l'Amérique et l'Allemagne, accroissent l'enseignement des sciences physiques, l'enseignement scientifique français se voit fâcheusement amoindri. Situation extrêmement paradoxale et alarmante tant du point de vue culturel qu'économique ! Points de vue qui, pour les Sciences physiques, sont impossibles à séparer tant ils sont enchaînés l'un à l'autre. Ce fait n'a pas été incompris par les puissances étrangères qui multiplient leurs efforts (ces efforts deviennent presque des sacrifices pour certaines) pour développer intensément cet enseignement. Seule une étude prolongée des sciences physiques permet d'acquérir cet esprit à la fois déductif et inductif apte à se concrétiser facilement en réalisations scientifiques directement utilisables. [...] Dans la conjoncture d'un marché commun européen de l'emploi, les ingénieurs et techniciens français se verront boudés et délaissés par tous nos partenaires et ce qui est plus grave, les responsables patronaux français donneront la priorité à des cadres étrangers ayant subi un enseignement scientifique beaucoup plus intensif. Voilà nos ingénieurs et techniciens, prédestinés au chômage s'ils ne veulent pas accepter un emploi subalterne !... En réduisant de l'enseignement français ce qui favorise et développe les idées créatrices, le nombre de brevets français se verra très vite réduit à l'insignifiance. Or, la force, la vitalité, l'indépendance et la richesse d'une industrie se mesure au nombre de brevets nationaux. Diminuer la possibilité d'obtention de nouveaux brevets nationaux, c'est perdre notre industrie et restreindre nos apports financiers ! [...] Peut-on imaginer qu'à une époque où le progrès scientifique n'a jamais connu une telle évolution, où les techniques nouvelles nous subjuguent et dépassent parfois l'entendement, l'on veuille condamner les futures générations françaises à ne jamais comprendre comment fonctionnent les machines qu'ils auront constamment à utiliser ? Et ceci pour la simple raison qu'on écrique dans l'enseignement français ce qui permettait justement d'inculquer à tous certaines notions générales

⁵²² (BUP, octobre 1971) p.1

de Sciences physiques, nécessaires à la compréhension et à l'étude d'un monde de plus en plus mécanisé. Nous ne pouvons croire que le futur « Homme Cultivé Français » soit, avant de naître, condamné à vivre dans un monde qu'il ne comprendra et ne pourra jamais comprendre, un monde où l'homme sera asservi par la machine alors qu'initialement elle fut créée pour le servir ! Le progrès, dans ces conditions, ne donnera pas à l'Homme cette haute et noble dignité humaine qu'il recherche, mais au contraire, le rejettera dans un mode de vie qui ressemblera étrangement à celui des temps préhistoriques avec ses nombreux Tabous.»⁵²³

On reconnaît ainsi dans ce manifeste, une référence, sans les nommer aux *humanités scientifiques* revendiquées soixante-dix ans auparavant lors de la réforme de 1902. La formation de l'Homme passe par une culture en sciences afin de pouvoir appréhender le monde dans lequel il vit. En outre, donner une place suffisante aux sciences physiques dans la formation des élèves c'est assurer une place importante à la France face aux autres grandes puissances mondiales.

André Lagarrigue (1924-1975), futur président de la commission en charge de la rénovation des programmes, s'exprime ainsi le jour de sa nomination pour dépeindre la situation des sciences en France :

« Les raisons de s'alarmer ne manquaient pas. La première, qui mesure en quelque sorte le malaise de cet enseignement, est la désaffection sensible des élèves vis-à-vis des sections scientifiques : terminales C par exemple, avec pour conséquence la stabilisation, la diminution parfois des candidats étudiants aux sections MP et PC de nos universités. La deuxième, c'est la suppression de la physique au baccalauréat en terminale A. Il nous paraît extrêmement grave que la grande majorité des futurs cadres de la nation ne reçoive pratiquement pas de formation aux sciences expérimentales. Indépendamment du rôle essentiel que jouent ces sciences dans l'économie d'une nation moderne, elles nous semblent l'outil idéal de formation de l'esprit pour compléter ce qu'un enseignement de plus en plus abstrait des mathématiques, certes nécessaires, apporte à l'esprit. La référence constante à l'expérimentation, au réel, le fait d'aborder un même problème avec des approches si différentes et parfois apparemment contradictoires, font des sciences physiques l'instrument le mieux adapté à la préparation aux multiples problèmes de la vie qui se présentent rarement avec la beauté d'un problème mathématique parfaitement défini. »⁵²⁴

Le commentaire de Lagarrigue reprend ainsi les arguments de Senez, mais souligne en outre que les sciences physiques représentent une science plus riche que les mathématiques, dans la mesure où ces dernières ne reflètent pas assez la réalité et la complexité du monde.

En avril 1970, la Société Française de Physique, l'Union des Physiciens et la Société Chimique de France présentent un rapport conjoint demandant une rénovation en profondeur de l'Enseignement des Sciences physiques en reprenant l'argument signalé plus haut : « *les sciences*

⁵²³ (Senez, octobre 1971) pp.97-100

⁵²⁴ (Guignier, juillet, août, septembre 1971) pp.1117-1118

*physiques sont indispensables à la formation de l'homme du vingtième siècle et ont leur place parmi les disciplines fondamentales. »*⁵²⁵

b. La constitution de la commission Lagarrigue

Face à ce malaise général, une « *commission d'Etude pour l'Enseignement des sciences physiques dans le Second Degré, appelée aussi Commission d'Etude pour l'Enseignement de la Physique, de la Chimie et de la Technologie* »^{526, 527} est constituée à la demande du ministre de l'éducation nationale Olivier Guichard (1920-2004). Elle est présidée par André Lagarrigue (1924-1975), physicien, président de la Société française de physique et professeur d'Université à Orsay. Réunie pour la première fois le 27 mai 1971, son objectif initial est de répondre à trois demandes :

1. améliorer l'enseignement de la technologie dans le premier cycle⁵²⁸
2. remédier à « *la vétusté des programmes* », au « *caractère archaïque et souvent rébarbatif de l'enseignement actuel des sciences physiques* », et « *donner aux élèves [...] un aperçu de la richesse intellectuelle et philosophique de ce qu'on appelle, depuis le début du siècle, la Physique Moderne.* »⁵²⁹ Nous avons vu dans la période précédente que l'introduction des descriptions microscopiques et l'introduction de la statistique apparaissent comme des éléments nouveaux dans les sciences physiques et notamment en thermodynamique. Cette volonté de poursuite dans cette voie semble présente dans les objectifs de la commission.
3. rénover la formation des maîtres.

Pour répondre à ces demandes, en sus de la commission, est créé un groupe de travail permanent de six (puis vingt) personnes, animé par le physicien et didacticien Goéry Delacôte (1939-20..). La commission est constituée de cinquante-deux membres⁵³⁰ issus d'horizon beaucoup plus variés que ceux de la commission de 1901. Les provinciaux sont peu représentés (environ 17%), mais la composition se veut aussi refléter le monde dans son ensemble puisque des représentants du monde industriel sont présents (le directeur scientifique de chez Thomson CSF et un chef de service de l'Institut Français du Pétrole), des inspecteurs de l'éducation nationale, des directeurs de laboratoires ou centres de recherches (C.N.R.S, Institut National de Recherche et de Documentation Pédagogique *etc.*) ou d'écoles d'ingénieurs (Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris), ainsi que des enseignants de physique (mais aussi de mathématiques comme Lichnerowicz qui avait participé comme nous l'avons vu à la réforme des mathématiques dans

⁵²⁵ (BUP, juin 1970) p.872

⁵²⁶ (Guignier, juillet, août, septembre 1971) p.1109

⁵²⁷ Finalement connue sous le nom « *commission Lagarrigue* », du nom de son président, André Lagarrigue.

⁵²⁸ Cela aboutira notamment à l'introduction de la physique en classe de 6ème, conjointement avec la technologie.

⁵²⁹ (Guignier, juillet, août, septembre 1971) p.1119

⁵³⁰ (Guignier, juillet, août, septembre 1971) p.1109

les années 1960) du secondaire, du supérieur et du technique. Le monde associatif est représenté à travers l'Union des Physiciens par son président Georges Guinier (1908-1993), la Société Chimique de France, par son vice-président Jacques Bénard (1912-1987), et la Société Française de Physique par son secrétaire Michel Hulin (1936-1988). Comme l'annonce Lagarrigue en 1973 dans le Bulletin de l'Union des Physiciens, après la première année d'activité :

« Le nombre de problèmes à résoudre est considérable. Nous étions tous conscients qu'une rénovation des enseignements de sciences physiques ne pouvait se borner à un simple changement de programmes. D'abord, il nous apparut nécessaire de définir une doctrine de cet enseignement. Pour cela, nous avons élaboré deux documents de caractères très différents. Le premier [...] a voulu se donner un certain caractère un peu provocant en mettant en lumière quelques idées-chocs [...] pour animer les discussions et bien mettre en valeur la nécessité d'une rénovation profonde de la façon d'enseigner les Sciences physiques. Le deuxième document [est...] une déclaration qu'ont bien voulu approuver et signer de très nombreuses personnalités scientifiques de notre pays, spécialistes des sciences expérimentales aussi bien que des mathématiques les plus actuelles [pour] affirmer qu'un enseignement des Sciences expérimentales comprenant aussi bien la Physique, la Chimie, la Biologie et les enseignements techniques, doit apparaître comme une discipline fondamentale [et] équilibrer cet enseignement de Sciences expérimentales avec celui des Mathématiques, de façon qu'apparaisse clairement le caractère complémentaire et indissociable de l'approche théorique et de l'approche expérimentale. »⁵³¹

La volonté est clairement de mettre en avant les sciences expérimentales. Mais il est également signalé que les mathématiques sont un outil à la formalisation de la science. C'est là une volonté claire de placer les sciences physiques sur un même pied d'égalité que les mathématiques, sans voir la suprématie d'une science sur une autre.

En outre, à la vue des objectifs annoncés, comprend-on que le travail de la commission Lagarrigue sera un travail de longue haleine. Pourtant le ministre souhaite aller vite et espère que la commission achèvera sa mission en 1973 : *« La réforme doit pouvoir être mise en place en octobre 1972, ce qui suppose que les grandes lignes des programmes devront avoir été définies vers Pâques 1972 au plus tard. Dans toute la mesure du possible, le programme détaillé de la classe de seconde devra être établi pour octobre 1971 (sinon les nouveaux programmes seraient introduits à la fois en Seconde et en Première, mais en octobre 1973). »⁵³²*

⁵³¹ (BUP, janvier 1973) pp.497-498

⁵³² Directives de M. Olivier Guichard, le 27 mai 1971, citation extraite de (BUP, octobre 1977) p.8

2. Les réponses données par la commission

Le calendrier ne sera jamais respecté. La commission Lagarrigue est dissoute en septembre 1976 à l'issue de cinq années de travail. Mais, parmi les missions fixées initialement, seuls ont été menés à bien les programmes et leurs commentaires. En effet, divers obstacles sont venus s'opposer au bon déroulement des travaux. Le premier d'entre eux est le décès soudain du président Lagarrigue en janvier 1975. En outre, le 11 janvier de la même année est publiée la loi Haby⁵³³. Elle vise notamment à instaurer le « *collège pour tous* ». Cette loi nécessite alors une réponse rapide de la part de la commission pour établir des programmes applicables au plus vite, comme l'avoue Roland Omnès (1931-20..), président de la société française de physique et successeur de Lagarrigue à la tête de la commission, en 1975 : « *Le calendrier est devenu non seulement précis mais pressant. Nous devons prévoir une réalisation et une généralisation à très court terme pour la rentrée de 1977.* »⁵³⁴

Aussi, la commission Lagarrigue n'a plus lieu d'être et est supprimée avant d'avoir rempli toutes ses tâches : « *Malheureusement, le déroulement de nos travaux s'est trouvé heurté par les circonstances : partie pour construire une réforme cohérente de l'enseignement, la Commission a dû, après bien des incertitudes sur son existence même, entreprendre en toute hâte la rédaction de programmes adaptés au cadre de la réforme générale proposée par M. HABY. Ce travail considérable, mais en soi insuffisant, étant terminé, le Ministre a décidé la suppression de la Commission alors que beaucoup restait à faire.* »⁵³⁵

Le constat tiré par Omnès est assez sévère :

« *L'ensemble de notre enseignement n'a pratiquement pas fait l'objet de réflexion approfondie alors même qu'il subissait les mutations les plus profondes, notamment dans ses effectifs. Dans son orientation, ses résultats, ses réformes chaotiques il soulève de plus en plus d'inquiétudes et de critiques. Il est proprement aberrant qu'une activité aussi importante dont dépendent notre avenir, notre richesse et notre épanouissement n'ait jamais été abordée avec méthode. Il y a longtemps que l'on a créé et réalisé, pour le développement économique, des plans pluriannuels qui fixent des options d'avenir et des objectifs à terme. Rien ne serait plus facile que d'en faire autant pour l'éducation. En l'absence d'une telle vue d'ensemble, la Commission s'est consacrée à l'enseignement des sciences physiques. Elle l'a fait avec une méthode qui mériterait probablement d'être suivie ailleurs. Elle s'est posée quelques questions fondamentales : faut-il enseigner les sciences physiques ? pourquoi ? quand et de quelle manière convient-il de*

⁵³³ Du nom du ministre de l'Éducation nationale René Haby (1919-2003).

⁵³⁴ Les nouvelles tâches de la commission Lagarrigue, novembre 1975, citation extraite de (BUP, octobre 1977) p. 70

⁵³⁵ Allocution de M Roland Omnès, le 4 février 1977, citation extraite du (BUP, octobre 1977) p.114

le faire en tenant compte du développement de l'enfant ? Elle a cherché à y répondre et à éprouver ses propositions de contenus et de méthodes par une expérimentation étendue.»⁵³⁶

Concernant les programmes, l'innovation majeure dans les classes littéraires réside notamment dans l'organisation suivant des thèmes librement choisis par les professeurs pour l'enseignement de la physique-chimie. L'objectif est de donner une culture scientifique nécessaire à l'Homme « moderne » : « *Le programme est conçu pour des élèves ne se destinant pas à des études scientifiques. Il vise à leur donner une culture générale en les informant sur des problèmes extrêmement importants aussi bien sur le plan fondamental que sur celui des applications pratiques. Les sujets proposés se rapportent à l'énergie, aux ondes, à la chimie organique, à la grande industrie minérale et à la métallurgie.* »⁵³⁷

En outre, la commission a souhaité une organisation novatrice et valorisante de l'enseignement autour de « grands principes ». En effet, cette ambition apparaissait déjà dans le bilan que donnait à mi-chemin, Lagarrigue : « *La nécessité d'acquérir quelques connaissances de base dans les domaines scientifique et technique : grandes lois d'invariance, masse, énergie, chaleur, vibrations, mais aussi modèles microscopiques des atomes, des liquides, des gaz, ouvertures sur le monde technique le plus moderne que les enfants découvrent dans la vie quotidienne [...] L'initiation aux modes de raisonnement des sciences physiques, en mettant bien en valeur tout ce qu'une démarche partant du concret, de l'observation, de l'expérimentation pour aboutir à la conceptualisation et à la formalisation et retourner d'ailleurs à une expérimentation nouvelle d'utilité mais aussi d'enrichissant pour le développement de l'esprit humain[...] Enfin, ne pas hésiter à abandonner tout ce que l'enseignement français des sciences physiques a de trop cartésien, de trop formel, pour faire une plus large part à l'intuition, à la découverte de la solution par approximations successives. Egalement, essayer d'introduire une vulgarisation au sens noble du terme pour répondre à la curiosité des enfants et, en un mot, leur donner envie d'en savoir davantage et de le connaître mieux.* »⁵³⁸

Nous pouvons faire quelques remarques vis-à-vis de la déclaration de Lagarrigue. Tout d'abord, parmi les thèmes fondamentaux à aborder il est fait référence aux lois d'invariance, à la masse et à l'énergie. Mais le mot « chaleur » est également cité. On peut se demander en quoi la chaleur apparaît ici clairement dans le document. En effet, la chaleur n'apparaît dans aucune loi de conservation. Est-elle présente pour en souligner les difficultés de représentation, comme nous l'avons signalé dans les précédents chapitres ? Lagarrigue voit-il en la chaleur, un concept global et universel comme le suggère Kastler ? (Cf. chapitre 4)

⁵³⁶ Introduction au supplément spécial sur la commission Lagarrigue par Rolland Omnès dans le (BUP, octobre 1977) p.4

⁵³⁷ (BUP, avril 1979) p.970

⁵³⁸ (BUP, janvier 1973) p. 497

Concernant les méthodes d'enseignement, aux côtés des grandes principes, Lagarrigue propose de former les élèves aux démarches inductives en se basant sur des observations concrètes afin d'aboutir à une formalisation des concepts. Lagarrigue va même au-delà en proposant de faire appel à l'intuition des élèves, à simplifier l'approche de la physique pour la rendre attractive. La rigueur des mathématiques, apparaît alors comme un handicap à l'enseignement des sciences.

On peut en outre, signaler l'absence de certains thèmes proches de la physique du quotidien, malgré la volonté de faire des sciences physiques une science du concret. En effet, disparaissent des programmes scientifiques, l'hydrostatique, la résistance de l'air, les propriétés physiologiques des sons, le principe de la radio et le deuxième principe de la thermodynamique, sur lequel nous reviendrons.

La méthode d'enseignement est également reprise, favorisant un apprentissage dynamique et varié où l'élève est acteur de sa formation et promouvant un lien fort avec le quotidien mais aussi avec l'histoire des sciences : « *Il est souhaitable d'alterner diverses méthodes de travail : travaux pratiques, cours avec expériences, travail autonome et exposés d'élèves, synthèses faites par le professeur. Il faut, avant tout, développer la curiosité scientifique des élèves et mettre en relief les méthodes propres aux sciences physiques : expérimentation, interprétation, induction, déduction. Il convient d'éviter l'emploi abusif de termes techniques de même que tout développement mathématique non indispensable. On peut exploiter, soit une application technique qui a éveillé l'intérêt, soit des expériences réalisées ou décrites, actuelles ou historiques, et débouchant sur des applications modernes. Il est suggéré d'utiliser des ouvrages de vulgarisation scientifique actuels, des diapositives et des films, des extraits de presse. Il pourra être intéressant, dans certains cas, de faire appel à l'histoire des sciences ou des techniques.* »⁵³⁹

Là encore, Lagarrigue souligne la nécessité des deux axes d'enseignement : l'induction et la déduction. La sur-mathématisation des sciences est également dénoncée. Toutefois, on peut néanmoins critiquer la consigne ambiguë qui vise à limiter l'utilisation des « *mathématiques non indispensables* », qui pourra être appréciée différemment d'un enseignant à un autre. En outre, en ce qui concerne l'utilisation des termes techniques, il suggère d'en limiter leur nombre. Cette consigne apparaît alors en décalage avec la demande faite aux sciences de rapprocher le programme de la vie quotidienne et fasse le lien entre l'Homme et le monde dans lequel il vit. On a pu voir notamment au Chapitre 4, que les présentations des applications concrètes de la thermodynamique nécessitent un langage adapté qu'il est nécessaire de mettre en adéquation avec le langage scientifique.

Enfin, la classe de seconde devient à nouveau une classe de détermination pour un choix en filière littéraire ou scientifique qui ne se fera qu'en classe de première : « *Nous approuvons sans réserve la transformation de la classe de Seconde en une classe d'orientation : ceci exclut naturellement le rétablissement éventuel de la distinction entre « littéraires » et « scientifiques »* »

⁵³⁹ (BUP, avril 1979) p.970

par le biais d'options complémentaires portant sur le français et les mathématiques. Nous notons avec satisfaction la dénomination réservée à la section scientifique du baccalauréat : « *Mathématiques et Sciences expérimentales* », qui souligne le caractère indissociable de ces deux composantes du raisonnement scientifique. »⁵⁴⁰

II. LA THERMODYNAMIQUE DANS LA REFORME DU SECONDAIRE

1. Le contenu des programmes du secondaire

La réforme consécutive de la commission Lagarrigue de 1976 aboutit à une refonte du contenu de l'enseignement de la thermodynamique mais aussi de son organisation dans le secondaire. La thermodynamique disparaît totalement des programmes de seconde et de terminale pour se concentrer uniquement en classe de première, dans la partie « *Energie et champs* » pour les classes de premières C, D et E, destinées davantage à des élèves désireux de poursuivre dans un cursus scientifique.

En classe de seconde, la notion de *gaz parfait* est néanmoins abordée dans l'enseignement de chimie⁵⁴¹ et reprend le développement proposé dans les programmes précédents sur une description microscopique de la matière. On peut lire dans le programme de seconde : « *[L'enseignant pourra] aborder la loi de Boyle-Mariotte pour étayer la structure moléculaire d'un gaz parfait. La température interviendra à propos du volume molaire. On montrera par l'expérience que la loi de variation du produit PV avec la température est indépendante de la nature du gaz.* »⁵⁴²

Nous verrons plus loin que ce thème sera l'occasion d'aborder la notion de chaleur, même si elle n'est pas explicitement présente dans le programme.

Dans les classes de première scientifique, la moitié du programme de physique est consacré à l'*énergie* (Cf. Figure 32). Le premier point à signaler est la disparition de l'expression « *énergie calorifique* » introduite en 1966. En outre, le libellé « *premier principe de la thermodynamique* » apparaît pour la première fois dans les programmes du secondaire au sein de la sous-partie énergie interne précédée par la « *non conservation de l'énergie mécanique totale d'un système, production de chaleur* ».

⁵⁴⁰ Note du Président de la Commission de Rénovation de l'Enseignement des Sciences physiques et de la Technologie (février 1974), citation extraite du (BUP, octobre 1977) p.65

⁵⁴¹ (BO, 20 avril 1978)

⁵⁴² (BO, 20 avril 1978)

De ce fait, la calorimétrie est introduite au niveau des bilans d'énergie et non plus par la thermométrie, devenant ainsi une application du premier principe de la thermodynamique. Enfin, on note la disparition pure et simple de l'application aux machines thermiques. Les énoncé et théorème de Carnot disparaissent nécessairement eux aussi. L'absence des machines thermiques a également comme conséquence la disparition du concept de *dégradation de l'énergie* et par là même, du deuxième principe de la thermodynamique.

CLASSE DE PREMIERE C

Horaire hebdomadaire : 5 heures (cours : 3 heures 1/2 ; travaux pratiques : 1 heure 1/2).

La répartition de l'horaire total (cours et T.P.) sera de l'ordre de :
Physique : 70 % - Chimie : 30 %.

I. Physique

A. Energie et champs.

1. Energie mécanique.

1.1. Travail et puissance des forces agissant sur un solide en mouvement de translation. Energie cinétique de translation.

1.2. a) Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe, vitesse angulaire, vitesse d'un point du solide.

b) Travail et puissance des forces agissant sur un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Energie cinétique de ce solide ; moment d'inertie.

1.3. Théorème de l'énergie cinétique.

1.4. Energie potentielle : exemples du champ de pesanteur uniforme, du ressort et du fil de torsion à réponse linéaire.

1.5. Energie mécanique totale ; sa conservation dans quelques exemples simples.

2. Energie interne.

2.1. Exemples de non-conservation de l'énergie mécanique totale d'un système, production de chaleur.

2.2. Premier principe de la thermodynamique.

2.3. Exemples de mesures calorimétriques .

Figure 32 Extrait du programme de Première C appliqué à la rentrée scolaire à compter de 1979⁵⁴³

En 1982, un premier allégement des programmes est convenu par une tractation entre l'inspection générale et l'Union des Physiciens. En ce qui concerne la thermodynamique, la proposition qui est faite revient à un retour en arrière. En effet, le premier principe disparaît au

⁵⁴³ (BUP, avril 1979) p.973

même titre que le concept d'énergie interne (Cf. Figure 33). Le paragraphe qui leur était jusqu'alors réservé devient un sous-paragraphe de l'énergie mécanique. La notion de chaleur est alors introduite via la non conservation de l'énergie mécanique. Aussi la thermodynamique devient-elle un simple cas particulier des exemples de la mécanique.

Dans cette présentation, la calorimétrie est toujours présente mais n'apparaît plus clairement comme une conséquence du premier principe de la thermodynamique.

A) ÉNERGIE ET CHAMPS

1. ÉNERGIE MÉCANIQUE

1.1. Travail et puissance des forces agissant sur un solide en mouvement de translation. Energie cinétique de translation.

1.2. a) Mouvement de rotation d'un solide autour d'un axe fixe, vitesse angulaire, vitesse d'un point du solide.

b) Travail et puissance des forces agissant sur un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Energie cinétique de ce solide ; moment d'inertie.

1.3. Théorème de l'énergie cinétique.

1.4. Energie potentielle : exemples du champ de pesanteur uniforme, du ressort et du fil de torsion à réponse linéaire.

1.5. Energie mécanique totale : sa conservation dans quelques exemples simples.

1.6. a) Exemples de non-conservation de l'énergie mécanique totale d'un système, production de chaleur.

b) Exemples de mesures calorimétriques.

Figure 33 Extrait du programme de Première S et E, 1982⁵⁴⁴

Une seconde modification des programmes a lieu à la rentrée 1988. Elle concerne notamment la partie électronique du programme mais aucune évolution à propos de la thermodynamique, dont le contenu reste identique à celui de 1982. Une mise en garde est néanmoins proposée dans les commentaires du programme, invitant le professeur à veiller « à ce que les élèves fassent bien la différence, dans le langage en particulier, entre température et chaleur. »⁵⁴⁵

⁵⁴⁴ (BO, 22 avril 1982)

⁵⁴⁵ (BO, 2 juin 1988) p.63

2. L'analyse du programme à travers quelques manuels

a. Le choix des auteurs

La réforme Lagarrigue avait pour ambition de proposer aux côtés des programmes officiels des guides pour les enseignants afin de les orienter dans la construction de leurs cours et de leur donner également quelques notions supplémentaires sur des points précis. Cette volonté était motivée par le souhait de cadrer parfaitement l'enseignement avec la philosophie du programme et de ne pas laisser aux manuels la liberté d'instaurer les bornes du programme, comme cela avait pu être le cas, comme nous l'avons montré, lors des précédentes réformes. Aussi peut-on lire dans les objectifs de la commission Lagarrigue :

« S'ils ne disposent que des programmes et commentaires, les professeurs et les auteurs de manuels risquent de n'y voir, par comparaison avec les programmes actuels, qu'un ordre arbitrairement bouleversé et quelques retraits et ajouts qu'ils jugeront également arbitraires. Ils percevront mal les raisons de ces modifications, ne concevront pas les interactions qui les sous-tendent et risqueront fort de retomber dans la routine initiale. »⁵⁴⁶

« Lorsqu'une réforme est communiquée sous la forme d'un programme officiel accompagné de ses instructions, elle laisse encore une part assez large à l'interprétation. Ainsi, lors de la réforme de l'enseignement des Mathématiques, on a assisté à une surenchère de la part des auteurs de manuels pour élèves, ce qui a contribué à en accroître les difficultés. Il convient donc qu'il existe un « étalon » de la réforme sous forme de guides explicitement destinés aux enseignants. Les guides donneront une information précise et complète sur les contenus scientifiques des programmes et sur divers déroulements pédagogiques possibles. Ils serviront de référence aux moniteurs chargés de la formation continue et de la formation pédagogique initiale. Ils devront également comporter des exemples de contrôle des connaissances ainsi que des conseils pour les expériences de cours et les travaux pratiques. »⁵⁴⁷

Mais, la dissolution soudaine de la commission n'a pas permis d'aboutir à ce résultat. Aussi, ces textes références ne pourront pas faire l'objet d'étude et nous bornerons notre travail à l'analyse de quelques manuels à grands tirages. En outre, nous utiliserons également quelques articles du BUP pour avoir le regard des enseignants sur les notions abordées.

Parmi les grands tirages choisis pour les ouvrages de seconde, nous en avons retenu deux. Le premier intitulé *Chimie Seconde*, publié chez Bordas en 1981, est écrit par Claude Boichot (1943,20...) alors enseignant en classes préparatoires au Lycée Carnot de Dijon. Il est un personnage important du monde éducatif puisqu'il sera nommé à l'Inspection générale de l'éducation nationale dans les années 90 puis en sera le doyen jusqu'en 2009. Il a également été

⁵⁴⁶ (BUP, octobre 1977) p.126

⁵⁴⁷ Les nouvelles tâches de la commission Lagarrigue, novembre 1975, citation extraite de (BUP, octobre 1977) pp.76-77

membre puis président des jurys de nombreux concours (CAPES, Agrégation, Concours Supélec-Centrale). Le second ouvrage est le *Chimie 2^e* publié en 1981 chez Technique et vulgarisation de Alain Hébert, inspecteur pédagogique régional, contributeur ou directeur de publication de vingt-trois ouvrages de physique dans les années 80 et 90.

En ce qui concerne les ouvrages de premières scientifiques, il a nécessairement fallu faire un choix. Comme nous le verrons dans la prochaine partie notamment, le nombre d'ouvrages a considérablement augmenté au fil des années. Aussi, nous avons dû orienter nos études vers des éditions à grandes diffusions. Nous avons donc choisi quatre éditeurs : Armand Colin (aujourd'hui édition Dunod), Magnard, filiale éducation du groupe Albin Michel et troisième groupe d'édition d'éducation en France, les éditions Fernand Nathan et Belin. Entre 1981 et 1982, ces éditeurs ont publié les ouvrages de Physique destinés aux élèves de 1^{ère} scientifiques C et D renommées globalement 1^{ère} S après la réforme de 1982, et écrits par un collectif d'auteurs, qui sont le plus souvent enseignants en lycée ou inspecteurs régionaux. Le choix de ces ouvrages est réalisé dans le but d'avoir un éventail le plus large possible de ce qui est proposé comme interprétation de la réforme Lagarrigue et de ces aménagements.

b. Le concept de température

La réforme née de la commission Lagarrigue fait disparaître la thermodynamique de la classe de seconde. Mais, à partir 1979 et jusqu'en 1994, le programme de chimie s'intéresse à la matière et à ses transformations. En l'occurrence, une partie du programme est consacrée à la matière à l'état gazeux dans laquelle est traitée la compressibilité des gaz et le modèle du gaz parfait avec la relation d'état $PV = nRT$. C'est à cette occasion que les auteurs de manuels vont faire référence aux notions de chaleur et de température.

Aussi, la température est présentée comme une « *des grandeurs d'état [qui] caractérisent la matière, et non pas l'objet que cette matière constitue* »⁵⁴⁸. Elle s'oppose aux « *grandeurs descriptives* » telles que la masse, la longueur, le volume. Dans les premières lignes des ouvrages, la notion de température est encore reliée à nos sensations « *une première approche de la température nous est donnée par le sens du toucher [...] La perception sensorielle, essentiellement subjective, est très insuffisante* »⁵⁴⁹. Puis, la température est présentée comme une grandeur repérable, liée à une échelle. Mais, alors que les ouvrages des années précédentes consacraient, comme nous l'avons vu, un certain nombre de pages à la description minutieuse des thermomètres, les ouvrages de Hébert ou Boichot définissent très rapidement les échelles de température et citent quelques thermomètres usuels.

⁵⁴⁸ (Hébert, 1981) p.86

⁵⁴⁹ (Boichot, et al., 1981) p.89

En outre, le programme de chimie de seconde propose « *une interprétation structurale des transformations physiques et des réactions chimiques* »⁵⁵⁰. Aussi, le concept de température va être abordé à partir de la modélisation microscopique de l'état gazeux. Néanmoins, l'absence de bornes aux programmes va engendrer, une différence importante dans l'approche proposée dans les ouvrages pour cette interprétation de la température. En effet, l'ouvrage de Hébert se contente de stipuler : « *Quand la température d'un gaz s'élève, la vitesse moyenne des molécules augmente, ce qui a pour effet d'élever la pression, qui est dues aux chocs sur les parois entre molécules.* »⁵⁵¹ Cet énoncé, couplé à la loi de Boyle et Mariotte, permet alors à Hébert d'aboutir à la loi des gaz parfaits.

En revanche, Boichot va proposer un développement beaucoup plus important. Aussi énonce-t-il en conclusion de son chapitre relatif aux transformations physiques :

« *La température nous apparaît désormais comme la manifestation macroscopique de l'agitation microscopique.* »⁵⁵²

Puis lorsqu'il développe le modèle du gaz parfait dans le cadre de la théorie cinétique des gaz, il propose de relier la température (température cinétique) à l'énergie cinétique microscopique.

« *On peut mesurer le degré d'agitation par l'énergie cinétique moyenne de translation d'une molécule $\frac{1}{2}mv^2$. [...] On peut convenir d'écrire :*

$$\theta = C^{te} \cdot \frac{1}{2}mv^2$$

θ est la température cinétique. [...] températures cinétique et absolue s'identifient. »⁵⁵³

Enfin, Boichot rassemble les deux propositions précédentes et conclut sur la définition fondamentale de la température thermodynamique :

« *En réalité la température mesure les variations du désordre d'un système en fonction des variations de l'énergie de ce système.* »⁵⁵⁴ On voit là que Boichot va bien au-delà des demandes du programme. Il est dans l'idée de présenter la température à travers le deuxième principe, mais sans l'énoncer véritablement. Car, il s'agit là d'une approche statistique de l'entropie qui lui permet d'appréhender le concept de température, sans jamais faire intervenir la notion de chaleur.

En outre, Boichot profite de cette approche énergétique pour évoquer le troisième principe de la thermodynamique sans le nommer : « *au zéro absolu, l'énergie cinétique moyenne des molécules de gaz idéal ou parfait s'annule : l'agitation est nulle, les molécules sont immobiles.* »⁵⁵⁵ Mais, cette référence est peut-être délicate et maladroitement à introduire à ce niveau. En effet, à $T = 0K$, on ne peut plus considérer que le modèle du gaz parfait soit valable. En effet, la matière se

⁵⁵⁰ (BO, 5 mars 1981)

⁵⁵¹ (Hébert, 1981) p.98

⁵⁵² (Boichot, et al., 1981) p.69

⁵⁵³ (Boichot, et al., 1981) pp.105-106

⁵⁵⁴ (Boichot, et al., 1981) p.107

⁵⁵⁵ (Boichot, et al., 1981) p.106

ramène à un état cristallin « pure » (absence de vibration). Les concepts soulevés par le troisième principe sont clairement hors de portée des élèves de la classe de seconde.

Néanmoins, la volonté d'une approche microscopique de la matière permet aux auteurs d'aborder la notion de température autrement que par nos sensations, par la thermométrie, par la calorimétrie ou encore par les machines thermiques. Cette approche, qui était présente dans une certaine mesure chez certains auteurs des années 60, comme Tréherne (Cf. chapitre 4), se démocratise au cours des années 80.

c. La chaleur : énergie ou grandeur d'échange ?

L'introduction du concept de température en seconde, entraîne nécessairement la considération du concept de chaleur, qui n'est pas clairement évoqué dans le programme. Même si, comme nous l'avons vu, les auteurs ne l'associent pas directement à la température, la chaleur est présentée comme une grandeur caractéristique des systèmes liée à leurs transformations : il s'agit, selon Hébert d'une « *grandeur d'échange [...qui] dépend simultanément des grandeurs descriptives et des grandeurs d'état.* »⁵⁵⁶ Cette conception de la chaleur comme une grandeur d'échange se retrouve également chez Boichot.

Pourtant la chaleur reste toujours associée à une forme d'énergie. En effet, on peut lire chez Hébert que « *la première grandeur rencontrée est la **quantité de chaleur**, forme thermique de l'énergie* »⁵⁵⁷. Cet aspect apparaît aussi chez Boichot, quand il définit dans son lexique la « *thermodynamique [comme une] branche de la physique qui étudie les relations entre l'énergie thermique (chaleur) et mécanique (travail) et les lois des échanges et transformations thermiques.* »⁵⁵⁸ Aussi, cette association de la chaleur à l'énergie thermique, dont la définition comme nous l'avons vue, n'est pas évidente, va engendrer à nouveau de nombreuses interprétations dans les ouvrages de Première dont une grande partie du programme est consacrée à l'énergie.

Tout d'abord, dans le programme de 1979 et dans ses ajustements, l'appellation « *énergie calorifique* » qui était apparue dans les programmes de 1966, a disparu alors que le mot « *chaleur* » perdure. Qu'en est-il dans les ouvrages de première scientifique ?

Dans le livre de Première de l'édition Armand Colin, la notion de chaleur est encore introduite par l'appellation « *énergie calorifique* ». En effet, on peut lire dans le paragraphe intitulé « *Notion d'énergie calorifique* » la définition donnée à la chaleur : « *il existe d'autres formes de*

⁵⁵⁶ (Hébert, 1981) p.86

⁵⁵⁷ (Hébert, 1981) p.86

⁵⁵⁸ Définition donnée à la thermodynamique dans le Lexique (fin d'ouvrage) du (Boichot, et al., 1981)

l'énergie, en particulier l'énergie calorifique, communément appelée chaleur. »⁵⁵⁹ Aussi, la chaleur n'apparaît pas comme un mode de transfert de l'énergie, « *la chaleur est une forme de l'énergie* »⁵⁶⁰. Pour en convaincre le lecteur, l'auteur prend l'exemple des moteurs thermiques : « *la chaleur fournie par la combustion d'un carburant [...] est transformée en énergie mécanique dans des appareils appelés moteurs thermiques [... cette transformation] confirme que la chaleur est bien une forme d'énergie.* »⁵⁶¹

Les auteurs d'ouvrage ne sont clairement pas en adéquation sur la signification de la chaleur. En effet, dans l'édition Belin de 1982, la chaleur n'est pas présentée comme une énergie mais comme un mode de transfert de l'énergie qui s'interprète à l'échelle microscopique. En outre, l'appellation « *énergie calorifique* » n'est plus employée :

« *La chaleur est un mode de transfert de l'énergie entre deux corps, qui ne fait pas intervenir de forces macroscopiques, mais seulement des forces entre atomes qui ont pour effet d'équilibrer les températures de deux corps en présence.* » Les auteurs présentent alors les trois « *modes de propagation de la chaleur : Conduction [...], Convection [...], Rayonnement [...]* »⁵⁶²

Egalement dans l'édition Nathan du livre de Première S de 1981 on peut lire :

« *La chaleur correspond à un mode de transfert de l'énergie* » et les auteurs insistent en outre sur le fait qu'« *un corps ne stocke pas de chaleur, mais de l'énergie* »⁵⁶³ ; cette phrase montrant clairement que la chaleur n'est pas une énergie. Aussi, les libellés « *énergie calorifique* » ou « *énergie thermique* » ne sont jamais employés dans l'édition Nathan de 1981. Les auteurs soulignent clairement le problème de langage lié à la chaleur en évoquant le concept de source de chaleur : « *Notons que l'expression usuelle de source de chaleur est douteuse parce que basée sur la confusion entre l'énergie fournie par la source et le mode de transfert de cette énergie.* »⁵⁶⁴

Cette idée de mode de transfert d'énergie pour désigner la chaleur avait déjà été soulignée par Mercier, comme nous l'avons vu, quelques années auparavant (Cf. Chapitre 4). Au cours des années 80, cette idée prend de plus en plus d'importance, et a pour but notamment d'enrailer la confusion entre chaleur et énergie et entre chaleur et température. Aussi, dans l'article du BUP de 1981 intitulé *Chaleur ou température ?*, les auteurs présentent le résultat d'un travail⁵⁶⁵ mené avec des élèves de sixième pour comprendre les représentations préalables de quelques notions de physique, et notamment le concept de température et de chaleur. Selon l'article : « *le vocabulaire*

⁵⁵⁹ (Bottaro, et al., 1982) p.69

⁵⁶⁰ (Bottaro, et al., 1982) pp.70-71

⁵⁶¹ (Bottaro, et al., 1982) p.71

⁵⁶² (Charlot, et al., 1982) p.75

⁵⁶³ (Saison, et al., 1981) p.109

⁵⁶⁴ (Saison, et al., 1981) p.109

⁵⁶⁵ Recherches effectuées dans le cadre de l'Institut National de Recherche Pédagogique par deux équipes, l'une à Paris, l'autre à Limoges, et coordonnées par l'Inspection Générale de Sciences physiques.

du langage courant est marqué par la confusion entre chaleur et température. En effet, des mots de la même famille servent à qualifier soit la chaleur, soit la température. » et les « élèves [qui sont les] héritiers de ce langage partent avec un handicap certain. Pour eux, ces mots sont à peu près synonymes et donc employés indifféremment l'un pour l'autre. »⁵⁶⁶

Aussi, les auteurs de l'étude proposent de présenter la chaleur non pas comme une grandeur caractéristique de l'état d'un corps, comme la température ou l'énergie, mais caractéristique de l'échange avec l'extérieur : « Peut-être pourrait-on, à partir de là, suggérer que la chaleur est une forme du transfert de l'énergie ? C'est-à-dire quelque chose que l'on paye le plus souvent. Cette approche de la notion de chaleur s'appuierait sur un problème de la vie courante dont l'actualité va s'accroître dans les années à venir : si l'on veut obtenir dans les pièces la même température, 19 degrés, il faut payer plus d'énergie pour chauffer la grande maison que pour chauffer la petite. »⁵⁶⁷ On voit aussi que les auteurs jouent sur l'extensivité de la chaleur pour la distinguer de la grandeur intensive qu'est la température. En revanche, l'emploi dans l'exemple du verbe « chauffer » peut-être également source de confusions car dans le langage courant, il fait aussi bien référence à la température (i.e. chaud et froid) qu'à la chaleur.

Seulement les (mauvaises ?) habitudes ont la vie dure. En effet, dans l'édition Nathan du livre de première S mais cette fois parue en 1988, on peut trouver que : « *Le travail et la chaleur sont des modes de transfert de l'énergie* »⁵⁶⁸, mais dans le même temps on retrouve des remarques qui ramènent la chaleur à une grandeur énergétique sous une forme *thermique* ou encore *calorifique*. A titre d'exemples on peut lire :

- 1) « À chaque fois qu'un solide évolue spontanément et que son énergie mécanique diminue, il apparaît de l'énergie thermique. »⁵⁶⁹
- 2) « Une casserole d'eau est placée au-dessus d'un brûleur à gaz. Sa température augmente rapidement parce qu'elle reçoit de l'énergie **thermique** de la flamme »⁵⁷⁰
- 3) « Toute quantité d'énergie thermique transférée porte le nom de quantité de chaleur »⁵⁷¹
- 4) « quantité de chaleur (qui est de l'énergie) »⁵⁷²
- 5) « La transformation d'énergie thermique en énergie mécanique (on dit souvent transformation de chaleur en travail bien que ce soit un abus de langage) »⁵⁷³

⁵⁶⁶ (Leymarie, et al., janvier 1981) p.551

⁵⁶⁷ (Leymarie, et al., janvier 1981) p.554

⁵⁶⁸ (Fontaine, et al., 1988) p.130

⁵⁶⁹ (Fontaine, et al., 1988) p.127

⁵⁷⁰ (Fontaine, et al., 1988) p.129

⁵⁷¹ (Fontaine, et al., 1988) p.130

⁵⁷² (Fontaine, et al., 1988) p.131

⁵⁷³ (Fontaine, et al., 1988) p.135

- 6) « Rappelons tout d'abord qu'on donne le nom de quantité de chaleur à toute quantité d'énergie thermique transférée .»⁵⁷⁴

Ou encore :

- 7) « L'énergie thermique passe toujours spontanément du corps chaud vers le corps froid. »⁵⁷⁵

Aussi, le concept d'énergie thermique, introduit par les auteurs, est à la fois synonyme du mot chaleur en tant que mode de transfert, et de la quantité de chaleur en tant que quantité d'énergie réellement transférée. Cette appellation supplémentaire qui a déjà été employée dans des ouvrages des périodes précédentes pose de nombreux problèmes de confusions ou d'amalgames : premièrement, une confusion entre chaleur et énergie interne ; mais aussi entre chaleur et énergie cinétique microscopique i.e. la partie cinétique de l'énergie interne également appelée énergie d'agitation thermique, présentée dans l'interprétation microscopique de la matière.

d. Interprétation des concepts de chaleur et d'énergie

Malgré les abus de langage que nous venons de souligner, la chaleur s'installe progressivement dans le vocabulaire comme un mode de transfert d'énergie et non plus comme une énergie. L'accent des programmes étant mis sur les interprétations microscopiques, les auteurs d'ouvrages vont proposer une description à l'échelle microscopique des grandeurs énergétiques et des grandeurs de transfert.

Dans l'ouvrage de Boichot de seconde, on trouve une interprétation microscopique de la chaleur. Ainsi peut-on lire : « *Les molécules les plus agitées du corps le plus chaud frappent les moins agitées du corps le plus froid et leur cèdent une partie de leur énergie cinétique. L'énergie ainsi transférée par l'intermédiaire des chocs désordonnés est appelé chaleur. Le transfert de chaleur cesse et l'équilibre thermique est atteint lorsque les molécules ont même énergie cinétique moyenne.* »⁵⁷⁶

Dans sa proposition, Boichot pense distinguer ainsi l'énergie d'agitation thermique (i.e. partie cinétique de l'énergie interne caractéristique du système et mesurable à travers la température), de la quantité d'énergie transférée par les chocs. Mais, pour éviter une réelle confusion entre les termes, il serait nécessaire de préciser clairement la notion du système dont on parle. Car c'est bien lui qui joue le rôle important. En effet, c'est au niveau de l'interface i.e. de la frontière du

⁵⁷⁴ (Fontaine, et al., 1988) p.138

⁵⁷⁵ (Fontaine, et al., 1988) p.138

⁵⁷⁶ (Boichot, et al., 1981) p.107

système, que les chocs désordonnés engendrent des échanges énergétiques avec l'extérieur. Alors que l'énergie cinétique microscopique est caractéristique de l'intérieur du système.

L'interprétation de la chaleur dans l'édition Armand Colin est entachée par les différentes appellations relatives à la chaleur : « ... *La réception par un système, d'énergie calorifique, se traduit par l'augmentation de l'énergie mécanique désordonnée des particules qui le constituent. En laissant une montre par exemple, sur la plaque chaude d'un four, on lui cède bien de l'énergie, sous forme calorifique, mais on ne parvient ainsi qu'à accroître l'énergie mécanique totale des particules qui la constitue sans faire remonter la montre.* »⁵⁷⁷

Aussi, le mot énergie calorifique est clairement employé pour désigner une forme d'énergie. Nous avons souligné aux Chapitres 3 et 4 les ambiguïtés relatives à ce terme, que nous retrouvons ici. En outre, cette énergie est à la fois une grandeur échangée : « *réception par un système* » et une grandeur stockée dans le système sous forme d'« *énergie mécanique désordonnée* ». On retrouve ainsi la confusion entre chaleur et énergie.

Mais cette appellation « *énergie mécanique désordonnée* » qui n'est pas présente dans le programme peut engendrer le risque que l'élève la confonde avec l'énergie mécanique macroscopique du système, désignée dans le programme par l'« *énergie mécanique totale* ». Or, les auteurs font une grave erreur puisqu'ils confondent ici l'énergie mécanique totale avec l'énergie totale qui est la seule grandeur qui se conserve. Aussi, dans l'exemple choisi, les particules voient leur énergie interne augmenter, c'est-à-dire leur énergie totale, mais en aucun cas l'énergie mécanique macroscopique (i.e. l'« *énergie mécanique totale* ») n'évolue !

En outre, les auteurs font appel aux notions d'ordre et de désordre pour définir de façon microscopique la chaleur :

« *La production de travail à partir de la chaleur est difficile et incomplète, comme le passage du désordre à l'ordre. C'est pourquoi il faut utiliser, pour ne l'obtenir que partiellement, ces dispositifs complexes que sont les moteurs thermiques tels que les moteurs à explosion ou les turbines à vapeur. S'il est facile de passer de l'ordre au désordre, il l'est beaucoup moins de revenir du désordre à l'ordre : la chaleur, énergie mécanique désordonnée, est une forme dégradée de l'énergie.* »⁵⁷⁸ Aussi, l'idée de dégradation de l'énergie présentée auparavant à travers les machines thermiques, qui ont toutes deux disparues du programme, est à nouveau introduite par une conception microscopique. Mais la phrase « *la chaleur, énergie mécanique désordonnée* » justifie clairement notre développement proposé précédemment montrant la confusion entre la chaleur et l'énergie interne, notamment.

⁵⁷⁷ (Bottaro, et al., 1982) p.75

⁵⁷⁸ (Bottaro, et al., 1982) p.75

A travers ce travail, il apparait nettement que le vocabulaire n'est pas identique dans tous les ouvrages et que ces différentes appellations peuvent entraîner des confusions et des incompréhensions chez les élèves mais également chez les enseignants, ce qui confirme les points soulevés au cours du Chapitre 4. Pourtant, parallèlement à ces ouvrages, paraissent régulièrement au BUP, comme nous l'avons vu, des articles soutenant l'idée que la chaleur doit être considérée comme une grandeur d'échange. Une publication de janvier 1986, intitulée *l'énergie*, rend compte d'un stage de formation à destination des enseignants pour donner « *une information [...] sur quelques aspects délicats de la notion d'énergie.* »⁵⁷⁹ Elle met notamment en évidence les incohérences du vocabulaire. Les auteurs veulent alors donner un éclaircissement sur les grandeurs de température, de chaleur.

*« La température d'un corps est liée à l'agitation des particules. Un corps dont la température s'élève est le siège d'une augmentation de l'agitation de ses particules, en fait il y a accroissement de la vitesse des particules. On devrait parler d'énergie cinétique d'agitation désordonnée, alors qu'en langage courant, on parle d'énergie calorifique, ce qui entraîne une confusion avec le mot chaleur qui, lui, représente un mode de transfert de l'énergie. On peut dire qu'il y a accroissement d'énergie interne par apport de chaleur. »*⁵⁸⁰

Aussi, il apparait donc évident que l'appellation « énergie calorifique » doit être abandonnée car elle engendre une confusion entre la chaleur et l'énergie stockée dans les corps, introduite par la notion d'énergie interne dont nous allons discuter maintenant.

e. Le concept d'énergie interne

Le concept d'énergie interne est introduit dans les programmes de 1979 mais disparaît dans ses ajustements au cours des années 1980. Pour autant, certaines éditions, comme l'édition Magnard de première scientifique, en donne toujours une définition. Selon les auteurs « *cette étape n'est pas strictement au programme, mais permet de justifier les méthodes de mesures décrites au chapitre 9 [mesures calorimétriques].* »⁵⁸¹ Il s'agit donc d'un moyen pour systématiser les bilans d'énergie en écrivant les variations d'une fonction d'état, appelée *énergie interne*, en fonction des échanges par chaleur ou par travail. La calorimétrie n'est donc plus déconnectée des bilans d'énergie et permet d'écarter l'hypothèse erronée de la conservation de la chaleur. Mais au-delà de cette approche, les auteurs proposent une analyse microscopique de l'énergie interne : « *L'énergie interne d'une masse de gaz parfait est la somme des énergies cinétiques des molécules de ce gaz :*

⁵⁷⁹ (Damotte, et al., janvier 1986) p.453

⁵⁸⁰ (Damotte, et al., janvier 1986) pp.454-455

⁵⁸¹ (Blain, et al., 1982) p.106

$$U = \sum E_c$$

[... plus généralement, pour un système quelconque]

L'énergie interne peut être considérée comme étant la somme des énergies cinétiques et des énergies potentielles des particules qui constituent le système

$$U = \sum E_p + \sum E_c$$

»⁵⁸²

On ne retrouve donc plus l'énergie de masse, proposée par exemple par Filippi (Cf. Chapitre 4) pour définir l'énergie interne. Désormais, l'énergie interne est présentée comme composée d'une partie cinétique microscopique due à l'agitation thermique et d'une partie énergie potentielle due aux interactions entre les particules. L'énergie de masse n'est alors pas présentée puisque si la masse du système ne varie pas, la variation de l'énergie de masse sera nulle, ce qui n'influencera pas la valeur de la variation de l'énergie interne.

En outre, comme le suggèrent les auteurs dans l'édition Magnard, les grandeurs d'échange, i.e. le travail et la chaleur, responsables de la variation de l'énergie interne notamment, sont caractérisées par des interactions à l'échelle microscopique et sont purement mécaniques. Mais travail et chaleur se distinguent notamment par leur effet :

« L'échange de travail a un effet macroscopique sur la déformation du système [alors que] l'échange de chaleur [...] n'a pas d'effet géométrique macroscopique appréciable direct. »⁵⁸³ On peut néanmoins nuancer cette affirmation, en précisant que :

Pour les échanges par travail : l'affirmation ci-dessus n'est valable que pour les systèmes mécaniques. Si l'échange de travail est électrique ou magnétique il n'y aura pas nécessairement de déformation du système, mais d'autres modifications (polarisation, moment magnétique *etc.*)
Pour les échanges par chaleur : si le corps est facilement dilatable, comme un gaz par exemple, son volume variera par apport d'énergie par chaleur.

Ainsi, même s'il s'agit pour les auteurs de proposer une première différenciation entre chaleur et travail, ces affirmations sont donc à prendre avec précaution car restent fortement liées à la nature du système étudié.

f. Le concept de système

En 1981, Roulet⁵⁸⁴ fait paraître dans le BUP, un article intitulé *L'énergie interne en classe de première*. Il y dénonce le contenu des ouvrages de classe de première concernant l'utilisation du premier principe de la thermodynamique :

⁵⁸² (Blain, et al., 1982) pp.109-110

⁵⁸³ (Blain, et al., 1982) pp.109

⁵⁸⁴ On rappelle que Roulet a co-écrit avec Cessac, une partie des ouvrages de Tréherne.

« Les lignes qui vont suivre ont été inspirées par la lecture des manuels de première. Elles ont pour but tout d'abord de faire une critique comparée de quelques-uns de ces manuels sur le(s) chapitre(s) qui traite(nt) de l'énergie interne et du premier principe de la thermodynamique, mais surtout de rappeler quelques points rarement explicités et qui sont indispensables à la compréhension et à la résolution d'exercices. »⁵⁸⁵

Nous avons précédemment vu, à travers l'étude de l'ouvrage des éditions Armand Colin notamment, que les auteurs confondent les grandeurs énergétiques et les grandeurs de transfert. Aussi, dans les premières lignes, Roulet donne les définitions nécessaires à son exposé, notamment celle de l'énergie interne et de l'énergie totale. Nous reviendrons sur ce point dans la partie consacrée à l'enseignement supérieur (Paragraphe III de ce chapitre). Mais, ce que souligne Roulet dans un premier temps est que la confusion relative au concept d'énergie interne « vient de ce qu'on n'a pas pris la peine de définir proprement le système. Cette confusion est la source de nombreuses erreurs en thermodynamique [...] le premier principe de la thermodynamique ne prend en compte que les échanges avec l'extérieur. La définition du « système » et de « l'extérieur » devient alors essentielle. »⁵⁸⁶

D'après Roulet, « toute application [du premier] principe suppose donc un choix précis du système auquel on l'applique. Dans le cas où plusieurs choix sont possibles, ils doivent tous conduire aux mêmes prévisions physiques. »⁵⁸⁷

Pour étayer son propos Roulet choisit alors trois exemples : le ressort comprimé dans le vide, la chute d'une bille sur le sol et le cas d'une bille suspendue à un ressort comprimé dans le vide. Dans ces exemples, il traite les problèmes en choisissant quand cela est possible, plusieurs systèmes différents. Roulet montre alors que le résultat physique est le même : si un échauffement d'un corps a lieu au cours de l'expérience, alors quel que soit le système choisi le résultat doit conduire à prouver cet échauffement. Mais Roulet souligne : « toute solution d'un exercice (même si elle donne le résultat juste !) est sans valeur si elle ne commence pas par préciser le système auquel elle s'applique. »⁵⁸⁸ Il soutient en outre, que l'enseignement des bilans énergétiques serait efficace si on montre à l'élève qu'un problème peut se résoudre avec différents choix de système. L'élève « comprendra vraiment la différence entre intérieur et extérieur et pourra donc apprendre à raisonner correctement (ceci est d'ailleurs aussi vrai pour un étudiant de licence et de maîtrise que pour un élève de première). »⁵⁸⁹

Dans sa conclusion, Roulet juge sévèrement les manuels qui selon lui passent pour la plupart, sous silence ce concept qu'il juge essentiel alors que cela serait dans « l'esprit du

⁵⁸⁵ (Roulet, février 1981) p.612

⁵⁸⁶ (Roulet, février 1981) p.614

⁵⁸⁷ (Roulet, février 1981) p.615

⁵⁸⁸ (Roulet, février 1981) p.618

⁵⁸⁹ (Roulet, février 1981) p.618

programme »⁵⁹⁰. Mais si Roulet, insiste sur l'importance du système, il n'en donne pas moins une définition. Le choix du système apparaît donc comme un choix judicieux et primordial pour la résolution du problème, mais dans le même temps le système est choisi de manière intuitive.

La plupart des manuels scolaires de première S traitant de l'énergie et des transferts d'énergie, ne développent pas ou peu cette notion de système. Nous avons vu que Tréherne avait dans la précédente décennie, proposé une définition du *système thermodynamique* en préambule aux bilans (Cf. chapitre 4). Or, dans la sélection d'ouvrages de première scientifique que nous avons choisie, seule l'édition Magnard propose en introduction du chapitre sur les bilans d'énergie un paragraphe destiné à la « *description d'un système en équilibre* ». Dans le manuel, les auteurs présentent deux échelles de description du système d'étude :

« *L'aspect macroscopique d'un système est, en fait, le résultat statistique dans l'espace et dans le temps de sa structure microscopique, [...] la plupart des appareils de mesure que nous utilisons nous donnent directement des résultats statistiques, donc macroscopiques* »⁵⁹¹ formant ses paramètres d'état comme le volume, la pression ou la température. Aussi, la première définition de la notion de système thermodynamique est non plus donnée par la nature de ces échanges avec l'extérieur comme le suggérait Tréherne en 1955, mais par son contenu. Les auteurs insistent de plus sur le fait que « *la définition d'un système doit être bien précise* »⁵⁹² Pour étayer leurs propos, ils proposent une représentation schématique du système. (Cf. Figure 34)

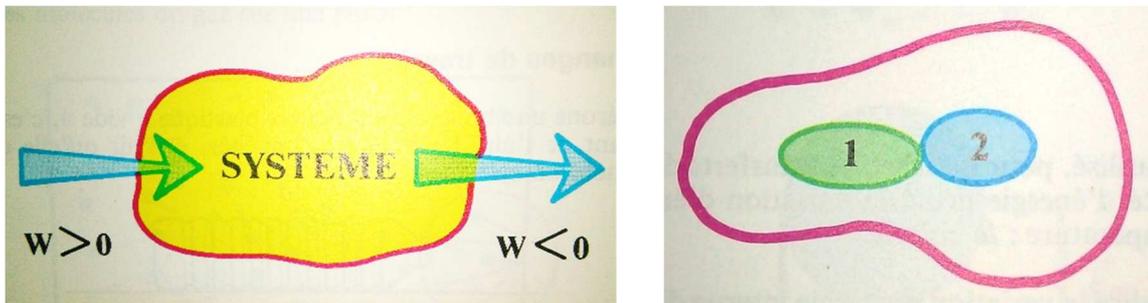


Figure 34 Représentations schématiques du système⁵⁹³

Le système est alors soit un “objet” (ici en jaune sur la Figure 34 de gauche) délimité par une frontière (rose). Mais un système peut également être la réunion de deux (ou plusieurs) systèmes (en vert (1) et bleu (2) sur la Figure 34 de droite) également séparé du milieu extérieur par une frontière (rose). Les échanges avec l'extérieur représentés par les flèches bleues sont algébriques et les auteurs suggèrent de se placer « *toujours du point de vue du système étudié* :

⁵⁹⁰ (Roulet, février 1981) p.618

⁵⁹¹ (Blain, et al., 1982) p.102

⁵⁹² (Blain, et al., 1982) p.102

⁵⁹³ Images extraites de (Blain, et al., 1982) p.104 et p.116

*le travail fourni par l'extérieur au système est positif, le travail fourni par le système à l'extérieur est négatif. »*⁵⁹⁴

Aussi, cette organisation du chapitre consacré à l'énergie fait écho au modèle de présentation proposé par Tréherne car elle met en préambule à toute étude de transfert d'énergie la nécessité de choisir un *système*.

Les réformes du secondaire ramènent progressivement la thermodynamique à des bilans énergétiques. La température est abordée par des considérations microscopiques et la notion de chaleur s'installe progressivement comme une grandeur de transfert, malgré quelques imprécisions malheureuses dans le langage employé. Voyons maintenant comment la thermodynamique est abordée dans l'enseignement supérieur et notamment dans les classes préparatoires aux grandes écoles.

III. LA REFORME DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

1. La rénovation des programmes en classes préparatoires

a. Les classes préparatoires scientifiques

En février 1974, André Lagarrigue justifie la réforme du baccalauréat par une nécessaire préparation aux poursuites d'étude : « *Le baccalauréat scientifique, outre qu'il pourrait couronner le cursus secondaire d'adolescents soucieux d'acquérir une bonne formation scientifique de base, indépendamment de leur orientation ultérieure, devrait convenir à deux catégories principales d'élèves. L'une correspond aux futurs cadres scientifiques, qui recevront une formation supérieure dans les Grandes Ecoles d'Ingénieurs, les Universités scientifiques ou les I.U.T. L'autre rassemble les futurs médecins, pharmaciens, biologistes, naturalistes, etc.*

*Il nous paraît tout à fait essentiel que l'enseignement des sciences physiques soit le même dans les deux cas. Ces orientations principales ne devraient se différencier que par les enseignements des mathématiques et des sciences naturelles, qui correspondraient chacun à une option lourde et une légère, complémentaires, pour ces deux voies. »*⁵⁹⁵

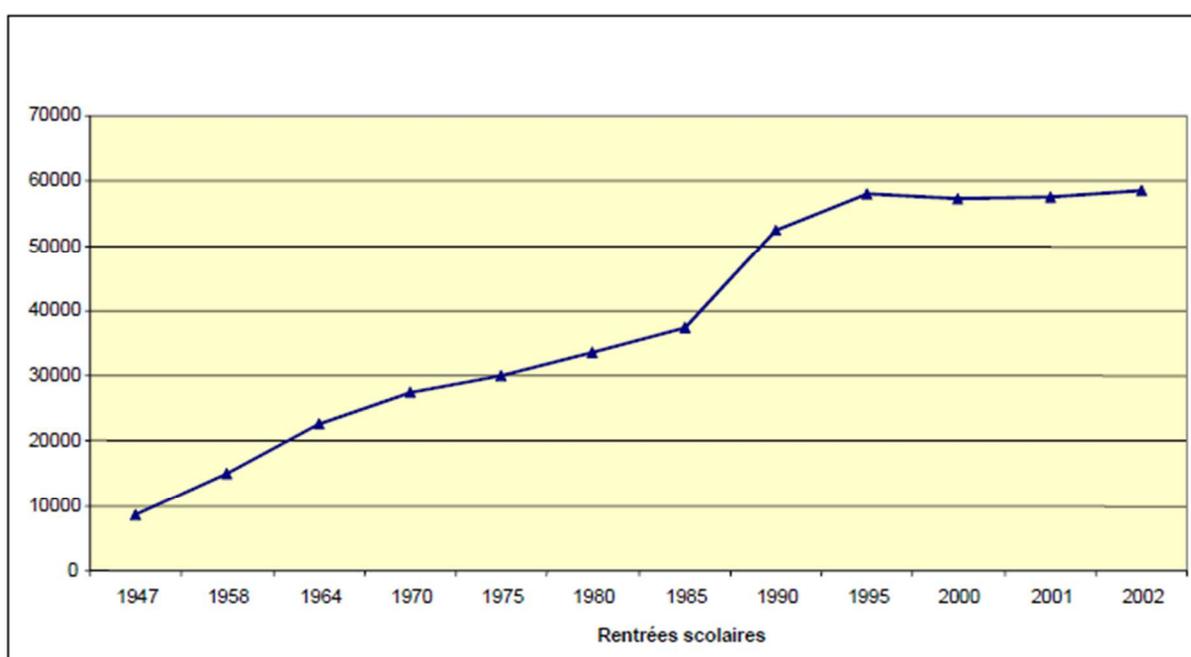
Parallèlement à celle du secondaire, deux réformes vont être également engagées dans le supérieur. A la rentrée 1974, une rénovation des programmes des classes préparatoires aux grandes écoles est proposée faisant suite à la réforme de Fouchet-Aigrain de 1967. Une seconde suivra à la rentrée 1987, pour accorder les programmes de l'enseignement supérieur et secondaire,

⁵⁹⁴ (Blain, et al., 1982) p.104

⁵⁹⁵ Note du Président de la Commission de Rénovation de l'Enseignement des Sciences physiques et de la Technologie (février 1974), citation extraite du (BUP, octobre 1977) pp.65-66

comme le suggèrent les commentaires aux programmes de sciences physiques : « *Ce programme est fondé sur le désir d'apporter aux futurs élèves des grandes écoles des connaissances de physique générale adaptées à leur vocation scientifique et technique. Il s'appuie sur les programmes de l'enseignement du second degré dont la qualité et l'ambition sont à la mesure d'une solide formation scientifique* »⁵⁹⁶

En outre, les années 1970 et surtout 1980 sont marquées par une évolution des effectifs des classes préparatoires. En effet, depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, malgré l'insuffisance du nombre d'étudiants dans les filières scientifiques, montrée du doigt lors des colloques de Caen, une tendance à la hausse des effectifs en classes préparatoires apparaît : de la fin des années 1940 au milieu des années 1980, une montée progressive puis un fort et vif accroissement à compter de 1985. (Cf. Figure 35)



source : DEP, Ministère de la Jeunesse, de l'Education Nationale et de la Recherche.
champ : CPGE publiques du Ministère de la Jeunesse, de l'Education Nationale et de la Recherche.

Figure 35 Evolution des effectifs en CPGE entre 1947 et 2002⁵⁹⁷

Si, en 1947, seulement 8 600 élèves étaient en classes préparatoires, ils atteignent près de 40 000 étudiants à l'aube des années 1985, pour l'ensemble des classes préparatoires⁵⁹⁸. Selon le rapport du ministère de l'éducation nationale paru en 2003 : « *cette progression des effectifs des CPGE ne s'est pas effectuée au détriment de la capacité de l'Education Nationale à former une élite*

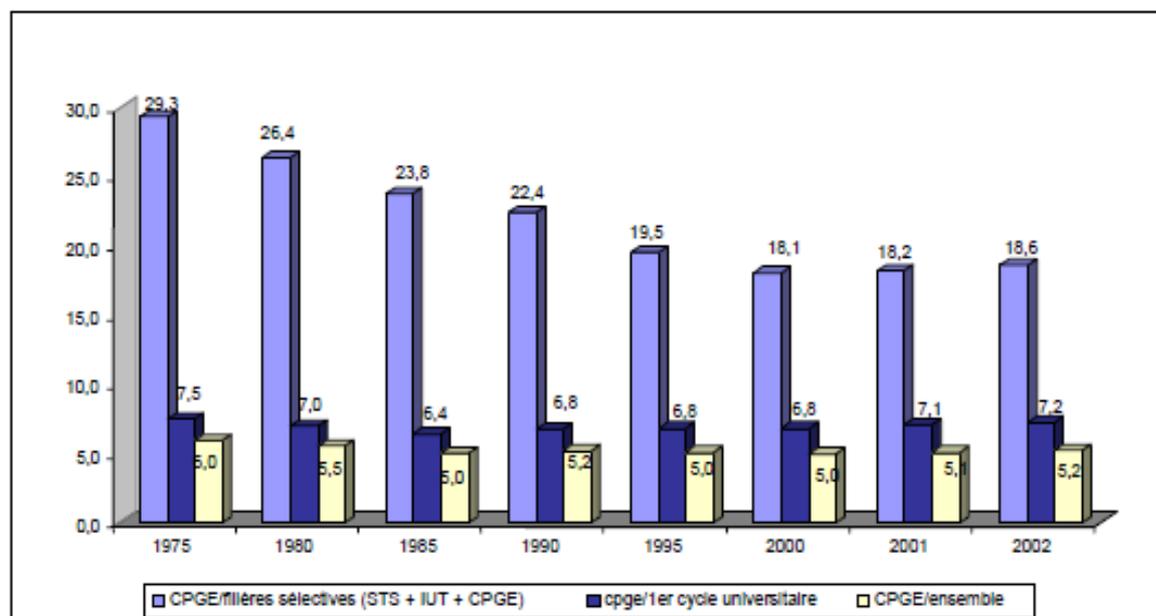
⁵⁹⁶ (Ministère de l'éducation nationale, 1989), p.86

⁵⁹⁷ (Baudelot, et al., décembre 2003) p.12

⁵⁹⁸ Si de 1975 à 2002, l'ensemble des effectifs des CPGE a augmenté de 95%, les effectifs des classes scientifiques ont augmenté de 'seulement' 82%, ceux des classes économiques de 214% et ceux des classes littéraires de 63%. (Baudelot, et al., décembre 2003) p.12

scolaire. En effet la Direction de l'Évaluation et de la Prospective a évalué en 1993 les connaissances et compétences scolaires des " meilleurs élèves " et les a comparées à celles de leurs aînés des années 50, 60, 70 et 80. Les conclusions de l'étude sont claires : ces compétences scolaires prises globalement étaient stables et même en légère croissance. Croissance des effectifs de l'élite scolaire et maintien de son niveau d'excellence sont donc allés de pair. »⁵⁹⁹

Mais, en réalité cette augmentation des effectifs en CPGE s'inscrit dans une dynamique d'évolution globale en faveur des études scientifiques, avec notamment une progression des cursus technologiques telles les sections STS ou les IUT. (Cf. Figure 36)



source : DEP, Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation Nationale et de la Recherche.
 champ : CPGE publiques du Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation Nationale et de la Recherche.

Figure 36 Poids relatif des CPGE face aux sections sélectives des sections STS et IUT⁶⁰⁰

La croissance de ces filières réduit considérablement la part des classes préparatoires proprement dite dans le secteur ouvertement sélectif : elle tombe de 10 points (de 29 à 18). Le secteur ouvertement sélectif se rééquilibre donc au détriment des CPGE et au profit des IUT (délivrants les DUT) et STS (relatives au BTS).

Aussi, c'est dans un contexte de massification de l'enseignement supérieur, et de rénovation des enseignements de la physique, comme nous l'avons vu, que les programmes des classes préparatoires sont abordés avec une profonde volonté de refondation de la matière. Ainsi peut-on lire en commentaires des programmes de 1974 : « La commission interministérielle de réforme des programmes des classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques a longuement insisté

⁵⁹⁹ (Baudelot, et al., décembre 2003) p.12

⁶⁰⁰ (Baudelot, et al., décembre 2003) p.15

IUT : Instituts Universitaires de Technologie, STS : Section de Techniciens Supérieurs

*sur la nécessité de rénover profondément les programmes de sciences physiques de ces classes... »*⁶⁰¹

b. La thermodynamique en classes préparatoires

La réforme des CPGE en 1974 marque un tournant significatif dans l'approche de l'enseignement de la thermodynamique assez proche de celui auquel aboutira la commission Lagarrigue pour l'enseignement secondaire. Dans l'introduction du programme, il est ainsi énoncé en préambule : « *La rédaction du programme de thermodynamique a été faite dans le but d'encourager toute initiative et toute tentative de rénovation de cette partie des sciences physiques.*

On illustrera l'étude des diverses notions en s'appuyant sur le gaz parfait, les gaz réels, les systèmes diphasés et les systèmes chimiques.

Les professeurs pourront utiliser, dès le début, la théorie cinétique du gaz parfait pour dégager les paramètres pression et température et l'énergie interne U . »⁶⁰²

Aussi, l'approche phénoménologique de la thermodynamique est remplacée par une approche microscopique de la matière, où les grandeurs d'état sont introduites.

Le premier principe ainsi que le second, sont introduits sans référence explicite aux machines thermiques. Le programme invite le professeurs à présenter quelques « *exemples simples de phénomènes irréversibles* »⁶⁰³ permettant ainsi de réaliser des bilans entropiques basés sur l'introduction de l'entropie produite, i.e. sur l'énoncé dit de Prigogine (Cf. Chapitre 4).

En outre, les commentaires de programmes stipulent concernant le premier principe deux points importants :

1. « *L'ordre dans lequel on présentera l'énergie interne et la quantité de chaleur est laissé totalement au gré du professeur. On fera figurer dans l'énoncé du premier principe la variation d'énergie cinétique au même titre que les autres termes.* »⁶⁰⁴ Le premier principe sera donc donné dans sa forme la plus globale incluant d'éventuelle variation d'énergie cinétique lors des échanges avec l'extérieur. Mais, il faudrait, compte tenu des discussions que nous avons proposées précédemment, préciser clairement qu'il s'agit de l'énergie cinétique macroscopique et non de l'énergie cinétique microscopique, qui fait notamment partie de l'énergie interne.

En outre, le premier principe peut alors être introduit via le principe d'équivalence donnant la priorité au concept de chaleur, ou via une introduction de l'énergie interne par une

⁶⁰¹ (Ministère de l'éducation nationale, 1974) p.74

⁶⁰² (Ministère de l'éducation nationale, 1974) p.64

⁶⁰³ (Ministère de l'éducation nationale, 1974) p.65

⁶⁰⁴ (Ministère de l'éducation nationale, 1974) p.65

considération microscopique ; énergie interne qui peut varier si des échanges par exemple par chaleur ont lieu.

2. « On fera ressortir que la température et l'entropie forment un couple de variables conjuguées. »⁶⁰⁵ Aussi, une autre approche que celle microscopique peut être donnée à la température, comme l'a proposé Boichot dans l'ouvrage de seconde (Cf. §II de ce Chapitre 5). Il est ici suggéré d'introduire la température thermodynamique et non plus la température cinétique.

La réforme de 1987 s'inscrit dans la continuité de celle de 1974 (Cf. Figure 37). Mais, la thermodynamique prend une place de choix dans le programme de classes préparatoires, notamment des sections P et P', puisqu'elle est introduite dès le début de l'année dans une partie intitulée : « *Physique de la matière – Thermodynamique* ». Elle a pour objectif de « *rendre plus claires diverses notions du cours de thermodynamique* »⁶⁰⁶ tout en restant dans le cadre de la thermodynamique classique, et de « *faire un premier pas en avant dans l'étude des phénomènes macroscopiques en défrichant la thermodynamique, discipline presque totalement nouvelle, en familiarisant les élèves avec la phénoménologie de cette physique et la nature du raisonnement thermodynamique.* »⁶⁰⁷ Aussi, la thermodynamique, présentée dans le secondaire comme une continuité de la mécanique, doit prendre désormais une place fondamentale dans l'enseignement. En outre, dans la suggestion du préambule stipulant que « *on s'attachera à dégager le but et l'universalité de la thermodynamique* », on peut voir l'influence de Kastler dans l'écriture du programme. En effet, nous avons montré qu'il considère que la thermodynamique est présente dans l'ensemble des phénomènes physiques, ce que cherchent à faire également les auteurs du programme en proposant « *des exemples de systèmes les plus variés possibles (fluides, systèmes électrostatiques, électrochimiques, chimiques, machines thermiques...)* »

C'est à cette occasion également que le programme souligne clairement pour la première fois qu'on ne peut pas *mesurer* la température. Il s'agit en fait d'un « *repérage des températures* » lié à un phénomène physique.

⁶⁰⁵ (Ministère de l'éducation nationale, 1974) p.65

⁶⁰⁶ (Ministère de l'éducation nationale, 1989) p.39

⁶⁰⁷ (Ministère de l'éducation nationale, 1989) p.36

2. SYSTÈMES THERMODYNAMIQUES.

Description des systèmes en équilibre. Systèmes simples, homogènes, isotropes, hétérogènes. Notion de phase.

Variables thermodynamiques. Variables extensives (volume, charge électrique...), variables intensives (pression, température, potentiel électrique, concentration).

Relations expérimentales entre les variables d'un système en équilibre. Existence d'une relation P.V.T., coefficients thermoélastiques et calorimétriques C_p , C_v pour les corps purs.

Vitesse d'évolution d'un système: constantes de temps associées aux divers paramètres d'un système évoluant vers un état final d'équilibre.

Notion d'irréversibilité thermodynamique. Cas limite de la réversibilité.

Systèmes isolés. Systèmes non isolés: systèmes pour lesquels se produit avec l'extérieur un transfert par exemple de chaleur, de travail mécanique ou électrique, de quantité de mouvement, de matière, de rayonnement, de charge électrique.

On s'attachera à dégager le but et l'universalité de la thermodynamique. Le passage d'une description microscopique à une description macroscopique conduit à des grandeurs, moyennes de grandeurs microscopiques, mais de plus nécessite l'introduction de grandeurs thermodynamiques spécifiques (température, entropie). On utilisera des exemples de systèmes les plus variés possible (fluides, systèmes électrostatiques, électrochimiques, chimiques, machines thermiques...).

On évitera de s'étendre sur le caractère intensif ou extensif des variables; on se limitera à une distinction de caractère intuitif entre ces deux catégories de variables.

On donnera d'autres exemples que les fluides: condensateur plan avec diélectrique, fil élastique...; on indiquera des phénomènes permettant le repérage des températures.

On donnera sous forme exclusivement descriptive des exemples de situations pour lesquelles le système peut être considéré comme en équilibre vis-à-vis de certaines variables à constantes de temps brèves et hors d'équilibre vis-à-vis d'une ou plusieurs variables à évolution beaucoup plus lente.

On décrira en particulier les systèmes en cours de réaction chimique. On appellera systèmes ouverts les systèmes non isolés où il y a transfert de matière avec l'extérieur.

Figure 37 Extrait du Programme de la Classe P⁶⁰⁸

Le programme souligne également la difficulté de la définition d'un *état d'équilibre* en thermodynamique. Alors que pour la mécanique la notion d'équilibre est relativement simple à aborder, pour la thermodynamique, il est nécessaire de prendre en compte la vitesse d'évolution du système de sorte qu'un système est à « *l'équilibre vis-à-vis de certaines variables à constantes de temps brèves* » c'est-à-dire les équilibres mécaniques (rapides), « *et hors équilibre vis-à-vis d'une ou plusieurs variables à évolution beaucoup plus lente* » comme l'équilibre thermique (transferts lents).

⁶⁰⁸ (Ministère de l'éducation nationale, 1989) p.36

Enfin, la réforme donne à la notion de *système thermodynamique* une place importante puisqu'elle lui consacre un sous-paragraphe intitulé « 2. *Systèmes thermodynamiques* ». Cette partie fait suite à l'étude : « 1. *Aspects cinétiques de la thermodynamique* » où sont développés les concepts de « *gaz parfait* et de *diffusion de particules* ». On peut noter le caractère particulier de ce paragraphe 2. En effet, c'est la première fois que l'association *systèmes thermodynamiques* est réalisée dans les programmes officiels. Cette démarche est-elle réalisée pour distinguer le système relatif à la mécanique et celui relatif à la thermodynamique ?

La réponse est donnée dans les commentaires du programme : « *passage d'une description microscopique à une description macroscopique* ». Le système thermodynamique est donc décrit par des « *grandeurs, moyennes de grandeurs microscopiques* » et « *nécessite l'introduction de grandeurs thermodynamiques spécifiques (température, entropie)* ». ⁶⁰⁹ Mais, si le programme ne donne pas de définition du système à proprement parler, il en donne les caractéristiques : il peut être soit isolé soit non isolé. On peut alors noter le manque de précision de la part des concepteurs des programmes. En effet, il n'est jamais fait mention de *système fermé*. Or, un système non isolé peut être soit ouvert soit fermé. Cette distinction est pourtant majeure en thermodynamique (nous reviendrons sur ce point au Chapitre 7 notamment) puisque si un système fermé n'échange que de l'énergie avec le milieu extérieur, un système ouvert peut lui échanger de la matière mais aussi de l'énergie !

Aussi, on voit que le programme officialise désormais les pratiques déjà développées dans un certain nombre de manuels des années précédentes (Cf. chapitre 4). Avec cette nouvelle organisation officielle de la thermodynamique, l'enseignant est invité à mettre le *système thermodynamique* en préambule à toute étude. Les grandeurs d'état sont en outre définies à travers une description statistique donc moyenne, du contenu du système.

Comme pour les périodes précédentes, nous allons nous tourner vers les manuels et les documents d'accompagnements pour examiner ce nouveau programme de thermodynamique.

2. Les documents à destination des études supérieures

a. Le choix des manuels et des documents d'étude

L'analyse qui va être proposée dans ce paragraphe s'appuie fortement sur les articles du BUP. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce choix. Premièrement, le nombre d'ouvrages à destination des premiers cycles universitaires et des classes préparatoires devient conséquent et il est difficile de choisir ou de favoriser un ouvrage par rapport à d'autres. Naturellement, les ouvrages de Bouasse et de Bruhat (et Kastler), entre autres, restent toujours des références, mais

⁶⁰⁹ (Ministère de l'éducation nationale, 1989) p.38

leurs rééditions successives n'ont pas montré une rénovation de leur contenu, hormis ce que nous avons déjà souligné. En cette période de rénovation de l'enseignement, de nombreux débats s'ouvrent entre les physiciens sur la nature de la chaleur et de l'énergie interne notamment. Le Bulletin de l'Union de Physicien devient alors un support de choix pour transmettre les conceptions des acteurs de l'époque. Cette discussion va s'étendre tout au long des années 1970 et 1980. Aussi, peut-on lire dans un article de Georges Lavertu de 1989, intitulé « *Les bases de la thermodynamique* » : « *La nécessité d'un effort de mise au point sur ce sujet est évidente d'après les erreurs et les contradictions fréquentes dans les ouvrages existants, ainsi que dans les sujets de concours* »⁶¹⁰. Nous avons effectivement montré précédemment que les erreurs et amalgames étaient nombreux dans les ouvrages du secondaire et du supérieur. Pour ce qui est des concours, une analyse sera faite pour la période post 1990 dans la Partie IV de ce travail de recherche.

Dans un article nommé *Énergie mécanique, énergie interne, énergie et premier principe de la thermodynamique* datant de 1990, José-Philippe Perez résume alors que ces contradictions reposent sur plusieurs questions : «

- 1) *Quelle relation existe-t-il entre le travail reçu et les différents travaux qui interviennent dans le théorème de l'énergie cinétique ?*
- 2) *Que devient l'énergie mécanique dans l'énoncé du premier principe ?*
- 3) *L'énergie électromagnétique fait-elle partie de l'énergie interne ?*
- 4) *L'énergie interne est-elle une grandeur conservative ?*
- 5) *De quelles énergies le travail et la chaleur sont-ils les transferts ?* »⁶¹¹

Aussi, l'analyse que nous proposons de faire reprend certains des points qui ont déjà été soumis à discussions sur les périodes précédentes : le concept d'*énergie interne*, le concept de *chaleur* et celui de *système* qui leur est intimement lié. Enfin, nous ajouterons une analyse sur le concept d'*entropie* dont l'interprétation en terme de *dégradation de l'énergie* a disparu des programmes du secondaire sur cette période.

Pour étayer notre discussion nous nous appuyerons également sur l'ouvrage d'un auteur dont nous avons déjà parlé pour les périodes précédentes. Il s'agit du cours de *Thermodynamique* de Maxime Joyal réédité en 1972, en adéquation avec les nouveaux programmes de 1972. A travers ce document, nous essaierons notamment de mettre en évidence, en outre, les divers points de vue qui agitent les enseignants sur la présentation de la thermodynamique. En effet, selon les auteurs : « *la thermodynamique a été totalement repensée afin d'en moderniser l'exposé. Deux modes de présentation étaient possibles :*

- *Soit une thermodynamique macroscopique où les phénomènes observables sont directement abordés ;*

⁶¹⁰ (Lavertu, décembre 1989) p.1491

⁶¹¹ (Mercier, et al., mai 1990) pp.685-686

- *Soit une thermodynamique statistique qui part de la structure moléculaire et qui est basée sur la probabilité d'un état formé d'un très grand nombre de particules, l'état d'équilibre réel correspondant à l'état de plus grande probabilité.*

Ce second point de vue nous a paru mal adapté aux élèves de classes de Mathématiques Supérieures et c'est pourquoi nous avons adopté le premier point de vue : thermodynamique macroscopique. »⁶¹² Mais, nous pouvons déjà souligner à travers la lecture que nous avons eu du programme, qu'il s'agit en fait d'un mélange de ces deux approches qui a été en réalité, choisi. Enfin, pour les aspects pratiques et contextuels, nous nous intéresserons à l'ouvrage *La Pompe de Chaleur, mode d'emploi* de Jacques Bernier, ingénieur frigoriste à l'Institut Français du Froid Industriel, publié en 1979.

b. Le concept d'énergie

« *Les notions d'énergie potentielle et d'énergie interne ne sont pas simples et posent sans doute encore quelques problèmes délicats aux professeurs (et aux élèves !) ...* »⁶¹³, ainsi s'expriment Jean-Pierre Barrat et Hubert Gié dans un article du BUP de 1982. Cette phrase résume parfaitement l'état d'esprit durant les années 1970-1980 (et même avant) concernant le concept d'énergie. En effet, dans le secondaire comme dans le supérieur, l'introduction de la notion d'énergie et notamment d'énergie interne est marquée par un tournant important. Les programmes permettent en effet d'introduire l'énergie interne à travers une considération microscopique du gaz parfait. En revanche, la non conservation de l'énergie mécanique, l'introduction du concept de chaleur et les bilans d'énergie sont d'abord suggérés à travers une considération macroscopique et notamment à travers l'étude de corps en mouvement subissant des forces de frottement, une approche privilégiée dans le secondaire notamment. Mais l'inconvénient est qu'elle favorise particulièrement des incompréhensions sur la définition de l'énergie totale. (Cf. paragraphe II de ce chapitre).

Il revient donc de clarifier le concept d'énergie interne et son rapport avec l'énergie mécanique macroscopique. Naturellement, ce cadre dépasse les frontières du programme du secondaire, même si certains auteurs ont tenté de le faire, mais cet aspect entre parfaitement dans les objectifs du programme des classes préparatoires.

Or, le vocabulaire employé jusqu'à présent dans les programmes et dans les traités de thermodynamique peut prêter à confusion ; Aussi peut-on lire dans l'ouvrage de Joyal : « *Disons-le nettement : il n'y a pas différentes formes d'énergie, mais seulement une fonction énergie U caractéristique du système dans un certain état. On a coutume, cependant de parler d'énergie mécanique, d'énergie thermique, d'énergie électrique... ; il convient de préciser ce qu'on doit*

⁶¹² (Joyal, et al., 1972) Avertissement

⁶¹³ (Barras, et al., mars 1982) p.561

entendre par là. »⁶¹⁴ Aussi, la fonction désignée par U appelée énergie est la grandeur qui se conserve dans le premier principe de la thermodynamique.

Dans l'article *L'énergie interne en classe de première* de 1981, Roulet propose une définition de cette énergie qu'il nomme énergie totale. On peut noter que Roulet s'inspire notablement des ouvrages anglo-saxons pour son travail. On trouve en effet dans sa bibliographie des références comme les cours de Physique de Berkeley.

« Avant toute discussion, donnons les définitions suivantes :

-*énergie totale d'un système E_T : c'est la somme des énergies cinétiques et potentielles de toutes les particules du système,*

-*énergie interne d'un système U : c'est l'énergie totale d'un système, mesurée dans un repère dans lequel le système est « macroscopiquement au repos »*

Cette dernière définition appelle les remarques suivantes :

(i) *on trouve habituellement l'expression « dans lequel le centre de masse du système est au repos ». La formulation proposée ci-dessus est préférable puisqu'elle élimine les repères dans lesquels le système serait en rotation autour du centre de masse et certains systèmes hors d'équilibre (gaz en expansion par exemple),*

(ii) *insistons une fois de plus : quand on parle d'énergie potentielle des particules, il s'agit de l'énergie potentielle d'interaction de toutes les particules prises deux à deux,*

(iii) *en toute rigueur, la thermodynamique définit comme énergie interne la valeur moyenne de l'énergie totale, moyenne prise sur tous les états compatibles avec les contraintes imposées au système. En fait, la mécanique statistique nous apprend que tout écart à cette moyenne est hautement improbable pour les systèmes macroscopiques et cette restriction est, en pratique, sans importance. Il est alors facile de montrer que l'énergie totale d'un système, mesurée dans un repère quelconque est la somme de son énergie interne et de son énergie cinétique globale E , :*

$$E_T = U + E,$$

Dans le cas d'un repère en translation par rapport au repère dans lequel le système est au repos, la démonstration est tout à fait accessible à un élève de première. Un seul manuel le signale. En aucun cas, l'énergie totale n'est la somme de l'énergie interne et de l'énergie mécanique :

- *cela est tout à fait clair dans le cas de l'énergie potentielle élastique : l'énergie potentielle d'un ressort n'est autre que la somme des énergies potentielles des particules constituantes. En tenir compte pour le calcul de l'énergie totale à la fois par l'énergie interne et par l'énergie mécanique revient à compter deux fois le même terme,*

- *cela peut paraître moins évident dans le cas de l'énergie potentielle de pesanteur ; on pourrait penser pouvoir séparer l'énergie potentielle d'interaction des particules du système*

⁶¹⁴ (Joyal, et al., 1972) pp.50-51

(qu'on compterait dans l'énergie interne) de l'énergie potentielle de pesanteur (comptée dans l'énergie mécanique). Outre que cette façon de voir fait jouer à l'énergie potentielle de pesanteur un rôle différent de celui que joue l'énergie potentielle élastique, elle est à rejeter car incohérente : en effet, il faut savoir quel système on considère ; ou bien le système est l'ensemble corps-terre et alors l'énergie potentielle de pesanteur est comprise dans l'énergie interne, ou bien le système est le corps isolé, et il n'a pas à proprement parler d'énergie potentielle de pesanteur. »⁶¹⁵

Cette définition de l'énergie totale fait notamment appel à l'interprétation microscopique de la matière, une approche qui se retrouve comme nous l'avons souligné, favorisée dans les cours de Berkeley (Cf. Chapitre 4). En outre, la définition ainsi proposée permet une distinction nette entre l'énergie mécanique macroscopique et l'énergie interne. L'énergie totale n'est pas la somme de l'énergie mécanique et de l'énergie interne, mais elle est la somme de l'énergie interne et de l'énergie cinétique macroscopique !

On retrouve une présentation similaire dans l'article de Barra et Gié⁶¹⁶. Pérez publie également un peu plus tardivement, en 1990, un article, qui montre une grande influence des articles de Barra, Gié et Roulet :

« Cette interprétation découle de ce qui précède et de la signification microscopique de l'énergie totale. Cette dernière est l'énergie définie à l'échelle microscopique élémentaire où l'on considère que le système est constitué d'édifices atomiques. On peut l'écrire sous la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon_{micro}^c + \varepsilon_{micro}^p$$

En enlevant l'énergie mécanique $\varepsilon_{me} = \varepsilon_c + \varepsilon_p$, on obtient pour l'énergie interne la somme de deux termes, l'un l'énergie cinétique interne ε_{int}^c , l'autre l'énergie potentielle interne ε_{int}^p :

$$U = \varepsilon_{int}^c + \varepsilon_{int}^p \text{ avec } \varepsilon_{int}^c = \varepsilon_{micro}^c - \varepsilon_c \text{ et } \varepsilon_{int}^p = \varepsilon_{micro}^p - \varepsilon_p$$

En résumé, l'énergie cinétique interne est l'énergie totale, évaluée à l'échelle microscopique à laquelle on a retiré l'énergie cinétique macroscopique telle qu'elle est définie en mécanique. Quant à l'énergie potentielle interne, c'est la même chose : elle prend en compte l'énergie associée à des interactions de courte portée, ce qui exclut les interactions à longue portée entre deux éléments macroscopiques du système, telles que l'interaction gravitationnelle ou l'interaction électromagnétique, lesquelles sont comptabilisées dans l'énergie potentielle macroscopique ε_p . »⁶¹⁷

Toutefois, tous les auteurs ne font pas le même choix d'approche. Ainsi, Joyal préfère définir le concept d'énergie à travers le premier principe qu'il érige en axiome : « l'expérience a montré qu'au cours de transformations observées, dans certaines conditions, des grandeurs se conservaient. En particulier, si le système est isolé, on observe toujours la conservation de l'énergie du système, quelle que soit la nature du système. Ce sont ces constatations que nous

⁶¹⁵ (Roulet, février 1981) pp.613-614

⁶¹⁶ (Barras, et al., mars 1982) pp.567-569

⁶¹⁷ (Mercier, et al., mai 1990) p.697

allons ériger en axiomes dont l'ensemble constitue le premier « principe », qui est « un principe » de conservation. »⁶¹⁸ Joyal fait donc le choix d'une approche plus traditionnelle du concept d'énergie en la définissant à travers le premier principe et non pas en ce qu'elle représente. Une prise de position étonnante quand on relit l'objectif de travail de Joyal : « la thermodynamique a été totalement repensée afin d'en moderniser l'exposé. »⁶¹⁹

c. Le concept de chaleur

Le premier principe ainsi énoncé par Joyal fait référence également aux grandeurs d'échange que sont la chaleur et le travail. Or, bien qu'il énonce clairement qu'il existe un « échange de grandeurs extensives entre deux systèmes »⁶²⁰, le vocabulaire qu'il emploie peut engendrer des confusions avec le concept d'énergie. Premièrement, il faut signaler que ces grandeurs sont additives et non extensives ce qui les distingue de l'énergie. En effet, l'extensivité ne se réfère qu'à la taille du système, alors que les grandeurs d'échange impliquent à la fois le système mais aussi le milieu extérieur.

En outre, Joyal poursuit ainsi : « [...] la chaleur se mesure en unité d'énergie. On dit aussi que le système reçoit de l'énergie thermique »^{621, 622}. Nous avons déjà souligné les problèmes relatifs à l'emploi du mot *énergie thermique* mais ici cette erreur est d'autant plus dommageable que dans le chapitre consacré à l'étude des gaz, Joyal associe dans un même titre « *énergie interne et thermique d'un gaz* » pour désigner la fonction d'état énergie interne $U = \frac{1}{2}mv^2$ liée à l'énergie cinétique microscopique des molécules⁶²³.

On retrouve ce vocabulaire également dans les ouvrages pratiques, comme celui de Bernier qui énonce que « la chaleur [ou énergie thermique] est une des formes d'énergie sous laquelle l'énergie mécanique ou électrique peut être transformée. »⁶²⁴

Pourtant, certains auteurs comme Pérez, entre autres, insistent sur la distinction nécessaire entre ces concepts, comme a pu le faire Mercier dans les années 60 (Cf. Chapitre 4) :

« En outre, ces équations permettent de souligner la distinction entre les énergies qui sont des fonctions d'état et les transferts d'énergie que sont le travail et la chaleur reçus. »⁶²⁵

⁶¹⁸ (Joyal, et al., 1972) pp.47-48

⁶¹⁹ (Joyal, et al., 1972) Avertissement

⁶²⁰ (Joyal, et al., 1972) p.49

⁶²¹ (Joyal, et al., 1972) p.51

⁶²² De même lorsque la grandeur d'échange est un travail mécanique, Joyal y associe le libellé « *énergie mécanique* ».

⁶²³ (Joyal, et al., 1972) p.16

⁶²⁴ (Bernier, 1979) p.21

⁶²⁵ (Mercier, et al., mai 1990) p.703

Le choix d'une interprétation microscopique de la thermodynamique, proposée dans le programme, va peut-être permettre de mettre en évidence la distinction entre énergie et grandeur de transfert. En effet, la chaleur va être décrite comme un transfert d'énergie par travail microscopique. Ainsi toute grandeur de transfert sera associée à un travail qui peut engendrer des variations de l'énergie du système. Dans l'article de Lavertu on peut alors lire :

« La définition logique et générale sera donc la suivante, pour un système thermodynamique :

$\delta W = \text{travail microscopique ordonné localement}$

$\delta Q = \text{travail microscopique désordonné localement}$ »⁶²⁶

Aussi, Lavertu propose une vision microscopique et purement mécanique. Mais, ce qui distingue les grandeurs travail δW et chaleur δQ c'est uniquement l'adjectif ordonné ou désordonné. Or cette appréciation est purement qualitative. On ne peut donc pas se satisfaire d'une telle définition.

Dans leur article de 1982 Barras et Gié proposent l'explication suivante :

« On peut apporter de l'énergie à un système sous deux formes (au moins) ; le travail et la quantité de chaleur. Le travail est un apport d'énergie dans lequel il y a déplacement macroscopique des points d'application des forces extérieures appliquées au système : compression ou détente d'un gaz, traction d'un ressort, torsion d'un fil, etc. Par extension, on appelle aussi travail un apport d'énergie qui peut se transformer intégralement (aux frottements près) en travail mécanique macroscopique, défini comme on vient de le faire (travail de charge d'un condensateur par exemple). La quantité de chaleur est l'énergie qui est apportée au système (ou qui lui est retirée) à la suite d'un nombre très grand d'interactions à l'échelle microscopique, sans qu'il y ait travail mécanique macroscopique : mise en contact du système avec une source à température différente par exemple. »⁶²⁷ Aussi, en lui donnant une telle interprétation, la distinction entre grandeur énergétique et grandeur d'échange peut être clairement établie. Cependant, on peut soulever quelques remarques :

Tout d'abord, avec la remarque selon laquelle un échange d'énergie peut se faire « sous deux formes (au moins) » laisse entendre qu'il existe d'autres formes de transfert, alors que certains auteurs comme Lavertu, n'en distinguent que deux. Barras et Gié ne préciseront pas quelles formes peuvent prendre ces autres échanges.

En outre, désigner un mode de transfert par l'appellation « quantité de chaleur » est relativement ambiguë. Cette expression laisse penser que la chaleur représente un contenu (énergétique ou même matériel !) Pourquoi ne proposent-ils pas simplement « chaleur » ?

Troisièmement, comme nous l'avons déjà souligné, en présentant la chaleur comme le résultat « d'interactions à l'échelle microscopique », il est fondamental de préciser que c'est à l'interface du système qu'il y a échanges avec l'extérieur et non au sein du système. Cette notion de système

⁶²⁶ (Lavertu, décembre 1989) p.1496

⁶²⁷ (Barras, et al., mars 1982) p.568

apparaît encore une fois comme un élément fondamental afin de distinguer les concepts d'énergie et de transfert d'énergie.

Enfin, cette interprétation de la chaleur fait ressortir un vocabulaire qui lui est associé et sur lequel il est nécessaire de s'arrêter. Il s'agit du concept de « *source de chaleur* » qui apparaît entre autres, dans le document de Barras et Gié.

d. Sources de chaleur et pompe à chaleur

La notion de sources de chaleur est notamment employée dans les machines thermiques. Or, les années 1970-1980 correspondent, du moins en Europe, à l'émergence d'une technologie en faveur des économies d'énergie⁶²⁸.

Le vocabulaire associé à la description de ses dispositifs engendre à nouveau un risque de confusion entre énergie et transfert d'énergie. On peut ainsi lire dans l'article du BUP de 1976, *La pompe à chaleur*, de Bernard Cunin et Jean-Louis Deiss enseignants à l'université Pasteur de Strasbourg :

« *L'une de ces techniques est la pompe à chaleur qui permet d'extraire de la chaleur à partir d'un réservoir d'énergie (source froide) et de restituer cette chaleur, à température plus élevée, à une source chaude (par exemple local à chauffer). De tels réservoirs d'énergie existent à la surface de notre globe (air ambiant, eau d'un lac ou de la nappe phréatique...), et ils sont capables de fournir de grandes quantités de chaleur que renouvelle régulièrement l'énergie solaire.* »⁶²⁹

Les sources chaude et froide ainsi désignées correspondent alors à des réservoirs d'énergie. Mais les expressions « *extraire de la chaleur* », « *restituer la chaleur* » donnent l'idée maladroite que la chaleur est quelque chose de matériel. Or il s'agit en fait, comme le soulignait Gamper ou Mercier, de réservoirs d'énergie (Cf. Chapitre 4). C'est ainsi que Joyal définit la notion de source de chaleur par:

« *On appelle source de chaleur tout système pouvant fournir (algébriquement) de l'énergie thermique à température invariante.* »⁶³⁰

Si l'on comprend qu'il s'agit effectivement d'un réservoir d'énergie, l'ajout de l'adjectif thermique, rend la définition non rigoureuse voir incorrecte. Rappelons en outre, que pour Joyal, l'énergie thermique désigne à la fois l'énergie interne et la chaleur !

⁶²⁸ Les deux chocs pétroliers successifs vont faire prendre conscience de la nécessité de réaliser des économies d'énergie. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe destiné à tirer le bilan sur cette période (Cf. §IV de ce Chapitre 5).

⁶²⁹ (Cunin, et al., décembre 1976) p.285

⁶³⁰ (Joyal, et al., 1972) p.66

En outre, la notion de sources de chaleur fait également appel à la notion de température. Aussi, dans le document de Bernier, *La pompe de chaleur*, on peut lire :

« Parmi les dispositifs thermodynamiques mieux adaptés que les appareils à combustion à fournir de la chaleur à température relativement basse figure en bonne place la pompe de chaleur. Celle-ci n'est en somme qu'une machine frigorifique, donc un système qui absorbe de la chaleur à une source froide pour en céder à une source chaude. Evidemment pour faire franchir à la chaleur cet échelon de température dans le sens contraire à la tendance naturelle il faut fournir de l'énergie que l'on retrouve d'ailleurs sous forme de chaleur à la source chaude. »⁶³¹

L'appellation « chaleur à une température » associe les deux concepts de température et de chaleur, avec un risque là encore de confusion entre les deux grandeurs. D'autant que la chaleur, comme nous l'avons vue et comme on peut le lire dans cet extrait, est représentée du moins chez Bernier, comme une « forme d'énergie ».

e. Le concept de système thermodynamique

Nous avons vu que le concept de « système thermodynamique » représente une part importante du programme de thermodynamique, notamment à l'issue de la réforme de 1987. Dans son article de 1981, nous avons vu que Roulet consacre une discussion importante sur cette notion, notamment pour les enseignements à destination du secondaire.

La notion de système est un incontournable du cours de thermodynamique de Joyal de 1972. Alors que nous avons vu que Joyal fait, du moins pour sa présentation de l'énergie interne, appel à une approche traditionnelle, la place qu'il réserve au système thermodynamique rend son travail original. En effet, la présentation de son enseignement est totalement réorganisée, en fonction du « système physique [qui] est une collection d'objets (souvent en très grand nombre) tels qu'atomes, molécules etc... »⁶³² Aussi, lorsqu'il présente une grandeur, un principe etc. associés à un système ou à sa transformation, il aborde le cas de la « réunion de deux ou plusieurs systèmes », développant un formalisme identique à celui que l'on pourrait trouver dans un cours de mathématiques :

« soit un premier système S_1 (un gaz par exemple) et soit a_1 l'état de S_1 à l'instant t ($a_1 \in S_1'$ avec S_1' l'ensemble des états du système S_1)

Soit un second système S_2 (l'ensemble des atomes constitutifs des parois qui contiennent le gaz ou bien encore tout l'univers exception faite du gaz, on dit alors : milieu extérieur) et soit a_2 l'état de S_2 à l'instant t ($a_2 \in S_2'$ avec S_2' l'ensemble des états du système S_2)

⁶³¹ (Bernier, 1979) p.7

⁶³² (Joyal, et al., 1972) p.43

Soit maintenant S le système obtenu par réunion de S_1 et S_2 : $S = S_1 \cup S_2$, (avec $S_1 \cap S_2 = \emptyset$, intersection vide) et a l'état de S à l'instant t .

a, a_1 et a_2 sont des éléments de ε (ensemble d'états). On a ainsi dans ε une loi de composition interne qui, à $a_1 \in \varepsilon$ et $a_2 \in \varepsilon$, fait correspondre $a \in \varepsilon$.

Cette loi de composition sera notée :

$$a = a_1 \oplus a_2$$

Cette relation est une façon commode d'exprimer que l'on fait agir un système sur un autre (les parois ou le milieu extérieur sur le gaz dans l'exemple choisi), mais elle peut être écrite même s'il n'y a pas d'interaction entre les deux systèmes. La loi de composition ainsi définie est évidemment commutative et associative. »^{633,634}

Joyal s'attache ainsi à donner une définition « exacte » du système et de la réunion de plusieurs systèmes en proposant un formalisme poussé. On peut notamment estimer que le travail de Joyal présenté avec une grande rigueur, permettrait d'éviter les amalgames et les confusions. Mais, un tel formalisme n'est pas imaginable dans un enseignement de thermodynamique d'autant qu'il s'oppose totalement à la volonté des réformes du moment pour lesquelles « il convient d'éviter [...] tout développement mathématique non indispensable. »⁶³⁵

L'article dans le BUP de Barras et Gié en 1982 propose une définition de la notion de système beaucoup plus succincte que la démonstration de Joyal. Ils concluent uniquement par « une remarque sur la délimitation des systèmes », dans lequel ils insistent sur sa distinction avec le système mécanique et sur son importance dans l'établissement de bilan :

« En mécanique, on peut choisir comme l'on veut la frontière qui limite un système pour étudier son mouvement, pourvu qu'on connaisse les forces qui agissent sur lui. En thermodynamique, il faut que les échanges de travail et de chaleur du système considéré avec l'extérieur soient bien définis et calculables. Lorsqu'il y a contact entre deux corps ou deux sous-systèmes (cas de chocs ou de frottements), de la chaleur est échangée entre eux de manière incontrôlable dans la région de contact. Le système doit donc toujours être délimité de telle façon que les forces de frottement soient de forces intérieures[...] »⁶³⁶ On voit encore une fois, en quoi la notion de système est intimement liée à la compréhension des grandeurs d'échange. En outre, le choix d'un système judicieux permet de simplifier grandement les calculs de ces grandeurs : pour ne pas qu'elles apparaissent dans les bilans il suffit alors d'inclure dans un même système les deux corps qui interagissent.

⁶³³ (Joyal, et al., 1972) pp.46-47

⁶³⁴ Joyal n'est pas le seul à proposer ce genre d'approche. On retrouve par exemple ce type de présentation avec un développement mathématique soutenu dans *Les principes de la Thermodynamique Classique* de Nino Boccara (1931,20..) en 1968.

⁶³⁵ (BUP, avril 1979) p.970

⁶³⁶ (Barras, et al., mars 1982) pp.574-575

Enfin, Barras et Gié soulignent que même si les programmes ou les manuels n'y faisaient auparavant que peu référence, certains enseignants du début du siècle, comme Fabry, signalaient déjà à leurs étudiants, l'importance de la notion de système dans la résolution des problèmes :

« On rapporte que Ch. Fabry disait dans ses cours de thermodynamique : « il faut délimiter un système de manière qu'on puisse mettre à ses frontières des douaniers capables de comptabiliser les échanges de chaleur et de travail ». »⁶³⁷

Enfin, d'autres auteurs donnent une définition du système en fonction de ce qu'il renferme. Cette proposition se rapproche notamment des souhaits de la nouvelle réforme de l'enseignement de la thermodynamique, basés sur une approche moléculaire. On retrouve d'ailleurs dans l'article de Lavertu en 1989 une définition fondée uniquement sur le contenu : « *Tout système matériel est formé de particules microscopiques, que l'on admettra ponctuelles, par exemple atomes, ions monoatomiques.* »⁶³⁸ Mais, cette approche qui ne décrit que l'intérieur du système, ne souligne pas l'importance de celui-ci en thermodynamique. Nous reviendrons ultérieurement sur la nécessité de proposer une définition précise de la notion de système thermodynamique (Cf. Chapitre 7).

f. Bilan entropique et transformations quasistatiques

Comme nous l'avons vu, l'aspect microscopique permet une interprétation des grandeurs énergétiques et des grandeurs d'échange, introduisant alors le premier principe. Pour ce qui est du deuxième principe, il s'inscrit quant à lui dans la continuité de la période précédente. La généralisation du deuxième principe sous forme de bilan, avec notamment l'introduction de l'entropie produite, se démocratise dans les ouvrages de thermodynamique. Nous avons signalé à ce propos qu'il s'agissait de la seule modification lors de la 6^{ème} réédition du Bruhat.

On peut noter néanmoins, que l'ouvrage de Joyal fait figure d'exception au cours de cette période car il ne fait aucunement référence à l'entropie produite dans le chapitre consacré au deuxième principe. En effet, il souligne même la différence entre le premier et le deuxième principe par le fait que l'un est une égalité et l'autre s'établit par une inégalité. Cette absence est d'autant remarquée que le programme suggère explicitement comme nous l'avons vu de traiter le cas de quelques transformations irréversibles, en introduisant alors probablement la notion d'entropie produite, qui comme le souligne Prigogine, est une mesure de la réversibilité d'une transformation.

Au-delà de cette réécriture du deuxième principe, celui-ci est marqué par une notion qui apparaît de façon récurrente dans les articles qui sont consacrés aux principes de la thermodynamique. En effet, alors qu'elle est absente des programmes, la notion de « *transformation quasistatique* » apparaît au côté des définitions consacrées aux transformations

⁶³⁷ (Barras, et al., mars 1982) pp.574-575

⁶³⁸ (Lavertu, décembre 1989) p.1491

par voie réversible. Déjà en 1962, on pouvait lire dans l'article de Gamper, dont nous avons déjà parlé dans le chapitre 4, que cette notion de quasistaticité d'un processus a été introduite chez le physicien américain Marc Zemansky (1900-1981) dans son cours *Heat and thermodynamics*, de 1957. Selon Gamper une transformation quasistatique « s'applique à des transformations opérées de façon telle que les variables intensives puissent être exprimées par une seule valeur numérique pour le système [...] à chaque instant et non pas comme une fonction de point. Sauf cas exceptionnels (comme un système de solides sans frottement) ces transformations sont infiniment lentes, d'où leur qualificatif. »⁶³⁹ Aussi, d'après Gamper, cette notion est primordial d'autant qu'elle permet le calcul des grandeurs d'échange tel que le travail des forces pressantes :

« Cette définition s'impose dès le début d'un cours de thermodynamique, bien avant le deuxième principe (par exemple, pour que le travail extérieur des forces pressantes puisse être calculé par :

$$- \int p dv$$

Alors que p est la pression du système à valeur numérique unique à chaque instant). La transformation quasistatique se distingue de la réversibilité [...] Une roue freinée, tournant infiniment lentement, l'équilibre de température se réalisant donc facilement à chaque instant subit une transformation quasistatique foncièrement irréversible. »⁶⁴⁰ La transformation est lente et donc quasistatique mais elle reste globalement irréversible car il est inconcevable de considérer que la roue puisse récupérer par chaleur l'énergie du milieu ambiant et tourner à nouveau.

L'avantage d'introduire la notion de transformation par voie quasistatique serait de pouvoir définir un état d'équilibre et ainsi d'introduire les paramètres d'état, comme la pression ou la température du système, mais sans nécessairement que le processus associé à la transformation ne soit réalisable par voie réversible.

Il est donc nécessaire aux auteurs de distinguer un processus réversible d'un processus quasistatique. Ainsi, en 1982, un article du BUP, de Jean-Marc Vanhaecke, consacré au deuxième principe, propose la distinction suivante :

« [une transformation quasistatique] est une transformation constituée d'une suite continue d'états d'équilibres. Une transformation réversible est nécessairement quasistatique. De plus, on doit pouvoir changer le sens d'une transformation réversible, en agissant- infiniment peu sur le système pour conserver cette symétrie $t/- t$. On dit alors souvent qu'une transformation réversible est telle qu'on puisse en inverser le sens par une modification infiniment petite des paramètres du système. »⁶⁴¹

⁶³⁹ (Gamper, janvier février 1962) pp.345-346

⁶⁴⁰ (Gamper, janvier février 1962) pp.345-346

⁶⁴¹ (Vanhaecke, mars 1982) p.614

L'emploi de l'adjectif « continue » pour désigner la succession d'équilibre est notamment discutable car sera également employé, comme nous allons le voir pour désigner la notion de transformation par voie réversible. Nous reviendrons quoiqu'il en soit sur ce point dans le chapitre 9 de ce mémoire.

Pour étayer ses propos, Vanhaecke se voit dans l'obligation d'illustrer la différence entre les deux voies possibles pour une transformation, par des exemples marquants :

« Un système S est en contact avec une source de chaleur par l'intermédiaire d'un très mauvais conducteur de la chaleur. La chaleur « s'écoule »⁶⁴² très lentement de la source vers le système qui, à tout instant, se trouve pratiquement à une température uniforme. Il est donc à tout instant dans un état d'équilibre [...] La transformation du système est donc bien quasistatique, elle n'est évidemment pas réversible : en augmentant très peu la température du système, la source n'en recevra pas de chaleur. On peut remarquer que l'irréversibilité a lieu dans l'échange à travers la frontière du système. Le système pourrait très bien évoluer de façon réversible (mise en contacts successifs avec une infinité de sources à des températures infiniment voisines) et ce n'est pas en observant le système seul qu'on s'aperçoit si la transformation est réversible ou non. Pour savoir si une transformation est réversible, il faut observer le système ET le milieu extérieur. »⁶⁴³

Tout d'abord, on peut à nouveau souligner l'importance du système et notamment de ses frontières, ainsi que la grandeur d'échange « chaleur », dans cette illustration. Mais le point remarquable dans le travail de l'auteur est l'emploi des majuscules pour la conjonction « ET ». En effet, cela montre l'importance du milieu extérieur dans l'évolution du système. Toute transformation implique le système et le milieu extérieur. Cet aspect fondamental, pourtant régulièrement oublié par les auteurs, permet entre autres de distinguer transformation réversible et transformation quasistatique.

Absent de la précédente édition de son cours de thermodynamique, la définition de processus quasistatique apparaît dans le cours de Joyal de 1972. Pour définir ce type de transformation, il s'appuie sur une représentation graphique dans le diagramme de Clapeyron (Cf. Figure 38).

⁶⁴² Sans revenir sur notre argumentaire, on peut critiquer l'emploi du verbe s'écouler pour parler des échanges d'énergie par chaleur (bien que l'auteur ait mis des guillemets). Il n'en faut pas davantage pour laisser le sentiment d'une substantialisation de la chaleur ; même si l'article est censé s'adresser à un public averti.

⁶⁴³ (Vanhaecke, mars 1982) p.614

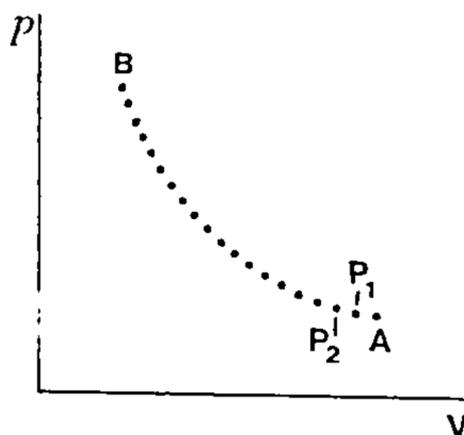


FIG. 15. — Passage au processus quasistatique.

Figure 38 Représentation des processus quasistatiques dans le diagramme de Clapeyron⁶⁴⁴

Aussi, considérons une transformation entre deux états A et B, qui suit une succession de n étapes (représentées par des points dans le diagramme de Clapeyron). Selon Joyal : « à la limite, n croissant indéfiniment on obtient un processus quasistatique, suite continue d'état d'équilibre ; Une transformation quasistatique est alors représentée par une courbe dans l'espace p, V »⁶⁴⁵. Aussi, il apparaît que Joyal ne distingue pas la notion de transformation réversible et de transformation quasistatique. En effet, dans sa démonstration, rien ne nous empêche d'inverser le sens de parcours de la transformation. Le parcours de B vers A deviendrait alors équivalent au parcours de A vers B, rendant le processus totalement réversible.

C'est pourquoi certains auteurs, refusent d'accorder une importance à la notion de processus quasistatique et proposent de ne pas l'aborder dans les enseignements de thermodynamique. On retrouve cet état d'esprit dans un article intitulé *Les deux premiers principes sous forme de bilans*, écrit par Pérez et qui fait suite à celui de 1990, : « Nous pensons que le mot "quasistatique" peut être abandonné dans un cours de thermodynamique, car nous semble-t-il sans intérêt. Probablement provient-il de l'ambiguïté du concept d'équilibre thermodynamique introduit à partir de références purement mécaniques. »⁶⁴⁶ L'argument de Pérez peut alors sembler recevable dans la mesure où cette hypothèse de transformation quasistatique ne sert *a priori* qu'à calculer le travail des forces pressantes. Mais, dans le même temps, la remarque de Vanhaecke a montré la nécessaire distinction entre les deux types de voie pour réaliser une transformation. Aussi, la transformation quasistatique n'est-elle pas un moyen d'approcher en pratique la transformation réversible qui est par définition non réalisable ?

⁶⁴⁴ (Joyal, et al., 1972) p.56

⁶⁴⁵ (Joyal, et al., 1972) p.57

⁶⁴⁶ (Pérez, et al., octobre 1993) p.31

IV. UN BILAN DES REFORMES DES ANNEES 1970-1990

1. L'enseignement après la commission Lagarrigue

Les années 1970 sont marquées dans le monde par une remise en cause des enseignements des sciences. En outre, malgré les réajustements des années 1950-1960, la désaffection pour les sciences est toujours présente et les enseignants font part de leurs inquiétudes dans de nombreuses communications. La réforme de la commission Lagarrigue s'inscrit donc dans une dynamique globale de volonté de changement. Mais, l'idée même de cette commission n'est pas réellement comparable à la refonte de 1902 et s'en distingue sur plusieurs points. Alors que cette dernière apporte ses conclusions en un peu plus d'un an, le travail de la commission Lagarrigue s'étale sur plus de neuf années. En outre, les conseils généraux et quelques guides pour le programme, donnés en 1902, laissent place dès les années 1970 à des commentaires plus développés sur les différentes parties et dont les appréciations se poursuivent à travers les parutions du Bulletin de l'Union des Physiciens. En outre, la réforme issue de la commission Lagarrigue ne concerne que les sciences physiques, la réforme des mathématiques modernes ayant eu lieu quelques années auparavant. Enfin, contrairement à la réforme de 1902 qui s'accompagnait d'une refonte structurelle de l'enseignement secondaire, l'objectif initial de la commission était déconnecté de toute réforme de structure. Pourtant, c'est bel et bien cette structure qui réformée en 1976, met fin à la commission.

Quel bilan tirer de cette rénovation ?

Pour le moment peu de travaux ont été consacrés à l'analyse de cette commission et de tous ses travaux. Malgré cela, à travers de nombreux témoignages, notamment issus du BUP, on peut constater que certains en tirent un constat d'échec. C'est le cas de Michel Hulin membre éminent de la commission Lagarrigue. Dans un ouvrage paru en 1992, sont rassemblés les textes de Michel Hulin de 1970 à 1988, sur la nécessité d'une formation scientifique accrue accompagnée d'une réflexion sur l'enseignement de la physique. Dans cet ouvrage intitulé *Le mirage et la nécessité - Pour une redéfinition de la formation scientifique de base*, Michel Hulin affirme notamment que dans leur globalité, les réformes de l'enseignement (y compris celle de Lagarrigue) au cours des années 1960-1970, sont un échec. Cet aveu était largement connu de ses collègues ; aussi peut-on lire dans une lettre ouverte publiée dans le BUP en 1989 par Jacqueline Tinnès, professeur de lycée et ancien membre, elle aussi, de la commission Lagarrigue :

« Il y a bientôt vingt ans que, professeur depuis quelques années, j'avais commencé à ressentir la nécessité d'une réflexion de fond sur l'enseignement que nous dispensions. J'avais eu alors la chance d'échanger avec vous [Michel Hulin quelques propos qui m'avaient conforté dans mon idée : l'enseignement secondaire était trop formel, trop coupé du monde réel et technologique ; l'expérience, si elle avait une place dans les activités des élèves, n'était pas vraiment intégrée dans le déroulement du cours. A l'heure actuelle, le même type de reproche est toujours adressé, et je vous ai entendu plusieurs fois l'évoquer vous-même. [...] L'époque de la commission Lagarrigue, où vous avez vous-même donné beaucoup de votre temps, fut riche d'échanges et

*d'espoirs de rénovations. Vous considérez maintenant que le désir de faire entrer la physique du chercheur dans les murs du lycée est, en France comme ailleurs, un échec. »*⁶⁴⁷

Mais ce constat sévère n'est pas partagé de manière aussi radicale par tous les anciens membres. En effet, dans sa lettre Tinnès nuance « *Faut-il donc considérer que nous n'avons fait aucun progrès sur ce point ? Voilà qui est difficile à accepter ! [...] Permettez-moi de nuancer ce jugement. Il me semble pouvoir dire que lorsqu'ils ont pu bénéficier, au collège d'abord, au lycée ensuite, d'une formation expérimentale suffisante, les élèves actuels sont beaucoup plus perméables à la démarche expérimentale. Ils sont moins enclins, par exemple, à traiter de non rigoureuse une discipline qui ne peut travailler qu'en "négligeant certains facteurs", qui ne peut présenter aucun résultat comme une certitude. Ils comprennent mieux que sa rigueur réside justement dans les réserves qu'elle émet et les limites qu'elle se fixe. »*⁶⁴⁸

Elle admet en outre, que la rénovation des programmes doit être une question permanente sur laquelle la réflexion doit être constamment portée : « *L'évolution des connaissances scientifiques, celle des moyens de communication et surtout celle du public auquel nous devons nous adresser constituent autant de raisons de remettre en cause continuellement la forme de notre enseignement et nécessiterait donc la mise en place de lieux de réflexion permanente sur ce sujet. »*⁶⁴⁹

Tinnès pointe aussi du doigt le caractère directif des recommandations de la commission et souhaite que les futures rénovations s'orientent vers davantage de liberté pour le professeur et donc pour les élèves : « *ne faudrait-il pas que celui-ci puisse un peu s'échapper des contraintes bien connues : programme strictement défini, exercices-types auxquels il se sent bien obligé d'entraîner ses élèves ? Est-il possible que ceux-ci ne deviennent pas "des bêtes à examen" mais, au contraire, développent leur esprit critique, leur capacité à réfléchir, leur curiosité, voire leur enthousiasme, devant ce que leur professeur essaiera de leur communiquer ? »*⁶⁵⁰

Pour autant, l'augmentation rapide des effectifs dans les filières scientifiques au milieu des années 1980, montre un nouvel essor pour l'enseignement des sciences. La multiplication des ouvertures des classes préparatoires, notamment scientifiques, en province permet également une poursuite d'étude facilement accessible (d'un point de vue géographique et sociale) pour les nouveaux bacheliers scientifiques.

Mais, si le nombre de bacheliers est en augmentation et ce indépendamment de l'effet démographique, comme l'a montré Daniel Duverney dans son article *Le baccalauréat scientifique*

⁶⁴⁷ (Tinnès, octobre 1989) p.9

⁶⁴⁸ (Tinnès, octobre 1989) p.9

⁶⁴⁹ (Tinnès, octobre 1989) p.9

⁶⁵⁰ (Tinnès, octobre 1989) p.9

et son contexte depuis 1962, paru en 2006, il n'en reste pas moins que le nombre de bacheliers scientifiques cessent de croître à la fin des années 1970. (Cf. Figure 39)

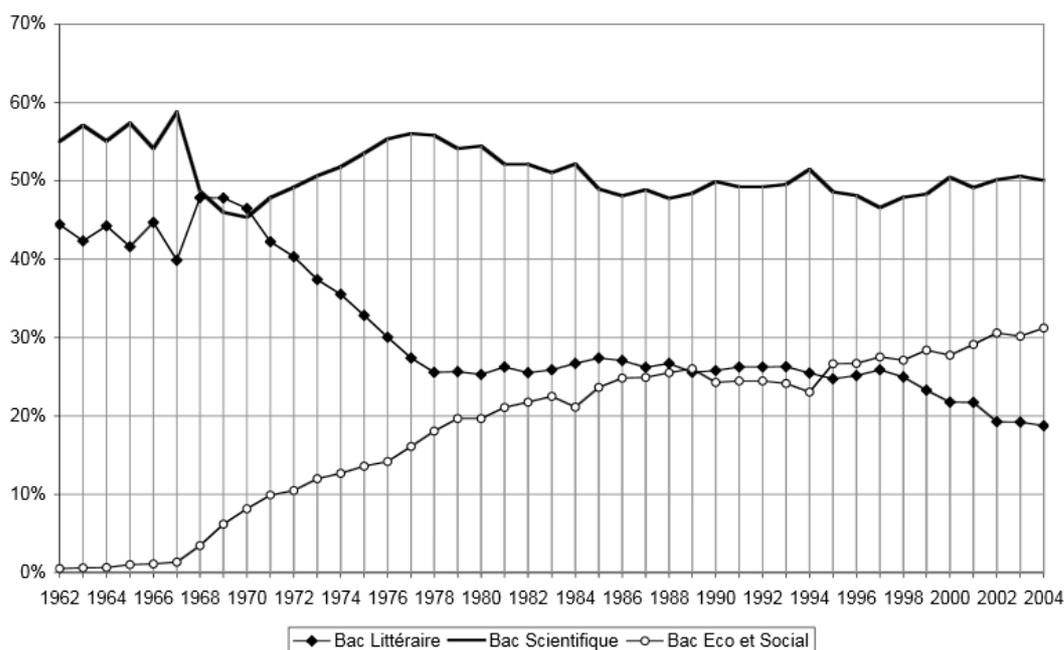


Figure 39 Parts des bacheliers littéraires, scientifiques et économiques dans le baccalauréat général⁶⁵¹

Si malgré les volontés de changement, la réforme Lagarrigue n'a pas permis une rénovation et une valorisation des filières scientifiques dans leur ensemble, quel bilan pouvons-nous tirer de l'analyse faite sur l'enseignement de la thermodynamique ?

2. Un bilan pour l'enseignement de la thermodynamique

a. L'énergie au cœur de l'enseignement des sciences

Le thème de l'énergie au cœur de l'enseignement de la physique, apparaît comme révélateur d'un contexte particulier dans ce domaine. En effet, au cours des années 1970, deux chocs pétroliers successifs ont lieu. Le premier à l'automne 1973 et le second en 1979. Ils entraînent tous deux un alourdissement de la facture énergétique dans le monde et entre autres pour la France. Aussi, la société prend conscience de sa dépendance vis-à-vis des besoins en énergie :

« En cette fin du 20^{ème} siècle nous sommes confrontés avec un problème grave : le problème énergétique. Dans nos pays industrialisés la consommation, effrénée, est devenue la règle [...]

⁶⁵¹ (Duverney, 2006) p.11

nous nous sommes habitués à consommer de plus en plus d'énergie [...] sous la pression des événements récents, et à son corps défendant, l'homme moderne prend conscience du piège où il est tombé. Il se débat et cherche des échappatoires ce qui est déjà en soi une bonne chose, l'immobilisme, en la matière, étant la pire des solutions. »⁶⁵²

Il semble alors cohérent qu'en pleine crise énergétique, l'énergie soit un thème phare des années 1970-1980. Aussi, peut-on lire dans l'introduction d'un manuel de sciences dans les années 1980 : « *la chaleur est à la mode ; son coût oblige [...] portes fermées, chaleur conservée.* »⁶⁵³

En 1974, est également créée l'Agence pour les Economies d'Energie (AEE) qui deviendra l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) en 1991.

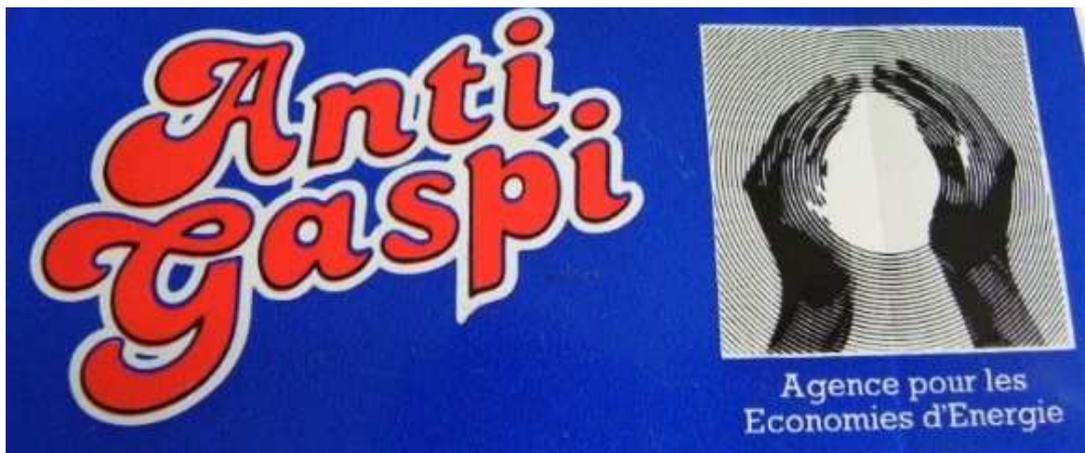


Figure 40 Agence pour les économies d'énergie, publicité de 1977

Cette agence a notamment mis en place une chasse aux gaspillages de 1974 à 1976, avec de nombreuses campagnes de publicité (Cf. Figure 40), dont certains slogans sont restés dans les mémoires comme : « *En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées* », ou encore la campagne « *Chasse au gaspi* » initiée par l'ingénieur Jean Poulit, alors directeur général de l'AEE. (Cf. Figure 41)

⁶⁵² Préface de M Duminil, professeur à l'Institut Français du Froid Industriel citation extraite de (Bernier, 1979) p.5

⁶⁵³ (Fontaine, et al., 1988) p.125

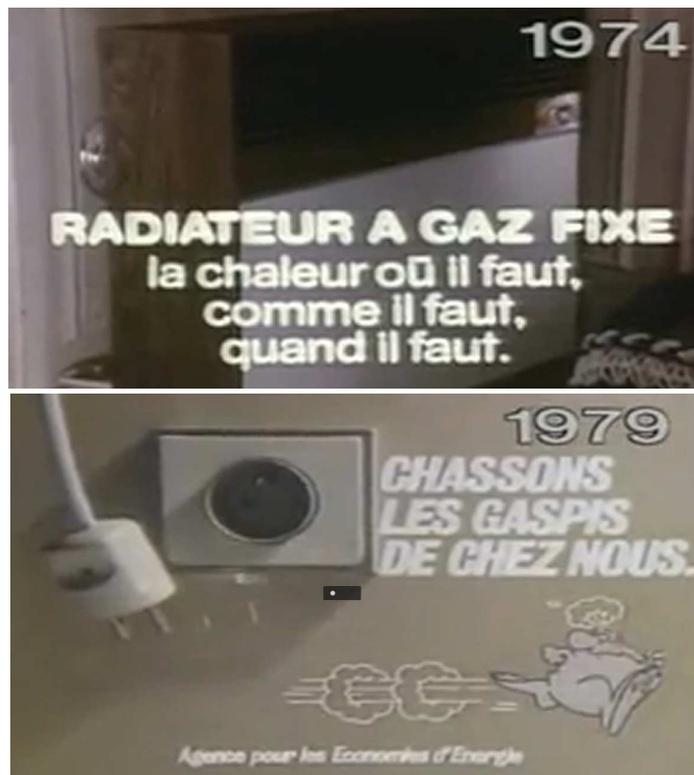


Figure 41 Campagnes publicitaires anti-gaspi de l'AEE entre 1974 et 1979

Selon l'AEE, l'accélération des économies d'énergie s'est stabilisée entre 1977 et 1978 à un rythme annuel d'environ 1 million de tep⁶⁵⁴ supplémentaires par an, qui auraient été consommées si aucune mesure n'avait été prise. C'est également au cours de ces années, que les investissements en faveur des économies d'énergie augmentent, avec par exemple « *une utilisation systématique des isolations thermiques des bâtiments afin de limiter les besoins énergétiques* »⁶⁵⁵, ou encore comme nous l'avons vu, le développement de technologies innovantes comme les pompes à chaleur.

Aussi, l'énergie et la chaleur deviennent, au cours des années 1970-1980, des concepts qui dépassent le cadre des enseignements scolaires et sont fortement ancrés dans la vie quotidienne.

b. Un bilan pour l'enseignement secondaire

Le programme de première scientifique met largement en avant le concept d'énergie puisqu'une partie entière du programme y est consacrée.

⁶⁵⁴ La tep (tonne d'équivalent pétrole) est une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut environ 42 Giga Joules (Source ADEME).

⁶⁵⁵ Préface de M Duminil, professeur à l'Institut Français du Froid Industriel citation extraite de (Bernier, 1979) p.6

En outre, l'approche du premier principe de la thermodynamique est complètement bouleversée à la suite de la commission Lagarrigue. Là où les manuels du début du siècle introduisaient les expériences de Joules, Tyndall ou encore les moteurs thermiques pour appréhender le principe de conservation et parfois la notion d'énergie interne, les manuels post-Lagarrigue proposent une description microscopique de la matière et notamment du gaz parfait monoatomique, pour ancrer le premier principe de la thermodynamique. Cette nouvelle formulation se veut représentante d'une physique moderne.

Une analyse en terme d'agitations, de chocs et d'interactions entre particules permet de donner une interprétation à la température, à l'énergie interne voire même à la chaleur. Dans cette approche, la notion de système thermodynamique apparaît alors primordiale. La nécessité de définir le système est un prélude nécessaire à l'approche du bilan d'énergie et des grandeurs de transfert. Il en va de même sur sa constitution : un système doit contenir un grand nombre de particules si l'on souhaite pouvoir donner une interprétation microscopique des grandeurs macroscopiques.

Il est à noter que, malgré une interprétation des transferts par chaleur et par travail en terme d'ordres et de désordres, les programmes du secondaire ne font jamais référence au deuxième principe de la thermodynamique. Les machines thermiques, la dégradation de l'énergie, *etc.* sont absents des prérogatives. Comme le rapporte Nicole Hulin dans son article de 1997 *Décalages entre science enseignée et science savante : la physique en France*, Michel Hulin a vivement dénoncé devant la Commission qu'il s'agit là d'une « *grave lacune* » et a souhaité que la Commission « *manifeste quelques remords !* »⁶⁵⁶ Cependant, il n'en fut rien et les programmes définitifs continuèrent d'ignorer le deuxième principe.

c. Un bilan pour l'enseignement supérieur

La réforme dans le supérieur est marquée par une profonde rénovation du contenu de l'enseignement de la thermodynamique. Elle veut notamment faire de la thermodynamique une science universelle. Il s'agit là d'un tournant fondamental dans l'enseignement, alors que la thermodynamique était presque absente des programmes de classes préparatoires au début du siècle !

La description microscopique des grandeurs thermodynamiques à travers l'étude des gaz parfaits notamment, permet d'appréhender les concepts d'énergie et de grandeurs d'échange telles que le travail ou la chaleur. Mais, alors que certains auteurs tentent d'éclaircir le langage utilisé pour désigner ces concepts, l'influence du vocabulaire des années précédentes engendrent une ambiguïté dans l'approche de ces notions. Ainsi, l'association de l'énergie mécanique (ou

⁶⁵⁶ (Hulin, 1997) p.16

respectivement électrique) au travail mécanique (ou respectivement électrique) est une illustration de ces problèmes. Mais, si cette légèreté de langage ne semble pas trop porter atteinte à concevoir ce qu'est un travail (le produit force déplacement dans le cas du travail mécanique), il n'en est pas de même pour l'approche de la chaleur. Elle est désignée généralement par « *énergie thermique* » ou « *énergie calorifique* » même si cette dernière appellation tend à disparaître au courant des années 1970. Toutefois, cette référence à l'*énergie thermique* pose divers problèmes. Le premier est d'associer la chaleur à une énergie et non comme à un transfert de l'énergie. En outre, l'énergie thermique fait écho au libellé très proche d'*énergie d'agitation thermique* ; concept relié à l'énergie cinétique microscopique de la matière elle-même reliée à l'énergie interne. Aussi, l'amalgame entre énergie interne et chaleur est important.

En outre, les références aux sources de chaleur, comme on le trouve lorsque les auteurs abordent les applications de la thermodynamique aux échangeurs, aux machines *etc.* posent un autre problème. En effet, dans une présentation où la chaleur est présentée comme une énergie stockée au sein d'un corps, la notion de source de chaleur renvoie directement au concept de température, comme on peut l'illustrer à travers la phrase de Bernier dans son ouvrage, *Pompe de Chaleur* de 1979 : « *l'énergie thermique est ainsi très mal utilisée puisque les moyens (1000°C) n'ont aucune commune mesure avec les buts (18°C à 25°C).* »⁶⁵⁷

La thermodynamique est également marquée au cours de ces années 1970-1980, par un formalisme basé sur les *bilans*. Il est demandé de réaliser des bilans énergétiques ou des bilans entropiques tous deux présentés sous forme d'une égalité. Aussi, l'énoncé proposé par Prigogine (Cf. Chapitre 4) pour le deuxième principe prend progressivement l'avantage sur les énoncés historiques. D'ailleurs, les machines thermiques et la notion de dégradation de l'énergie ne trouvent plus leur place dans les chapitres associés au deuxième principe.

Enfin, cette thermodynamique des bilans engendre l'apparition nécessaire de deux nouveaux concepts.

Le premier est la notion de *système* ou de *système thermodynamique*. Cette notion n'est pas nouvelle en soi, puisqu'elle était déjà employée au début du siècle. Mais la place qu'elle occupe désormais dans les enseignements de thermodynamique est désormais première. La majorité des auteurs du supérieur (et du secondaire également parfois) souligne l'importance de sa définition lors de la réalisation de bilans. Aussi, donnent-ils une définition de ce qu'est un système thermodynamique dans les premières pages de leurs enseignements. Le concept de système apparaît d'autant plus important que c'est par rapport à lui que les grandeurs d'échange sont appréciées. Enfin, l'approche microscopique des grandeurs d'état telle que la température, oblige

⁶⁵⁷ Préface de M Duminil, professeur à l'Institut Français du Froid Industriel citation extraite de (Bernier, 1979) p.6

à concevoir un système décrit par un grand nombre de particules sur lesquelles une moyenne comportementale peut être réalisée.

Un second concept émerge également durant cette période : il s'agit des *processus par voie quasistatique*. Issu d'œuvres américaines notamment, ce concept permet d'accéder à certaines grandeurs d'état au cours d'une transformation d'un système. Aussi, en invoquant cette hypothèse, il est possible de définir pression, température *etc.* d'un corps au cours d'une transformation. Pour cela, il est toutefois nécessaire de réaliser une transformation en faisant subir des contraintes infiniment petites au système afin qu'il évolue infiniment lentement : d'où son nom. Cette hypothèse permet de concevoir des transformations réelles, donc irréversibles, en les rapprochant au maximum de la réversibilité, sans pour autant qu'elles ne le deviennent ! Pourtant, à la lecture des définitions données de ce concept, il est difficile de voir une distinction nette entre transformation par voie réversible et transformation par voie quasistatique. Aussi, certains auteurs se refusent d'utiliser cette forme particulière de transformation, qui selon eux pourraient porter préjudice aux étudiants.

Les années 1970-1980 marquent donc un tournant dans l'enseignement de la thermodynamique, puisque son approche est totalement reconsidérée. En outre, autre fois négligée dans le programme du supérieur au profit d'autres composantes de la physique, la thermodynamique prend toute sa place dans l'enseignement des sciences physiques. Pourtant, l'approche et la définition communes sur certaines notions fondamentales de thermodynamique, comme la chaleur, n'ont pas encore été trouvées et on peut voir que le vocabulaire employé dans les ouvrages est encore fortement marqué par l'histoire de ces concepts (Cf. Chapitre 1). Cette recherche de consensus va être un des enjeux majeurs des réformes des années 90.

CHAPITRE 6

L'ENSEIGNEMENT DE LA THERMODYNAMIQUE A COMPTER DE 1993

I. LE CONTEXTE DES REFORMES DES ANNEES 90

1. Une refonte de l'enseignement

a. La seconde explosion scolaire

Comme nous l'avons vue pour la période précédente, la loi Haby impose le collège unique et entraîne dans les années qui suivent une massification des poursuites d'étude dans le second cycle. Parallèlement, le ministre de l'éducation nationale Jean Pierre Chevènement lance l'objectif des « 80 % d'une classe d'âge au niveau du baccalauréat »⁶⁵⁸. Il suit notamment les recommandations du rapport Prost sur les Lycées, remis en 1983 au président François Mitterrand (1916-1996). Ce rapport présidé par Antoine Prost (1933, 20..), historien spécialiste de la société française, expose les grandes orientations du groupe de travail national sur les seconds cycles des lycées.

⁶⁵⁸ (Duverney, 2006) p. 243

À l'orée des années 1990, c'est près de 25 % d'élèves supplémentaires qui se retrouvent dans les lycées généraux et technologiques par rapport à l'année scolaire 1985-1986. Ce taux atteint au cours des années 1995, plus de 60% d'une classe d'âge : il s'agit là de la « *seconde explosion scolaire* »⁶⁵⁹. Cette augmentation se poursuit sur une période de dix années car cette volonté de 80% d'une classe d'âge sera soutenue par les successeurs de Chevènement (René Monory (1923-2009) et Lionel Jospin)

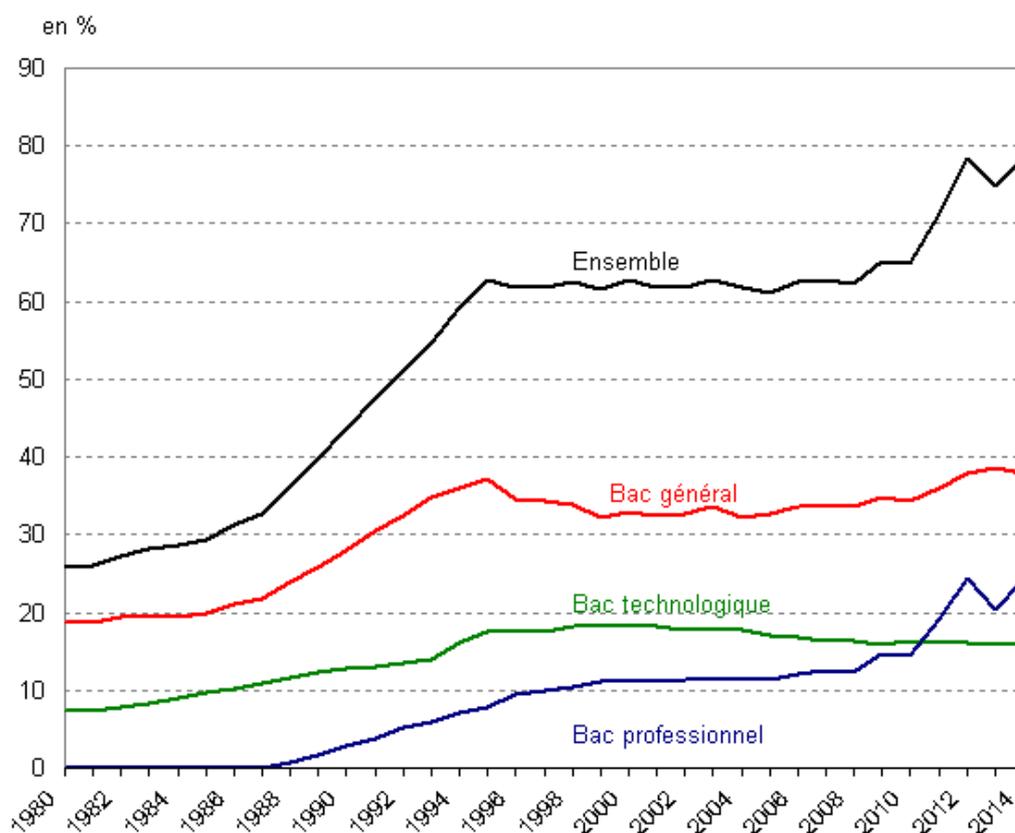


Figure 42 Evolution du nombre de bacheliers de 1980 à 2014⁶⁶⁰

En revanche, comme on le voit sur la Figure 42, l'évolution se fait davantage en faveur des voies d'enseignement général, notamment à cause du prestige que suscite encore le baccalauréat chez les parents et les élèves. Or, la volonté initiale de Chevènement était de favoriser les filières professionnelles et technologiques, notamment pour répondre à une demande économique pressante.

Le résultat de cette politique qui a engendré une augmentation rapide des effectifs dans les établissements, a nécessité une gestion de la tension entre sélection et massification. En 1992, le ministre Jospin propose de rénover les filières (professionnelle, technologique et générale) et de

⁶⁵⁹ La première explosion scolaire étant celle post seconde guerre mondiale ; Cf. Chapitre 4.

⁶⁶⁰ Sources Insee, recensements de la population. Champ : France Métropolitaine jusqu'en 2000, puis France (Hors Mayotte) à partir de 2001

rééquilibrer en leur sein les séries (les séries C et D ont notamment été fusionnées en une seule série S). Parallèlement, la classe de seconde a vu se renforcer son caractère de « détermination » : la création de « modules », réservés en principe à une aide pédagogique individualisée, doivent permettre de diminuer les taux d'échec.

b. Le baccalauréat scientifique

Au mois d'avril 1992, Jack Lang devient à son tour ministre de l'Éducation Nationale et entérine la réorganisation du cycle terminal des lycées. Il est créé une voie scientifique unique en terminale, et un système d'options (du premier et du deuxième groupe) et de modules apparaît en première et terminale scientifiques. Pour les options du premier groupe, l'élève a le choix entre les mathématiques, la physique-chimie et les Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), (2 h pour chaque matière, sous forme de TP pour les sciences naturelles). L'élève peut en outre choisir, s'il le désire, une ou deux options du second groupe, parmi lesquelles la langue vivante 2 (LV2), les langues anciennes, les arts, *etc.*

Au mois de mars 1993, les élections législatives entraînent un changement de majorité, et François Bayrou prend la tête du ministère de l'Éducation nationale. Il entreprend dès avril 1993 de modifier à nouveau l'organisation du cycle terminal des lycées. Le lundi 7 juin 1993, il annonce les décisions qu'il a prises pour les classes terminales ; l'objectif est clair : « offrir à chaque élève la possibilité de réussir au mieux et d'obtenir la "meilleure mention au bac" dans la voie correspondant à "ses goûts et à ses aptitudes", et l'inciter à s'y engager en gommant la prééminence presque exclusive, aujourd'hui, de la série C du baccalauréat. Dans chaque filière d'enseignement général, l'enseignement de spécialité – deux heures hebdomadaires – est conçu comme un renforcement de la discipline dominante qui ne fera pas l'objet d'un programme spécifique et ne sera pas évaluée de façon autonome. [...] La terminale scientifique (S) est construite autour de quatre spécialités : mathématiques, physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre et technologie industrielle. »⁶⁶¹

Les textes officiels réglementant la nouvelle organisation du cycle terminal des lycées sont publiés au Bulletin Officiel le 23 septembre 1993, soit quelques jours après la rentrée scolaire...

2. La rénovation pédagogique

a. Commissions de réflexions sur les programmes

⁶⁶¹ Objectifs de la réforme énoncés par François Bayrou le 7 juin 1993, citation extraite de (Duverney, février 2007) p.248

Parallèlement à ces changements structurels, les réformes proposent une rénovation des programmes. Pour cela, deux commissions vont travailler simultanément pour réorienter les enseignements.

En 1988, la commission Bourdieu-Gros⁶⁶², ou *Commission de réflexion sur les contenus de l'enseignement* est créée pour « *procéder à une révision des savoirs enseignés en veillant à renforcer la cohérence et l'unité de ces savoirs.* »⁶⁶³ Le rapport qu'elle remet le 8 mars 1989, intitulé *Principes pour une réflexion sur les contenus de l'enseignement*, appelle de la création d'un « *Conseil National des Programmes d'enseignement* », constitué de « *membres [...] choisis en fonction de leur seule compétence [agissant] à titre personnel et non en tant que représentants de corps, d'institutions ou d'associations* » et qui « *aura pour tâches de mettre en œuvre l'ensemble [des sept] principes* »⁶⁶⁴ ci-dessous énoncés :

1. La remise en question périodique des savoirs passe par la sélection de nouveaux savoirs enseignés en contrepartie de suppressions.
2. La priorité est à donner aux enseignements impliquant des modes de pensée de validité et d'applicabilité générale.
3. Les programmes sont à élaborer en collaboration, avec le contrôle d'instances assurant la cohérence entre disciplines et niveaux. Ce principe donnera naissance aux Conseil National des Programmes (CNP).
4. Les critères pour déterminer les enseignements à retenir sont leur « *exigibilité* » et leur « *transmissibilité.* »⁶⁶⁵
5. Il est nécessaire d'assurer une diversification des formes de pédagogie. Plus précisément, « *il importe de substituer à l'enseignement actuel, encyclopédique, additif et cloisonné, un dispositif articulant des enseignements obligatoires, chargés d'assurer l'assimilation réfléchie du minimum commun de connaissances, des enseignements optionnels, directement adaptés aux orientations intellectuelles et au niveau des élèves, et des enseignements facultatifs et interdisciplinaires relevant de l'initiative des enseignants* »⁶⁶⁶. Il s'agit donc de constituer un tronc commun à tous les élèves et de colorer leur orientation par des enseignements de spécialité.
6. La cohérence des enseignements passe par la pluridisciplinarité et la collaboration avec la reconnaissance du temps nécessaire à la coordination.
7. L'équilibre entre universalisme scientifique et relativisme culturel est obtenu par la généralisation des enseignements culturels et l'approche historique et critique.

⁶⁶² Présidée par Pierre Bourdieu (1930-2002), sociologue et François Gros, biologiste.

⁶⁶³ (Bourdieu, et al., 8 mars 1989)

⁶⁶⁴ (Bourdieu, et al., 8 mars 1989)

⁶⁶⁵ (Bourdieu, et al., 8 mars 1989)

⁶⁶⁶ (Bourdieu, et al., 8 mars 1989)

Comment vont s'appliquer ces sept principes dans l'enseignement scientifique ?

En octobre 1989, un rapport sur *la réflexion de l'enseignement de la physique* est remis par Pierre Bergé⁶⁶⁷, membre de la commission Bourdieu-Gros. L'objectif de cette commission dédiée à la physique est très proche de celui du colloque de Caen (Cf. chapitre 4) : « *Face à l'important déficit de scientifiques formés dans notre pays, la motivation essentielle de la Commission de Physique a été de réfléchir aux améliorations de nature à augmenter le nombre de vocations scientifiques.* »⁶⁶⁸. En préambule de ce rapport, il est rappelé la place prépondérante de cette science dans le monde, tant au niveau purement scientifique que social et culturel : « *La Physique est une discipline reine. Tout d'abord, elle a la même rigueur de démarche et de raisonnement que les Mathématiques. Par ailleurs, c'est la science qui donne la majeure partie des clés de la compréhension de l'univers dans lequel nous vivons et du quotidien qui nous entoure. Enfin, c'est sur elle que repose, et reposera, une grande partie des spectaculaires progrès du monde moderne ; de ce fait elle constitue une base incontournable pour l'Homme du XXème siècle. Discipline exigeante mais aussi très concrète, donc en prise directe avec le monde réel, elle permet une riche formation de l'esprit de ceux à qui on l'enseigne et qui la pratiquent. Etant un élément de culture indispensable de l'Homme moderne, elle mérite d'être enseignée dès le plus jeune âge.* »⁶⁶⁹

Aussi, Bergé reprend des arguments déjà développés par ses prédécesseurs, comme les membres de la commission Lagarrigue (Cf. chapitre 5), faisant de la physique une des sciences les plus importantes et les plus formatrices pour l'Homme. Pourtant, selon le rapport, son enseignement reste problématique et comme depuis de nombreuses années (i.e. finalement depuis 1902), il y est dénoncé que : « *l'enseignement est profondément marqué par la tradition du cours magistral : l'élève écoute passivement la bonne parole du maître.* »⁶⁷⁰

Il est donc nécessaire de changer, de façon générale, la forme même de l'enseignement et d'introduire des méthodes d'apprentissage actives.

Le rapport y dénonce également les mathématiques comme une raison de l'échec de l'enseignement de la physique notamment en France : « *les Mathématiques, [ont] progressivement et insidieusement formalisé [l'] enseignement [de la physique]. La démarche, les raisonnements, sont souvent déductifs et dogmatiques et la démonstration théorique est, plus que l'expérience, retenue comme preuve suffisante.* »⁶⁷¹

⁶⁶⁷ Pierre Bergé (1934-1997), physicien au CEA de Saclay, deviendra membre du CNP en 1994. Il s'attache notamment à faire prendre des positions pour le développement d'un enseignement des sciences concret et attractif.

⁶⁶⁸ (Bergé, Octobre 1989) p.4

⁶⁶⁹ (Bergé, Octobre 1989) p.1

⁶⁷⁰ (Bergé, Octobre 1989) p.1

⁶⁷¹ (Bergé, Octobre 1989) p.1

Ainsi, alors que les recommandations de la commission Lagarrigue se limitaient à signaler l'importance de l'expérience et l'utilisation non abusive des mathématiques (Cf. Chapitre 5), Bergé rend ces dernières responsables du malaise dans l'enseignement des sciences physiques. En effet, celui-ci doit être résolument inductif, et centré sur la pratique expérimentale, qui est la priorité. Car bien que « *il est à la fois beaucoup plus économique et moins contraignant de faire un enseignement surtout théorique ; [...] à ce jeu, la Physique perd son âme, son intérêt et son attrait auprès des jeunes. Il faut redonner ses lettres de noblesse à l'enseignement expérimental de la Physique et remettre en place la démarche scientifique.* »⁶⁷² Aussi, la raison pour laquelle la physique est toujours présentée de manière théorique est, selon Bergé, due à un problème de coût.

En outre, c'est à travers cette approche expérimentale que les mathématiques pourraient en tirer avantage car « *[elles...] pourront [y] trouver une illustration vivante et attractive de ses contenus à tous les niveaux. Paradoxalement, les frontières entre les deux champs disciplinaires ne peuvent que s'estomper dans ce retour aux sources.* »⁶⁷³

b. Les grands thèmes conducteurs

Avec la création du CNP en 1989, les programmes sont désormais écrits par des groupes techniques disciplinaires (nommés GTD)⁶⁷⁴ beaucoup plus diversifiés, à l'image de ceux de la commission Lagarrigue. Tous les niveaux de l'enseignement y sont représentés : universitaires, professeurs de collèges et lycées en exercice, inspecteurs pédagogiques régionaux et inspecteurs généraux.

La rénovation des programmes en sciences physiques, qui fait suite aux réformes structurelles des années 90 et des rapports de la commission Bourdieu-Gros, a pour but de « *replacer l'enseignement de la Physique au cœur du monde réel et quotidien et donner "à voir et à toucher" de beaux phénomènes qui permettront d'introduire des concepts profonds* »⁶⁷⁵. Le groupe de physique, présidé par Louis Boyer⁶⁷⁶ (1901-1999), « *a pris acte d'une réalité : la déplorable image de la discipline auprès des élèves. De nombreux élèves de seconde, voire de terminale, déclaraient ne pas savoir à quoi sert la physique !* »⁶⁷⁷, et a en outre conscience de la « *difficulté à l'enseigner (il y a 150 ans que cela dure...)* »⁶⁷⁸

⁶⁷² (Bergé, Octobre 1989) p.1

⁶⁷³ (Bergé, Octobre 1989) p.1

⁶⁷⁴ Ces groupes de travail sont mis en place par Claude Allègre, alors conseiller scientifique de Lionel Jospin.

⁶⁷⁵ (Bergé, Octobre 1989) p.1

⁶⁷⁶ Le groupe de travail de Chimie est présidé par Jean Michel Lefour,

⁶⁷⁷ (Boyer, juin 1996) p.8

⁶⁷⁸ Principes directeurs des programmes de Physique, extrait du (BUP, janvier 1992) p.32

Aussi, le groupe de travail de physique et celui de chimie engagent un travail de rénovation profond de l'enseignement des sciences. Et, selon les propres mots que Boyer rapporte des professeurs eux-mêmes, ces derniers « [qualifient] les nouveaux programmes de « révolutionnaires » »⁶⁷⁹. On peut retrouver cet enthousiasme dans un article du BUP publié en janvier 1990, dans lequel les auteurs⁶⁸⁰ rapportent :

« La commission ministérielle de réflexion sur l'enseignement de la Physique, présidée par Pierre Bergé, vient de remettre ses conclusions au ministre de l'Éducation Nationale. Celles-ci comportent des recommandations particulièrement intéressantes et prometteuses pour l'avenir : allègement des programmes, enseignement différencié et modulaire, valorisation de l'observation et du raisonnement, prépondérance reconnue aux activités expérimentales, formation des enseignants par la recherche... »⁶⁸¹

Le 13 novembre 1991, le CNP, publie la *Charte des programmes*, qui « définit ce que doivent être désormais les procédures et le cadre d'élaboration de tous les programmes relevant du ministère de l'Éducation nationale »⁶⁸². L'objectif de cette charte, qui est une première dans le monde éducatif est de répondre aux exigences de la commission c'est-à-dire : « : mener 100 % d'une classe d'âge à une qualification et, pour cela, centrer les démarches du système éducatif sur l'élève. »⁶⁸³ Le programme doit constituer un « contrat d'enseignement », et est complété de deux « documents d'accompagnement », l'un en direction des enseignants, l'autre en direction des élèves. Enfin, le programme est rédigé en deux colonnes : la première détaille le contenu, la seconde « les compétences exigibles. » L'objectif est donc de rendre les programmes plus lisibles mais surtout d'assurer l'uniformité des enseignements sur l'ensemble du territoire en limitant les différentes interprétations.

En outre, la volonté de pluridisciplinarité entraîne l'organisation des programmes autour de thèmes généraux. Le CNP justifie ce choix par le fait que :

« Au niveau de la seconde, le danger est grand de ne garder que des parties, certes fondamentales, mais peu significatives pour les élèves. Devant les échecs et les rejets, les allègements aggravent plutôt le mal : les élèves rentrent encore moins dans le jeu. En vue de stimuler l'intérêt sur la physique et la chimie en classe de seconde, on doit mettre l'accent sur les problèmes variés,

⁶⁷⁹ Principes directeurs des programmes de Physique, extrait du (BUP, janvier 1992) p.32

⁶⁸⁰ Les auteurs (B. Cuny, J. Tinnès et M. A. Touren, pour l'Union des Physiciens, L. Auvray, D. Le Queau et J.L. Martinand, pour la Société Française de Physique.) de cet article sont en réalité membre d'une commission commune à la Société Française de Physique et à l'Union des Physiciens, initialement animée par Michel Hulin, qui réfléchit depuis 1987 aux évolutions nécessaires de l'enseignement de la Physique, plus particulièrement au niveau du lycée.

⁶⁸¹ (BUP, janvier 1990) p.138

⁶⁸² Chartes des programmes extrait du (BO, 20 février 1992)

⁶⁸³ Chartes des programmes extrait du (BO, 20 février 1992)

attractifs ou significatifs, construire des applications que les élèves puissent mettre à l'épreuve de l'expérience. Le danger majeur n'est pas l'encyclopédisme, mais le caractère artificiel de contenus que les élèves trouvent arides et insignifiants. Le conseil national des programmes préconise une présentation par thèmes, en nombre suffisant, pour que chaque élève puisse en trouver qui l'intéressent. Ces thèmes doivent articuler pratiques expérimentales et appropriation de connaissances théoriques. »⁶⁸⁴ On voit ainsi la volonté d'intéresser les élèves aux sciences et leur faire prendre conscience de l'intérêt de la physique dans le monde qui les entoure. Aussi, dans les disciplines scientifiques : physique, chimie et sciences naturelles, il est demandé que « *L'enseignement [fasse] ressortir les relations transversales : Physique et biologie (médecine), sciences du globe (météo), air et espace, communication, informatique, musique et arts plastiques, architecture (ponts, tour Eiffel, etc.).* »⁶⁸⁵ Nous reviendrons sur ce point lors de notre étude sur les programmes de thermodynamique (Cf. paragraphe II de ce chapitre).

3. La réforme de la fin des années 1990

Les réformes de l'enseignement des sciences physiques se poursuivent tout au long des années 1990 et prennent diverses formes.

Aussi, à la rentrée 1992 des Olympiades de Physiques, semblables à celles de Chimie créées en 1985, voient le jour. Ce concours, souhaité par la Société Française de Physique et l'Union des Physiciens, a pour objectif : « *de motiver les élèves, de les sensibiliser au travail du technicien et de l'ingénieur en leur montrant l'intérêt pratique des notions de base enseignées dans le cadre de leur programme et les applications technologiques auxquelles celles-ci conduisent. Cette sensibilisation doit accompagner l'apprentissage de la démarche scientifique et laisser une large place à une approche plus autonome de l'expérimentation et de l'observation. Une telle initiative permettrait d'apporter à tous les élèves qui y participeraient une meilleure connaissance du monde scientifique et du monde technique, avant l'accès à des enseignements plus spécialisés et ce quel que soit le domaine d'activité vers lesquelles ils se dirigeront.* »⁶⁸⁶

Ce dispositif vient donc compléter les programmes mis en place la même année en classe de seconde et s'organise selon un mode de transmission du savoir proche de celui proposé dans les instructions officielles : placer l'expérimentation au cœur de la formation.

En 1998, Claude Allègre succède à François Bayrou. Il entame alors une nouvelle réforme des lycées qui met l'accent sur l'égalité dans la diversité des filières, avec l'introduction de l'aide

⁶⁸⁴ Déclaration du Conseil National des Programmes, citation extraite de (Lemeignan, et al., 1993) p.15

⁶⁸⁵ (BUP, janvier 1992) p.33

⁶⁸⁶ (BUP, janvier 1990) p.140

individualisée. Il propose également la révision des horaires (un tronc commun de 26 heures d'enseignement) et des contenus en cherchant à développer des activités culturelles et citoyennes, avec notamment la généralisation des Travaux Personnels Encadrés (TPE). Dès la rentrée 1998, une volonté de simplification des programmes de 1992 est proposée. Aussi dans le BO du 29 octobre 1998, on peut lire : « *Les programmes de physique-chimie ont été rénovés depuis 1990 et ont progressé. Un bilan peut d'ores et déjà être tiré sur un certain nombre de points. Les aménagements présentés ici et rendus publics pour la terminale dès cet été sont une réponse aux demandes des enseignants, afin de faciliter leur travail et d'accroître leur liberté pédagogique dans le cadre d'un programme allégé* ».

Cet aménagement vise à rendre moins ambitieux les programmes du début de décennie. En effet, malgré un cadrage des contenus par le CNP, il a été constaté que « *sous l'influence de certains manuels, [...] les programmes ont été inutilement chargés par la multiplication d'exemples redondants et un développement excessif d'applications technologiques. Il importe de situer l'apprentissage des sciences physiques dans le monde qui entoure l'élève, mais cela ne passe pas nécessairement par une étude approfondie d'objets techniques contemporains souvent très complexes.* »⁶⁸⁷ Aussi, il apparaît que faire le lien entre la physique avec le quotidien peut engendrer de nouvelles difficultés : l'enseignement présenté en classe semble insuffisant pour comprendre certaines applications concrètes. Il apparaît donc nécessaire de recentrer les applications sur des exemples accessibles par l'élève.

Cet aménagement sera revu deux années plus tard, avec la mise en place des nouveaux programmes du lycée. Celui-ci, qui entre en application à la rentrée 2000 pour les élèves de seconde, développe davantage les activités en s'appuyant notamment sur des approches documentaires qui ont pour but d'épauler le cours traditionnel en amenant les discussions entre les élèves de la classe ; « *La logique pédagogique que sous-tendent ces nouvelles approches est que le développement des sciences se fait par un va-et-vient entre l'observation et l'expérience d'un côté, la conceptualisation et la modélisation de l'autre, et que l'exposé axiomatique de la science déjà faite ne correspond pas au mouvement de la science en train de se faire.* »⁶⁸⁸

L'objectif rejoint le souhait émis par Bergé dans son rapport de 1989, de rendre l'élève acteur de sa formation : « *Ce n'est pas la moindre difficulté de l'enseignement scientifique, il faut pousser l'élève à se poser des questions et éviter de donner des réponses avant qu'il ait formulé les questions. L'élève bien sûr ne va pas poser à lui seul les "bonnes questions" - il ne faut pas être naïf - mais on peut petit à petit amener la classe dans son ensemble si ce n'est à toujours énoncer les questions pertinentes tout au moins à comprendre le mécanisme du questionnement.* »⁶⁸⁹

⁶⁸⁷ (BO, 29 octobre 1998)

⁶⁸⁸ (BO, 12 août 1999) p.5

⁶⁸⁹ (BO, 12 août 1999) p.6

Dans le nouveau programme est en outre introduit six semaines d'un « enseignement thématique permettant à l'enseignant d'approfondir telle ou telle partie de l'enseignement fondamental en fonction de ses goûts et de la nature de sa classe, sans toutefois introduire de nouvelles compétences exigibles. Les compétences à mobiliser par les élèves ne se limitent pas à des connaissances et savoir-faire strictement disciplinaires. Des compétences liées à la langue française, aux mathématiques, à l'expérimentation et aux nouvelles technologies de l'information et de la communication doivent être également acquises. »⁶⁹⁰ Aussi, l'objectif d'un enseignement transdisciplinaire est souhaité notamment accompagné par les outils modernes en plein développement que sont les supports informatiques.

Ce nouveau programme n'est pas bien accueilli par les enseignants⁶⁹¹ qui les confronte « pour la seconde fois en sept ans face à un changement important des programmes d'enseignement. »⁶⁹² Il est notamment critiqué que « le nouveau document d'accompagnement ne soit pas parvenu dans les lycées, qu'aucune ligne budgétaire n'ait encore été définie et que, le plus souvent, seule une journée d'information - ne s'adressant de surcroît dans certaines académies qu'à un petit nombre de collègues - ait tenu lieu de formation. »⁶⁹³

Aussi les années 1990 sont marquées par deux réformes encadrées par le Conseil National des Programmes qui souhaite garantir une parfaite transcription des décisions ministérielles dans les classes. Si la première réforme au cours des années 1992-1995 refond totalement l'enseignement de la physique et engendre un certain engouement de la part du corps enseignant, la seconde entre 2000-2003, qui s'inscrit globalement dans un approfondissement de celle de 1995, ne reçoit pas le même accueil notamment à cause du contexte politique qui a nettement changé.

La seconde partie de ce chapitre va donc être consacrée à l'étude des choix qui ont été faits pour l'enseignement de la thermodynamique au lycée au cours de cette période.

⁶⁹⁰ (BO, 12 août 1999) p.8

⁶⁹¹ La réforme est portée par le ministre Claude Allègre. Or, l'opposition qu'il rencontre avec le corps enseignant est très importante. Ses paroles malheureuses comme le 24 juin 1997 lorsqu'il prononce la phrase : « il faut dégraisser le mammoth » ou encore « Les enseignants ont quatre mois de vacances et, en plus, ils prennent leurs congés formation sur la scolarité », ses exagérations sur le taux d'absentéisme des enseignants (12 %) supérieurs à la réalité (entre 5 % et 8 %) et ses décisions autoritaires, engendrent un rejet global du personnage et de sa politique.

⁶⁹² Editorial de Josette Maurel, citation extraite de (Maurel, Juin 2000) p.1095

⁶⁹³ Editorial de Josette Maurel, citation extraite de (Maurel, Juin 2000) p.1095

II. LA THERMODYNAMIQUE DANS LA REFORME DU SECONDAIRE

1. Le contenu de la réforme dans le secondaire

a. La réforme 1993 - 1995

En 1993,⁶⁹⁴ les programmes de physique et de chimie se réorganisent autour de grands thèmes conducteurs. En ce qui concerne la thermodynamique, elle est uniquement développée en classe de première scientifique. En effet, la réforme abandonne les concepts de gaz parfait et de température autrefois abordés dans le programme de chimie de seconde. Le programme de la classe de première applicable à la rentrée 1994, est découpé en trois volets : « *Mouvement, Conservation de l'énergie et Bilans énergétiques* ». Le lien avec la mécanique est immédiat dans le programme de physique mais l'ambition de la réforme voit en l'énergie un point commun à la physique et à la chimie⁶⁹⁵ avec un thème général « *Chimie et énergie* » découpé en sous parties : « *réactions chimiques et énergie électrique et réactions chimiques et énergie thermique* » (Cf. Figure 43). Cette organisation de l'enseignement sous forme thématique a pour but de permettre « *de larges ouvertures sur le monde contemporain.* »⁶⁹⁶ En effet, le programme de chimie a une ambition citoyenne car « *par l'utilisation des hydrocarbures pour la production d'énergie thermique, on avance les solutions que propose la Chimie pour aider à résoudre ces problèmes de pollution.* »⁶⁹⁷

Nous avons déjà signalé le problème de l'emploi du mot *énergie thermique* dans le langage de la thermodynamique. Mais le programme de chimie suggère également en exercices de travaux pratiques de réaliser « *la mesure du pouvoir calorifique* ». Ces appellations et notamment la dernière qui rappelle l'*énergie calorifique* encore présente dans les années 60 (Cf. chapitre 4), sont absentes du programme de physique. Il est dommage de les retrouver dans les programmes de chimie car elles sont sources de grandes confusions. En effet, on ne sait pas si elles font référence à la chaleur ou à la partie cinétique de l'énergie interne.

En outre, l'étudiant doit savoir réaliser, selon les exigences du programme, des « *bilans énergétiques* ». Il y a donc ici, une référence implicite au premier principe de la thermodynamique,

⁶⁹⁴ (BO, 24 septembre 1992)

⁶⁹⁵ Le thème *énergie* est également annoncé comme un élément commun du programme de Sciences de la Vie et de la Terre.

⁶⁹⁶ Extrait de *Objectifs généraux du programme de Chimie*, dans (BUP, janvier 1992) p.21

⁶⁹⁷ Extrait de *Objectifs généraux du programme de Chimie*, dans (BUP, janvier 1992) p.21

sans que le libellé soit clairement employé. Pourtant, cela aurait pu être l'occasion de faire le lien avec le programme de physique, comme nous allons le voir.

On ne peut plus ignorer que le choix d'un procédé pour produire de l'énergie indispensable au développement de nos sociétés a des conséquences sur notre environnement. Mieux connaître les problèmes écologiques sur le plan chimique permet au citoyen de mieux appréhender les enjeux énergétiques et politiques.

Les problèmes écologiques constituent un excellent terrain pour des activités pluridisciplinaires; les élèves acquerront une vue d'ensemble sur un problème de société et comprendront comment différentes compétences disciplinaires contribuent à le résoudre.

2.1.1 Production d'énergie par combustion.

Contenus

Chaleur de réaction : définition et interprétation en termes d'énergie de liaison.

Valeur énergétique d'un aliment.

Exigences,* apprentissages

Ecrire la réaction de combustion complète d'un composé organique et la réaction de décomposition d'un explosif et les identifier comme étant des réactions d'oxydo-réduction en phase sèche.

**Connaître la définition de la valeur énergétique d'un aliment.*

**Faire un bilan énergétique*

Activités de documentation

Analyse d'une documentation sur les combustibles, carburants, comburants, propergols, explosifs, le rôle des adjuvants dans les essences.

Expériences de cours et de T.P.

Mesure et/ou comparaison du pouvoir calorifique de combustibles ou de carburants.

Figure 43 Extrait du Programme de Chimie en Première S ⁶⁹⁸

En effet, dans le programme de Physique de première S, si le premier principe de la thermodynamique n'est plus explicitement énoncé, il est formulé à travers la remarque suivante : « *L'existence des frottements entraîne un dégagement de chaleur et la non conservation de l'énergie mécanique [...] l'énergie totale se conserve si le système est isolé.* » ⁶⁹⁹

Les concepts d'énergie mécanique et d'énergie totale, qui ont fait l'objet de discussions au chapitre précédent (Cf. Chapitre 5), semblent alors clairement distingués. Mais, il est regrettable de voir que le premier principe n'est présenté qu'à travers son énoncé relatif aux systèmes isolés. En effet, les exemples traités et suggérés dans le programme, comme nous l'avons vu en chimie par exemple, font clairement appel aux grandeurs d'échanges.

En outre, dans le document d'accompagnement des Lycées de l'académie de Lille, il est précisé que l'élève doit savoir identifier les « *diverses formes de l'énergie et de leurs transformations dans*

⁶⁹⁸ (BO, 24 septembre 1992)

⁶⁹⁹ (BO, 24 septembre 1992)

des exemples de la vie quotidienne : automobile, avion, appareil domestique, être vivant, centrale thermique, hydraulique et nucléaire, machines thermiques... »⁷⁰⁰ En aucun cas, ces diverses formes de l'énergie ne sont détaillées. L'énergie thermique ou l'énergie électrique présentes dans le programme de chimie font elles partie de ces diverses formes ?

Enfin, les années 1993-1995, sont marquées par le retour des machines thermiques, dont l'absence avait été vivement critiquée, notamment par Michel Hulin après la parution des programmes de la commission Lagarrigue (Cf. chapitre 5).

Il est également suggéré à travers des « *expériences d'amortissements visqueux et solides* » d'introduire la notion de : « *dissipation de l'énergie (« dégradation »)* ». Or nous avons déjà signalé (notamment au chapitre 3) la distinction nette entre dissipation et dégradation. Cette affirmation souligne donc une grave confusion de la part des auteurs sur le concept d'énergie bien qu'ils aient pourtant clairement distingué énergie mécanique et énergie totale. En effet, selon le premier principe l'énergie totale se conserve, il est en aucun cas question de sa dissipation ! Elle ne peut uniquement être dégradée en vertu du deuxième principe. En revanche, l'énergie mécanique elle ne se conserve pas. Prenons ainsi l'exemple d'une chute d'un corps soumis à des frottements. L'énergie mécanique du système diminue : elle se dissipe par échange d'énergie (notamment par échange d'énergie par chaleur) avec l'extérieur. Mais l'énergie totale du système (corps et milieu extérieur) est restée constante. Elle s'est néanmoins dégradée dans la mesure où l'énergie mécanique du corps tombant s'est convertie en une énergie interne pour le milieu extérieur, moins valorisable ou utilisable.

L'aménagement des programmes en 1998 va amoindrir les ambitions de cette réforme de 1992. On peut ainsi lire dans le bulletin officiel⁷⁰¹ :

« *Le cœur de ce programme est l'énergie, notion indispensable mais très délicate. La thermodynamique étant hors programme, on doit se limiter à quelques exemples d'énergie, de transformation et de bilan d'énergie. Sont donc supprimées un certain nombre d'affirmations abstraites, inutiles et parfois imprécises. Malgré la nécessité de rester aussi près que possible de la réalité quotidienne, le programme est surtout allégé de nombreux développements redondants ou inutiles sur différentes machines et moteurs. Cela devrait permettre aux professeurs de traiter ce programme en entier, c'est-à-dire jusqu'aux leçons finales sur la radioactivité, lesquelles sont indispensables.* »⁷⁰² Aussi, l'énergie ne semble plus être traitée que dans un cadre mécanique. Le concept d'énergie totale, sa conservation et sa dégradation ne sont donc plus accessibles dans le programme du secondaire.

Ainsi, les conséquences de cette réforme sont importantes pour la partie énergie puisque disparaissent du programme de physique les rubriques *machines thermiques et machines à vapeur*

⁷⁰⁰ (Groupe Réussite au Lycée, 1994)

⁷⁰¹ A partir de 1998, les bulletins officiels de l'éducation nationale sont disponibles en format numérique. Ils sont disponibles à l'adresse http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html

⁷⁰² (BO, 29 octobre 1998)

: *intérêt historique, principe et bilan* et du programme de chimie disparaît la compétence « *savoir faire un bilan énergétique.* » Le concept d'énergie est donc recentré sur des applications mécaniques. Malgré cela, il sera pourtant nécessaire comme nous allons le voir, d'introduire pour répondre aux exigences du programme, des notions liées à la thermodynamique comme la *température* ou la *chaleur*.

b. La réforme de la fin des années 90

Suite à cet aménagement, les programmes du secondaire sont bousculés un an plus tard. Dans le B.O. Hors-série n° 6 du 12 août 1999, paraissent les nouveaux programmes des Lycées applicables à la rentrée 2000 en seconde, 2001 en première et 2002 en terminale. Cette réforme est notamment marquée par le retour de l'enseignement de la thermodynamique en classe de seconde avec notamment le développement du concept de température qui n'apparaissait pas dans les anciens programmes. Mais, la thématique de l'énergie reste en programme de la classe de première.

Ainsi, en classe de seconde l'introduction des concepts de thermodynamique se fait à travers le troisième thème de l'année « *l'air qui nous entoure* », un thème transversal car selon le programme « *les questions traitant de l'environnement seront abordées sous des angles complémentaires en sciences naturelles, en physique et chimie, en géographie* »⁷⁰³.

L'objectif de cette partie est détaillé en préambule au programme : « *Pour illustrer l'existence de plusieurs niveaux d'appréhension du monde naturel, le macroscopique et le microscopique, on étudie le comportement d'un fluide gazeux : l'air qui nous entoure [...] On met d'abord en évidence l'agitation moléculaire puis, comme il est impossible de connaître le mouvement précis des molécules, on introduit les grandeurs macroscopiques qui vont permettre de rendre compte de l'état d'un gaz. [...] La description de phénomènes physiques liés à l'état thermique d'un corps, dans l'intention de montrer le principe du repérage d'une température, permet d'introduire sans dogmatisme la notion de température absolue : c'est l'état thermique d'une quantité donnée de gaz à faible pression qui permet de définir l'échelle Kelvin. L'équation d'état du modèle du gaz parfait vient finaliser cette partie.* »⁷⁰⁴ Cette description à l'échelle microscopique reliée aux paramètres descriptifs macroscopiques comme la température et la pression, permet de mettre en évidence les deux niveaux d'appréhension du monde physique. En outre, il est bien signalé que la température est une grandeur repérable, expression déjà présente dans les programmes de classes préparatoires au cours des années 1970 (Cf. chapitre 5). Néanmoins, la définition de la température est également présentée à travers la *température absolue* développée à partir de

⁷⁰³ (BO, 12 août 1999) p.5

⁷⁰⁴ (BO, 12 août 1999) p.22

l'équation d'état des gaz parfaits. Cette définition ne doit pas en outre être présentée, selon le programme, comme un dogme mais comme une suite logique à la description d'un corps.

Enfin, le programme de seconde portant sur l'Univers sera complété en classe de première scientifique, par un concept *a priori* aussi général que le temps ou les distances, celui de l'énergie. Les deux programmes formant un ensemble cohérent : « *les échelles de distances et de temps dans l'Univers observable [sera complété] en première S [par] une [autre] échelle, [celle] d'énergie.* »⁷⁰⁵

En classe de première S, le thème énergie est inclus dans un thème plus large mais proche de la mécanique « *Forces, travail et énergie* ». L'objectif de cette partie est détaillé en amont du programme : « *Le but est d'introduire une grandeur fondamentale, l'énergie, dont la conservation constitue une des lois les plus générales de la physique et constitue le guide sous-jacent à la progression. Différentes formes d'énergie sont introduites à partir de la notion du travail d'une force, tout en montrant que selon les situations, ces différentes formes sont susceptibles de se transformer les unes dans les autres. L'objectif est ainsi de progresser vers l'idée de conservation. Enfin, pour illustrer le fait que le travail n'est pas le seul mode de transfert d'énergie, on termine cette introduction par quelques considérations simples sur le transfert thermique* »^{706,707}. Ainsi, si le programme s'inscrit clairement dans une démarche mécanique, il a finalement une ambition plus grande puisque propose l'introduction de l'énergie interne, bien qu' « *aucune expression de [celle-ci ne soient] proposée* »⁷⁰⁸. Le principe de la conservation de l'énergie doit comme l'invite le programme, être présenté comme une conclusion générale de cette partie : « *On pourra conclure cette partie présentant le principe de conservation de l'énergie sous la forme : à tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée "énergie". Si l'énergie d'un système augmente ou diminue, c'est qu'il a reçu ou cédé de l'énergie, que ce soit sous la forme de travail, de transfert thermique ou de rayonnement* »⁷⁰⁹. Les expressions « dégradation » et « dissipation » de l'énergie, qui pouvaient apparaître comme confuses, disparaissent alors du libellé du programme.

L'application aux machines thermiques est toujours absente du programme du première S, comme l'aménagement des programmes de 1998 l'avait initié, mais grâce à l'introduction du premier principe de la thermodynamique, (bien qu'il ne soit pas toujours pas explicitement nommé dans le programme), les grandeurs énergétiques et les grandeurs de transfert (travail, transfert thermique et rayonnement) sont clairement exposées. A ce propos, le programme distingue non

⁷⁰⁵ (BO, 12 août 1999) p.7

⁷⁰⁶ Il a été suggéré de remplacer le mot « *chaleur* » par l'expression « *transfert thermique* » dans les programmes de 1^{ère} S à compter de 2001. Nous reviendrons notamment sur ce point dans le Chapitre 8.

⁷⁰⁷ (BO, 31 août 2000) p.189

⁷⁰⁸ (BO, 31 août 2000) p.190

⁷⁰⁹ (BO, 31 août 2000) p.190

pas deux mais trois modes de transfert : s'ajoute au travail et au transfert thermique, le transfert d'énergie par rayonnement. Nous y reviendrons dans un prochain paragraphe.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS	CONNAISSANCES ET SAVOIR-FAIRE EXIGIBLES
<p>Identifier les effets sur un solide de forces dont les points d'application se déplacent dans le référentiel d'étude:</p> <ul style="list-style-type: none"> - modifications de la valeur de la vitesse d'un solide en chute libre, d'un solide glissant sur un plan incliné, de la valeur de la vitesse de rotation d'un solide autour d'un axe fixe - modifications de l'altitude, de la température, de l'aspect... <p>Utiliser un tableur et un grapheur. Étude quantitative des variations de la valeur de la vitesse d'un corps dans différentes situations* :</p> <ul style="list-style-type: none"> - chutes libres avec et sans vitesse initiale (utilisation de capteurs chronocinés, de logiciels, de vidéos...); - satellites en mouvement circulaire uniforme; - solide lancé sur une table... <p>Analyse du travail de la force de gravitation qui s'exerce sur une comète; conséquence sur sa vitesse.</p> <p>Expérience de Joule ou équivalente.</p> <p>Approche qualitative de la mise en contact de deux corps à des températures différentes: évolution vers l'équilibre thermique.</p> <p>Analyse qualitative des transferts d'énergie se faisant sur un système déterminé.</p>	<p>1 - Travail d'une force</p> <p>1.1 Notion de travail d'une force Effets possibles d'une force dont le point d'application se déplace.</p> <p>1.2 Travail d'une force constante $W_{AB} = F \cdot AB = F \cdot AB \cdot \cos \alpha$ Unité de travail: le joule (symbole: J). Expression du travail du poids d'un corps. Travail moteur, travail résistant.</p> <p>1.3 Puissance du travail d'une ou plusieurs forces</p> <p>2 - Le travail: un mode de transfert de l'énergie</p> <p>2.1 Travail et énergie cinétique Dans un référentiel terrestre, étude expérimentale de la chute libre d'un corps au voisinage de la Terre; travail du poids: $W_{AB}(P) = \Delta[(1/2)MV_G^2]$ Interprétation énergétique; définition de l'énergie cinétique d'un solide en translation. Généralisation: pour un solide en translation soumis à diverses forces: $(1/2)MV_B^2 - (1/2)MV_A^2 = \Sigma W_{AB}(F_{ext})$.</p> <p>2.2 Travail et énergie potentielle de pesanteur Énergie potentielle d'un solide en interaction avec la Terre; Cas particulier des situations localisées au voisinage de la Terre. Relation $E_{pp} = Mgz$. Transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans le cas de la chute libre.</p> <p>2.3 Travail et énergie interne Quelques autres effets du travail reçu (déformations élastiques, élévation de température, changements d'état physico-chimiques). Notion d'énergie interne.</p> <p>3 - Le transfert thermique Un travail reçu peut produire une élévation de température d'un corps. Une élévation identique de température peut être obtenue par transfert d'énergie sous une autre forme: le transfert thermique; aspect microscopique. Autre mode de transfert énergétique: le rayonnement.</p>	<p>Connaître quelques effets sur un solide de forces dont le ou les points d'application se déplacent. Exprimer et calculer le travail d'une force constante. Savoir que le travail d'une force constante effectué entre deux points A et B est indépendant du chemin parcouru.</p> <p>Utiliser la relation $P = W / \Delta t$</p> <p>Utiliser l'expression de l'énergie cinétique d'un solide en translation. <i>Mettre en œuvre un dispositif décrit.</i></p> <p>Utiliser le fait qu'entre deux positions, dans un référentiel galiléen, la variation de l'énergie cinétique d'un solide en translation est égale à la somme des travaux des forces extérieures.</p> <p>Utiliser l'expression de l'énergie potentielle de pesanteur d'un solide au voisinage de la Terre.</p> <p>Expliciter la transformation d'énergie potentielle en énergie cinétique dans des cas simples.</p> <p>Savoir que l'énergie reçue par travail peut aussi être "stockée" par un corps dont certaines propriétés physiques ou chimiques sont modifiées.</p> <p>Savoir qu'à l'échelle macroscopique, un transfert thermique se fait spontanément du système dont la température est la plus élevée vers celui dont la température est la plus basse. Prévoir sur des exemples simples le sens d'un transfert thermique. Savoir que le rayonnement est un mode de transfert de l'énergie.</p>
<p>La conclusion de l'analyse présentée dans le chapitre s'exprimera sous la forme suivante : À tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée "énergie". Si l'énergie d'un système augmente ou diminue, c'est qu'il a reçu ou cédé de l'énergie, que ce soit par travail, par transfert thermique ou par rayonnement.</p>		

Figure 44 Extrait du Programme de Physique en Première S⁷¹⁰

L'énergie reste également présente dans l'enseignement de chimie à travers le thème « L'énergie au quotidien : La cohésion de la matière et les aspects énergétiques de ses transformations ». Pourtant, les aménagements proposés en 1998 et la réorganisation du programme en 2001 réduisent désormais l'horaire à 4h d'enseignement.

⁷¹⁰ (BO, 31 août 2000) p.189

Cette organisation perdurera jusqu'à la réforme Chatel proposée en octobre 2009, et appliquée à la rentrée 2010 en classe de seconde, 2011 en classe de première et 2012 en classe de terminale. Cette réforme ne fait pas l'objet de recherches dans le cadre de ce travail.

Nous proposons dans la suite, d'analyser l'interprétation des programmes dans les manuels. Car, bien que les concepteurs aient proposé un descriptif détaillé en distinguant les contenus des connaissances exigibles, il existe pour les auteurs d'ouvrages une certaine liberté quant à la présentation des idées, aux choix du vocabulaire et aux définitions des concepts étudiés. Ces trois points comme nous l'avons vu dans les précédents chapitres ont un rôle très important dans l'enseignement de la thermodynamique.

2. L'analyse des programmes de thermodynamique du secondaire

a. La méthode de recherche et d'analyse

La méthode choisie pour analyser les programmes de thermodynamique dans le secondaire va être, pour cette époque, quelque peu différente des méthodes utilisées sur les périodes précédentes.

Tout d'abord, nous avons choisi d'analyser simultanément les deux réformes. En effet, les objectifs de ces programmes sont très proches et en ce qui concerne la thermodynamique, le programme du début des années 2000 apparaît comme une variation du programme de 1993 sans bouleversement majeur *a priori*. Aussi, on essaiera à travers des exemples de mettre en évidence l'évolution de la présentation des concepts dans les manuels au cours de ces périodes.

En outre, les programmes et leurs commentaires organisent et structurent davantage l'enseignement des sciences physiques. Les présentations des contenus de l'enseignement des sciences physiques s'harmonisent en donnant :

« Une structure qui comporte à la fois des « activités supports » proposées aux enseignants et l'énoncé des compétences et connaissances à acquérir. En complément, le groupe a rédigé pour chaque classe des « documents d'accompagnement » destinés aux professeurs »⁷¹¹

En outre, comme nous l'avons déjà souligné, les documents références pour l'analyse des programmes sont constitués de manuels scolaires « à grand tirage », issus d'éditions largement diffusées dans les établissements.

Aussi, pour notre étude nous avons choisi pour la période 1993-2001, d'étudier les supports d'accompagnement proposés dans les académies ainsi que les ouvrages des éditions : Hachette (éditions de 1994 de 1998 et de 2004), Bordas (édition de 1994), Belin (édition de 2000) et Hatier

⁷¹¹ (Boyer, juin 1996) p.8

(édition de 2004). Ceux-ci sont co-écrits par une réunion d'auteurs, enseignants dans le secondaire ou dans le supérieur et parfois dirigés par un inspecteur régional. Il ne s'agit donc plus de réaliser une étude par auteur, mais de présenter un courant de pensée collectif. Le travail consistera à souligner les points de convergence ou de divergence sur les concepts de température, de chaleur et d'énergie qui ont déjà été mis en relief dans les précédentes périodes, pour les classes du secondaire.

b. Le concept de température : une description microscopique

Le programme de première S de 1994 n'aborde pas directement la représentation de la température. Pourtant, les développements des notions énergétiques et notamment de la grandeur « chaleur » obligent les auteurs à présenter le concept de température. Aussi, bien que cela n'apparaisse pas dans le programme, ils choisissent une introduction de la température par une approche microscopique, comme cela existait dans les anciens programmes. Aussi, peut-on lire dans les ouvrages des éditions Bordas ou Hachette de 1994 :

« *La température est une propriété d'un système ou de l'une de ses parties : elle rend compte de l'énergie d'agitation microscopique qui s'y trouve emmagasinée. La chaleur concerne au contraire une relation entre deux systèmes.* »⁷¹²

« *L'élévation de la température témoigne de l'augmentation de [l']énergie microscopique [...] On peut augmenter la température d'un système en lui transférant de l'énergie sous différentes formes.* »⁷¹³

Ces définitions permettent en outre, aux auteurs de distinguer la notion de chaleur, présentée comme une grandeur d'échange, et de température, paramètre d'état. En l'occurrence, dans la première définition, les auteurs soulignent, encore une fois, l'intérêt du système dans cette définition. Si la température caractérise le système, la chaleur ne s'exprime qu'au niveau de l'interface de celui-ci.

Avec la réforme de la fin des années 1990, la notion de température est à nouveau introduite en classe de seconde. Aussi, le thème « *l'air qui nous entoure* » permet d'appréhender le concept de température en le déconnectant totalement de la notion de chaleur qui n'est présente qu'en classe de première et qui n'est de ce fait jamais évoquée dans les ouvrages de seconde.

S'il était encore possible de trouver dans les années 1980, des considérations sur les sensations de chaud et de froid par le sens du toucher pour appréhender la température, ces aspects sont presque totalement absents des ouvrages de seconde du début des années 2000, du moins dans ceux que nous avons parcourus. La température caractérise ce que les auteurs des manuels mais aussi des programmes, appellent *l'état thermique* du corps. Nous avons vu que cette appellation

⁷¹² (Lecardonnel, et al., 1994) p.164

⁷¹³ (Durandea, et al., 1994) p.143

était déjà présente au début des années 1900, notamment dans les ouvrages de Chassigny (Cf. chapitre 2). Aussi, le concept de température peut être introduit suivant différents aspects.

La première possibilité est l'introduction via la notion d'*équilibre thermique*. On trouve ainsi les affirmations suivantes :

*« La température est la grandeur physique macroscopique relative à l'état thermique des corps, solides, liquides ou gazeux. Quand deux corps sont en équilibre thermique, ils ont la même température. »*⁷¹⁴

Certains auteurs suggèrent également la vitesse d'établissement de cet équilibre :

*« La lecture sur un thermomètre, de la température d'un corps ne s'effectue qu'une fois l'équilibre thermique atteint entre le thermomètre et le corps. Cet état n'est atteint qu'au bout d'un « certain » temps.»*⁷¹⁵

Pourtant, on peut retrouver des expressions ambiguës à travers ce genre de présentation. Ainsi, on peut lire des commentaires faisant à nouveau appel à nos sensations subjectives (notion de chaud et de froid), qui rappelons-le, sont trompeuses :

*« Le fait qu'un corps soit plus ou moins chaud exprime son état thermique, décrit par la température du corps. »*⁷¹⁶

Le second aspect est l'introduction de la température via la théorie cinétique des gaz. En effet, les programmes suggèrent de faire le lien entre les effets macroscopiques et microscopiques comme pour la réforme de 1966 (Cf. chapitre 4). Ainsi, on peut lire dans les manuels de la classe de seconde pour les années 2000, une référence à l'agitation microscopique des particules :

*« Plus la température d'un gaz est élevée, plus le mouvement des molécules qui le constituent est rapide et désordonné. »*⁷¹⁷

*« L'agitation des molécules d'un gaz, appelée agitation thermique, est liée à la température du gaz. »*⁷¹⁸

Aussi au cours des années 1990 et 2000 le concept de température se distingue du concept de chaleur et même d'énergie. La température apparaît comme une grandeur d'état du système caractéristique de son état microscopique. En écartant toute représentation énergétique de la définition de la température, les auteurs évitent ainsi toute confusion.

Les concepts énergétiques sont quant à eux, introduits une année plus tard, en classe de première S. Voyons comment les manuels interprètent les programmes, en présentant les idées d'énergie et de transfert d'énergie.

⁷¹⁴ (Parisi, et al., 2001) p.334

⁷¹⁵ (Clavel, et al., 2004) p.306

⁷¹⁶ (Clavel, et al., 2004) p.306

⁷¹⁷ (Parisi, et al., 2001) p.321

⁷¹⁸ (Clavel, et al., 2004) p.321

c. Formes et sources d'énergie

Le grand thème « énergie » présent en première S dans les années 90 repose sur deux points essentiels :

1. L'énergie, emmagasinée dans le système sous ses diverses formes.
2. Le transfert d'énergie possible entre des sources d'énergie.

Pourtant, dans les ouvrages parus en 1994, les auteurs avouent dans l'introduction de leur chapitre qu'« il est difficile d'explicitier immédiatement la notion d'énergie »⁷¹⁹. Mais paradoxalement, elle « nous est rendue familière par la place qu'elle occupe dans de nombreux domaines de la vie courante, de l'activité économique ou de l'activité industrielle ; c'est un sujet régulièrement abordé par les publications, les émissions de télévision ou de radio... »⁷²⁰

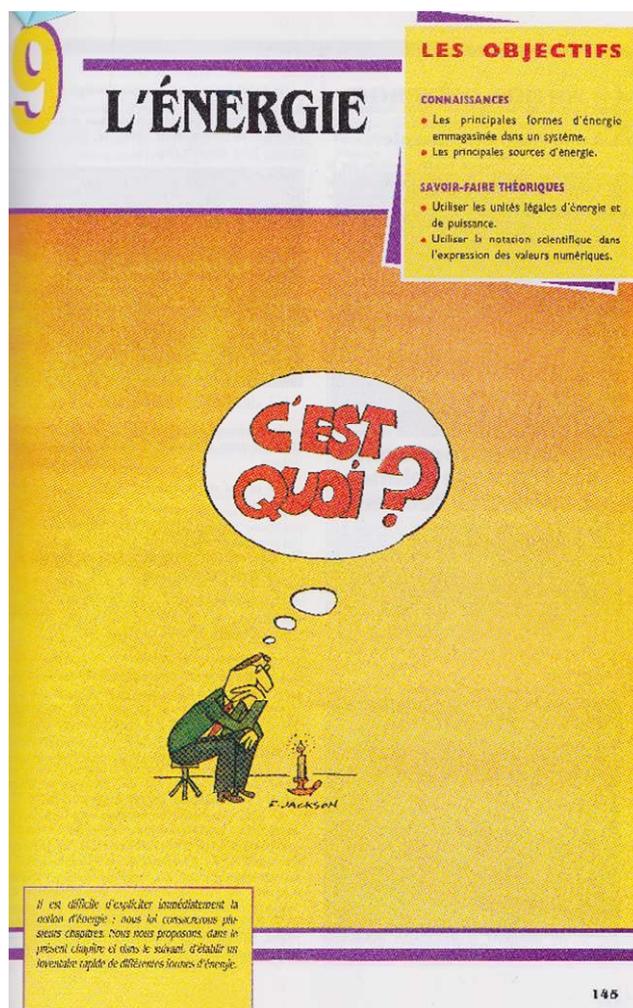


Figure 45 « L'énergie c'est quoi? »⁷²¹

⁷¹⁹ (Lecardonnell, et al., 1994) p.145

⁷²⁰ (Lecardonnell, et al., 1994) p.146

⁷²¹ Illustration du thème énergie (Lecardonnell, et al., 1994) p.145

Selon les ouvrages, une des premières approches que l'on peut donner à l'énergie est la perception que l'on a d'elle en fonction de ses « formes »⁷²² très diverses. Toutefois, le nombre de formes que proposent les ouvrages (Bordas comme Hachette) sont nettement plus réduites que celles présentées au début et milieu du siècle (Cf. chapitre 2, 3 et 4 par exemple). Aussi, sont citées :

- l'« énergie cinétique » associée au mouvement du corps,
- l'« énergie potentielle », relative aux positions relatives de ses parties en interaction
- les « énergies d'origine microscopique cinétique et potentielle. », c'est-à-dire l'énergie interne qui n'est pas explicitement nommée.

Concernant cette approche de l'énergie par ses formes nous pouvons proposer plusieurs remarques.

Tout d'abord, les auteurs ne parlent plus d'énergie thermique ni même d'énergie calorifique. Ces concepts paraissent *a priori*, définitivement abandonnés dans le langage relatif aux formes de l'énergie.

Ensuite, dans l'édition Bordas, il est rappelé la pertinence et l'intérêt de définir le système considéré, par rapport auquel on dénombre l'énergie emmagasinée. Cette notion n'apparaît pas dans l'édition Hachette. Or, nous verrons au prochain paragraphe, que dans l'approche représentative des échanges et des stockages de l'énergie, la notion de système possède une place prépondérante.

En outre, d'autres formes d'énergie sont également proposées dans les ouvrages. En effet, on trouve dans les éditions Hachette et Bordas :

1. L'énergie chimique : « emmagasinée au niveau des liaisons chimiques »
 2. L'énergie nucléaire « emmagasinée par les noyaux au niveau des liaisons entre nucléons »⁷²³
- Pourtant, les auteurs de l'édition Hachette, précisent qu'il s'agit davantage de « sources d'énergie »⁷²⁴ c'est-à-dire de « réserves naturelles d'une forme d'énergie donnée »⁷²⁵, comme « les sources fossiles [...] les sources nucléaires [...] ou encore les sources renouvelables »⁷²⁶ qui possèdent la forme « d'énergie potentielle d'interaction microscopique. »⁷²⁷ Aussi, on note une certaine ambiguïté dans les propos puisque ces deux autres formes d'énergie seraient en réalité déjà incluses dans la troisième forme d'énergie citée plus haut, i.e. : « énergies d'origine microscopique cinétique et potentielle. »

⁷²² L'emploi des guillemets apparaît régulièrement pour désigner les formes d'énergie, à titre d'exemple (Lecardonnell, et al., 1994) p.147

⁷²³ (Lecardonnell, et al., 1994) p.149

⁷²⁴ Nous reviendrons dans un prochain paragraphe sur l'utilisation du mot source associé à la chaleur

⁷²⁵ (Lecardonnell, et al., 1994) p.150

⁷²⁶ (Durandea, et al., 1994) pp.126-127

⁷²⁷ (Durandea, et al., 1994) p.130

La définition des formes d'énergie permet également aux auteurs des éditions Hachette d'introduire le concept d'énergie totale en vue de présenter sa conservation. Aussi, peut-on lire dans l'ouvrage des éditions Hachette de 1994 :

« L'énergie totale E d'un système est la somme de son énergie mécanique E_M et de son énergie microscopique U_{mic} : $E = E_M + U_{mic}$. »⁷²⁸

Cette énergie U_{mic} désigne l'énergie interne absente nominativement des formes d'énergie stockée au sein d'un corps, lors des descriptions proposées dans la réforme de 1994. Cette notion apparaît clairement en revanche dans le programme de 2001, où la définition est reprise par les auteurs : « l'énergie interne est une énergie stockée dans la matière. Elle est égale à la somme des énergies microscopiques : cinétiques et potentielles d'interaction de toutes les particules constitutives du système. »⁷²⁹

Pourtant, nous avons vu au chapitre précédent, au travers des articles de Roulet, Barras, Gié et Pérez que cette définition de l'énergie totale n'est pas correcte. En effet, si on considère que l'énergie totale est la somme de l'énergie mécanique et de l'énergie interne, les interactions à l'échelle microscopique (i.e. les énergies potentielles microscopiques) sont comptabilisées deux fois !

d. Transfert d'énergie et « chaines énergétiques »

Aux côtés des énergies stockées dans le système, les transferts d'énergie sont également présentés. Dans la première partie de la décennie, le développement de cette partie repose sur une représentation en forme de « diagrammes ou chaînes énergétiques » dans lesquelles les grandeurs de transfert se distinguent des grandeurs de stock. Ces diagrammes représentatifs ont pour but de faciliter les bilans énergétiques.

La représentation ainsi proposée, reprend celles que nous avons présentées pour les années 80 dans lesquelles le système thermodynamique jouait une place centrale (Cf. chapitre 5). On retrouve dans ces diagrammes « la succession des différents systèmes permettant de convertir l'énergie emmagasinée dans un réservoir en un transfert énergétique utilisable. »⁷³⁰

⁷²⁸ (Durandea, et al., 1994) p.130

⁷²⁹ L'énoncé proposé a été modifié par rapport à l'énoncé original présent dans l'ouvrage : « l'énergie interne est une énergie stockée dans la matière. Elle est égale à la somme des énergies microscopiques et cinétiques potentielles d'interaction de toutes les particules constitutives du système. » (Durandea, et al., 2001) p.145. Nous avons réécrit cette phrase pour la rendre plus lisible en estimant qu'il s'agissait probablement d'un faute d'inattention.

⁷³⁰ (Lecardonnell, et al., 1994) p.238

Pour réaliser ces diagrammes, des fiches méthodes sont généralement proposées afin d'identifier les réservoirs d'énergie, de délimiter les systèmes convertisseurs et de faire l'inventaire des échanges énergétiques. (Cf. Figure 46)

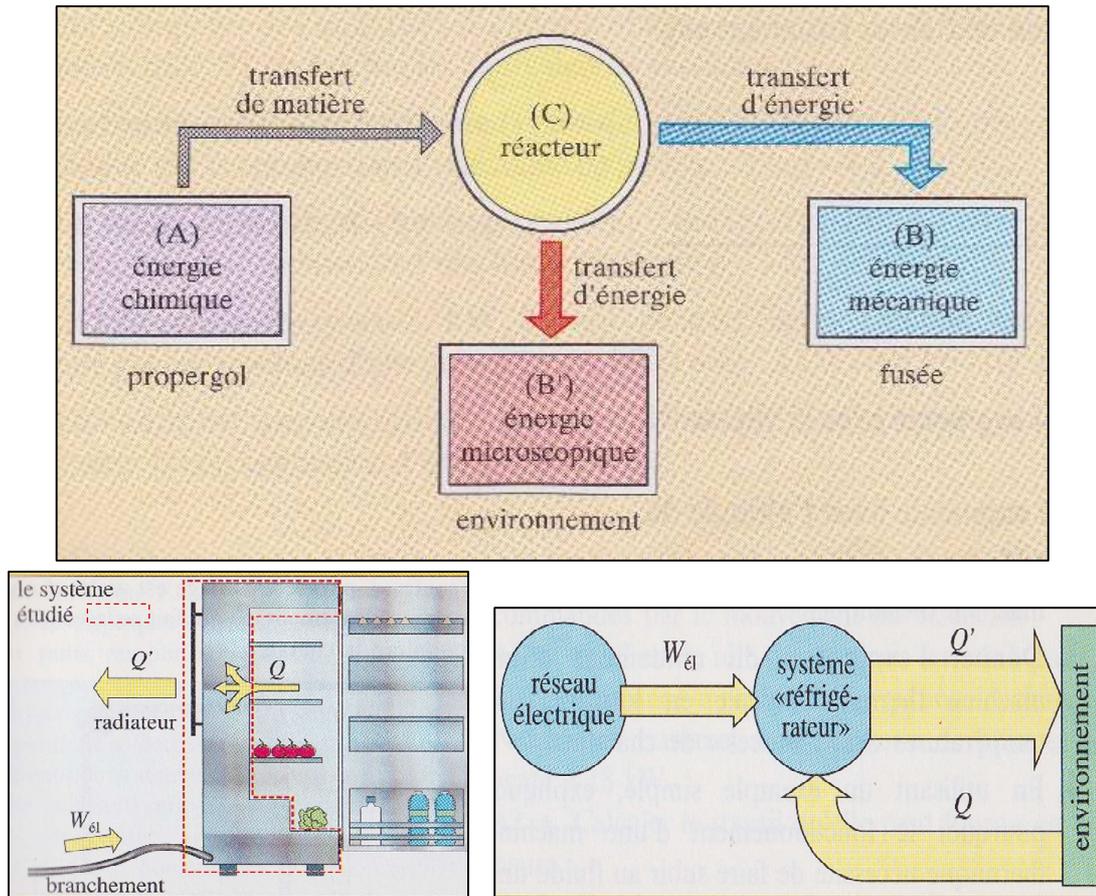


Figure 46 Illustrations des chaînes énergétiques : réacteur de fusée (figure haute) et réfrigérateur (figures basses)⁷³¹

On comprend ainsi l'importance, même si elle n'est pas soulignée explicitement dans les supports, de la définition du *système* et de son choix pour réaliser les bilans d'énergie. La représentation schématique essentielle à la justesse des bilans énergétiques, fait du système un élément central de l'appropriation d'un problème de thermodynamique.

Parmi les transferts d'énergie listés dans les ouvrages on trouve : « le travail mécanique », le « travail électrique », le « rayonnement » et la « chaleur ». Mais, les auteurs avouent volontiers que des abus de langage viennent parfois, prendre le pas sur le langage scientifique. Aussi, en laissant dans un premier temps de côté tout ce qui concerne la chaleur, on peut lire « le travail électrique est presque toujours appelé, par habitude, énergie électrique. C'est le terme que nous

⁷³¹ Figure haute (Durandea, et al., 1994) p.130 et figures basses (Lecardonnel, et al., 1994) p.241

utiliserons dorénavant.»⁷³² Ces abus de langage peuvent avoir de lourdes conséquences sur la compréhension et le sens des grandeurs.

Au-delà de cette remarque, l'avantage de ces représentations synthétiques est de proposer une distinction nette entre ce qui est propre au système : c'est-à-dire son énergie et ce qui est propre à ses échanges avec l'extérieur : les grandeurs de transfert. Pourtant, cette idée de chaîne énergétique est moins présente dans l'interprétation des programmes de 2001, avec la réduction du nombre d'exemples liés aux bilans d'énergie et leurs applications concrètes ; même si le document d'accompagnement des programmes encourage l'utilisation « *de représentations graphiques pour aider les élèves à effectuer correctement les raisonnements fondés sur la conservation de l'énergie.* »⁷³³

e. Les machines thermiques et la dégradation de l'énergie

Durant une parenthèse de quelques années, plus précisément entre 1994 et 1998, les machines thermiques sont à nouveau développées dans le programmes de première S. Elles sont traitées dans la partie « *bilans énergétiques* » et sont évidemment illustrées par une chaîne énergétique, comme on peut le voir sur la représentation du moteur thermique d'une automobile (Cf. Figure 47) :

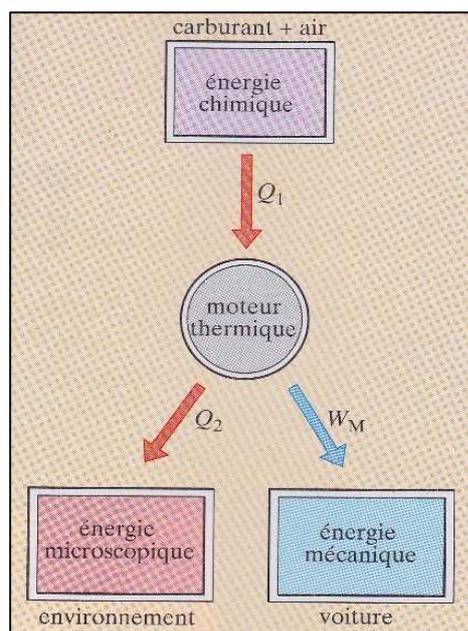


Figure 47 Chaîne énergétique du moteur thermique⁷³⁴

⁷³² (Lecardonnell, et al., 1994) p.162

⁷³³ (Ministère de l'Education nationale, Physique 2001) p.33

⁷³⁴ (Durandea, et al., 1994) p.180

Les grandeurs Q et W apparaissent comme des transferts entre les éléments en interaction caractérisés par leurs énergies (microscopique, mécanique...). On retrouve à nouveau la référence à l'énergie chimique, que nous avons présentée plus haut comme une forme particulière de l'énergie microscopique.

Dans les ouvrages de première S, la machine thermique est présentée comme « *un convertisseur d'énergie qui transforme une partie de la chaleur qu'il reçoit en travail mécanique* »⁷³⁵. Il n'est en revanche, jamais justifié pourquoi cette conversion n'est pas totale. Toutefois, la présentation au travers d'activités documentaires engendre nécessairement la présence de deux sources et les auteurs admettent que le rendement, même dans une machine idéale, sera toujours inférieur à l'unité. On regrettera également l'appellation « *transforme une partie de la chaleur* » qui laisse à nouveau penser que la chaleur est une grandeur énergétique reçue, alors qu'elle est le mode de transfert.

Les auteurs, dans l'édition Bordas de 1994, abordent néanmoins l'idée de dégradation de l'énergie. Aussi, peut-on lire : « *Les phénomènes de frottement peuvent être à l'origine d'une conversion d'énergie mécanique en énergie d'agitation microscopique : c'est la dissipation de l'énergie mécanique [...en outre] il serait impossible, même avec une très grande ingéniosité technique de procéder **intégralement** à la conversion inverse de cette énergie d'agitation microscopique en travail mécanique. La forme mécanique de l'énergie étant la forme utile à l'activité humaine, on dit alors que la dissipation de l'énergie mécanique conduit à sa dégradation.* »⁷³⁶

Deux points se démarquent à travers la lecture de ce texte. Premièrement, il n'y a aucune référence à l'appellation du deuxième principe, la limitation étant *a priori* admise car prouvée par « *[Sadi Carnot avec] des raisonnements très subtils menés sur les machines à vapeur de son époque et publiés en 1824 dans son opuscule Réflexion sur la puissance motrice du feu.* »⁷³⁷ (Cf. Chapitre 1)

Le second point à souligner est la nette distinction dans le texte entre *dissipation* et *dégradation*. La dégradation de l'énergie apparaît dans le fait que l'énergie mécanique peut se convertir en énergie interne mais que la conversion inverse est limitée : ainsi les deux énergies ne sont pas équivalentes.

En outre, dans certains manuels comme le manuel de 1^{ère} S des éditions Hachette, la dégradation n'est pas liée à l'énergie mais au transfert d'énergie. Aussi, peut-on lire :

⁷³⁵ (Durandau, et al., 1994) p.180

⁷³⁶ (Lecardonnel, et al., 1994) p.235

⁷³⁷ (Lecardonnel, et al., 1994) p.234

« Il est impossible de transformer intégralement de la chaleur en travail. En revanche par frottements, on peut transformer intégralement du travail en chaleur. La chaleur est une forme dégradée de transfert d'énergie. »⁷³⁸

Mais cette affirmation est fausse. En effet, il est possible de transformer intégralement de la chaleur en travail, si la variation de l'énergie du système est nulle, par application du premier principe. Il y a ainsi dans cette explication un manque de précision, car cette déclaration s'avère être valable si le système considéré subit des transformations cycliques.

Enfin, à travers l'exemple des machines thermiques, le langage lié au *source d'énergie* est à nouveau introduit. Aussi, peut-on lire, dans l'ouvrage des éditions Bordas : « Dans une machine thermique, un fluide reçoit de la chaleur d'un système appelé **source chaude** (ou de l'énergie chimique d'un réservoir) [...] le fluide est ensuite refroidi au contact d'un système appelé **source froide**. »⁷³⁹

Comme nous l'avons déjà souligné, l'emploi d'expressions comme « reçoit de la chaleur » sont très maladroites car laissent entendre que la chaleur est un contenu énergétique. En outre, les adjectifs « chaude » et « froide » sont à prendre avec précaution, d'autant qu'elles sont ici reliées au concept de chaleur. Un amalgame entre chaleur et température est donc à craindre. D'ailleurs, les auteurs avouent à demi-mots le problème de cette affirmation. En effet, ils restent très prudents dans leurs explications car la citation ci-dessus apparaît entre guillemets dans le texte d'origine, montrant que les appellations « sources chaudes » et « sources froides » sont utilisées pour des raisons historiques. D'ailleurs ils renvoient le lecteur à des encarts tels que « un peu d'histoire »⁷⁴⁰ pour justifier leur choix. Ainsi les « sources chaude et froide » sont davantage considérées comme des systèmes réservoirs d'énergie avec lesquels le moteur interagit par des transferts d'énergie (Cf. Figure 47).

f. L'ambiguïté du langage sur la chaleur

S'il apparaît clairement dans les ouvrages des années 1990 que la chaleur est un mode de transfert de l'énergie, certains points doivent être discutés car l'appréciation de certains concepts ne sont pas universellement identiques, comme nous avons pu le voir par exemple, sur la dégradation de l'énergie ou de son transfert.

Un premier point à soulever concernant la chaleur, est sa comparaison à d'autres modes de transfert. Cela fait notamment écho à certaines remarques dans des ouvrages ou articles (comme

⁷³⁸ (Lecardonnell, et al., 1994) p.230

⁷³⁹ (Lecardonnell, et al., 1994) p.235

⁷⁴⁰ (Durandea, et al., 1994) p.182

celui de Barras et Gié par exemple au Chapitre 4) suggérant qu'il existe d'autres modes de transfert que le travail et la chaleur.

Dans le référentiel de Première S de l'académie de Lille, paru pour la rentrée 1994-1995 : il est demandé de savoir reconnaître les différents modes de transfert d'énergie : « *chaleur, travail, rayonnement et convection.* »⁷⁴¹ Aussi, le rayonnement et la convection ne sont pas classés avec la chaleur. Cette distinction se retrouve dans les ouvrages des éditions Bordas de 1994⁷⁴² et de 1998⁷⁴³. En revanche, à la question « *comment la chaleur transfère-t-elle l'énergie ?* »⁷⁴⁴, les auteurs de l'ouvrage des éditions Hachette répondent que le transfert se fait par conduction et par convection et suggèrent que le rayonnement est un autre mode de transfert : « *L'énergie transportée sous la forme de radiations électromagnétiques est appelée énergie rayonnante. Elle est notée W_r , c'est un mode de transfert d'énergie mesuré en joule (J).* »⁷⁴⁵

Aussi de quatre modes de transfert, les auteurs des éditions Hachette en reviennent à trois. Cette remarque est d'autant plus importante que cette distinction sera à nouveau remise en cause dans le supérieur⁷⁴⁶. Mais, avant de poursuivre, on peut à nouveau soulever le fait qu'il y a là encore un amalgame entre le transfert d'énergie et l'énergie elle-même : on comprend aisément que pour les auteurs, l'énergie rayonnante s'identifie à un transfert d'énergie. Enfin, le choix de notation W_r , pour désigner le mode de transfert est maladroit. La lettre W étant généralement réservée pour les échanges d'énergie par travail.

Le second point de discussion porte sur la construction des phrases autour du concept de chaleur qui amèneront les rédacteurs des programmes du secondaire à modifier le vocabulaire à employer. La dernière remarque que nous venons de faire en est un exemple. Prenons-en un autre. Dans l'édition Bordas de 1998, les auteurs écrivent : « *L'air d'une pompe à main s'échauffe lors du gonflage rapide d'un pneu [...] la température de l'air de la pompe augmente : « l'air s'échauffe » sans être « chauffé » !* »⁷⁴⁷

La construction de cette phrase met en relief les difficultés liées à la proximité du mot chaud (et ses dérivées) et du mot chaleur. Ainsi dans cette phrase : « *l'air s'échauffe* » fait référence à la température du gaz qui s'accompagne d'une augmentation de son énergie interne (partie cinétique), alors que l'expression « *sans être chauffé* » fait référence au transfert d'énergie par chaleur qui n'a pas eu lieu dans cette expérience puisque le transfert d'énergie est uniquement fait par travail des forces lors du va-et-vient durant le gonflage. Aussi, les auteurs précisent

⁷⁴¹ Référentiel de première S, « conservation de l'énergie »,

⁷⁴² (Lecardonnell, et al., 1994) pp.164-165

⁷⁴³ (Anfosso, et al., 1998) p.171

⁷⁴⁴ (Durandea, et al., 1994) p.142

⁷⁴⁵ (Durandea, et al., 1994) p.141

⁷⁴⁶ Cf. Paragraphe III du Chapitre 6

⁷⁴⁷ (Anfosso, et al., 1998) p.169

qu'« il est donc incorrect de parler de « la chaleur emmagasinée dans un système »⁷⁴⁸ ou de dire qu'un système cède « sa » chaleur à un autre.»⁷⁴⁹ On peut noter que la condition d'expérience « gonflage rapide » n'est pas commentée par les auteurs. Ils auraient pu poursuivre leur explication en précisant que cette condition permet ainsi de ne pas considérer les échanges d'énergie par chaleur avec l'extérieur qui se font sur un temps relativement long⁷⁵⁰.

Pour parler de la chaleur, les auteurs revêtent en outre une précaution particulière. Aussi, dans le manuel Hachette de 1994, on trouve :

« Transfert d'énergie sous forme de chaleur .»⁷⁵¹

La qualification « sous forme » étant *a priori* associée au mot transfert et non énergie. Mais rien n'est moins sûr, car sur la même page on peut lire sur une illustration d'une chaîne énergétique « de la chaleur a été transférée »⁷⁵² ou encore « transfert de chaleur.»⁷⁵³ Cette dernière appellation se retrouve également dans l'édition Bordas de 1994 « expression des transfert de chaleur»⁷⁵⁴ ou encore dans le document d'accompagnement des programmes « conduction de la chaleur »⁷⁵⁵. Aussi, le concept de chaleur reste intimement lié à une énergie, puisque la construction de la phrase laisse sous-entendre que l'on transfère de la chaleur et non pas que l'on transfère de l'énergie par chaleur. On retrouve cette ambiguïté pour d'autres modes de transferts (Cf. Figure 48) comme par exemple l'expression : « transfert d'énergie par rayonnement »⁷⁵⁶ ou « transfert d'énergie rayonnante.»⁷⁵⁷

⁷⁴⁸ (Anfosso, et al., 1998) p.169

⁷⁴⁹ (Lecardonnel, et al., 1994) p.164

⁷⁵⁰ Les évolutions rapides sont souvent considérées comme des transformations adiabatiques. Les transferts d'énergie par chaleur, notamment par conduction ont des temps caractéristiques τ relativement longs sur une grande distance L : $\tau = aL^2$, selon l'équation de diffusion thermique (avec $a \ll 1\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

⁷⁵¹ (Durandea, et al., 1994) p.142

⁷⁵² (Durandea, et al., 1994) p.142

⁷⁵³ (Durandea, et al., 1994) p.142

⁷⁵⁴ (Lecardonnel, et al., 1994) p.163

⁷⁵⁵ Référentiel de première S, « conservation de l'énergie », (Groupe Réussite au Lycée, 1994) et Figure 54 Chapitre 7.

⁷⁵⁶ (Lecardonnel, et al., 1994) p.164 et (Durandea, et al., 1994) p.143

⁷⁵⁷ Illustration extraite de (Durandea, et al., 1994) p.143

5 1 COMMENT AUGMENTER L'ÉNERGIE MICROSCOPIQUE D'UN SYSTÈME ?

Examinons différentes façons d'augmenter l'énergie microscopique d'un système, par exemple, un récipient contenant un litre d'eau à température ambiante.

- Par transfert de chaleur**
 Le récipient contenant de l'eau est placé sur un brûleur à gaz ; de l'énergie est ainsi transférée de la flamme du brûleur à l'eau sous forme de chaleur, notée Q .
- Par transfert d'énergie rayonnante**
 Le récipient est placé dans un four à micro-ondes ; de l'énergie rayonnante W_R est transférée à l'eau.
- Par transfert d'énergie sous forme de travail électrique**
 Une résistance chauffante est plongée dans le récipient ; du travail électrique W_E est ainsi transformé en chaleur, transférée à l'eau.
- Par transfert d'énergie sous forme de travail mécanique**
 En agitant l'eau avec un batteur à œufs, par exemple (la technique est peu usuelle !), de l'énergie est transférée à l'eau sous forme de travail mécanique.

Dans ces exemples, l'élévation de température de l'eau témoigne de l'augmentation de son énergie microscopique ; de l'énergie lui a été transférée sous différentes formes (doc. 10).

On peut augmenter la température d'un système en lui transférant de l'énergie sous différentes formes.

10. Les différents transferts permettant de modifier l'énergie microscopique de l'eau. ▶

Figure 48 Les différentes façons d'augmenter l'énergie microscopique d'un système : les transferts d'énergie⁷⁵⁸

Cette confusion se retrouve encore plus grossièrement dans le document d'accompagnement de première S de 1994 où dans la partie chimie, les concepteurs des programmes ont gardé l'expression « *énergie thermique*. » Or, dans le référentiel de première S, il apparaît clairement que cette énergie thermique est directement associée à la chaleur⁷⁵⁹. Pourtant, comme le rappelle l'édition Hachette en préambule du thème énergie en citant Gaston Bachelard (1884-1962) « *pour être entendu dans la cité scientifique, il faut parler scientifiquement le langage scientifique en traduisant les termes du langage commun en langage scientifique.* »⁷⁶⁰ Or, ici on constate que le langage commun vient perturber la compréhension du concept de chaleur.

Dans la réédition du manuel de 1998, les auteurs proposent une première correction en harmonisant les appellations. Aussi, trouve-t-on : « *transfert par travail* », « *transfert par chaleur* », « *transfert par rayonnement et par convection.* »⁷⁶¹

⁷⁵⁸ Illustration extraite de (Durandea, et al., 1994) p.143

⁷⁵⁹ Référentiel de première S, « réaction chimique et « énergie thermique » », (Groupe Réussite au Lycée, 1994)

⁷⁶⁰ *Épistémologie*, Gaston Bachelard, textes choisis par Dominique Lecourt, 3^{ème} édition PUF, 1980, p.193, citation présente dans (Durandea, et al., 1994) p.125

⁷⁶¹ (Anfosso, et al., 1998) pp.166-167 et 171

Il faut attendre trois ans de plus et la révision des programmes de 2001 pour que le mot « chaleur » disparaisse *officiellement* du langage de la thermodynamique.⁷⁶² Ainsi, trouve-t-on dans les commentaires la définition donnée au *transfert thermique*, qui doit remplacer le mot *chaleur* dans l'enseignement :

« En apportant de l'énergie par travail mécanique ou électrique (plus tard pour ce dernier point) on peut échauffer un corps, d'où l'idée qu'en général à une élévation de température correspond une énergie stockée plus importante. On s'appuie ensuite sur l'étude de situations simples dans lesquelles un système voit son énergie évoluer (par exemple un corps chaud qu'on laisse refroidir au contact de l'air atmosphérique ou un corps froid placé au contact d'une source chaude). On définit alors un deuxième mode de transfert d'énergie : On indique qu'à l'échelle macroscopique, ce transfert d'énergie s'effectue spontanément du système dont la température est la plus élevée vers celui dont la température est la plus basse. On se limite dans cette première approche au transfert thermique par conduction. [...] »

Il a été vu en classe de seconde que la température est la variable macroscopique rendant compte de l'agitation des molécules d'un gaz. Le transfert thermique est un mode de transfert désordonné qui s'interprète à l'échelle microscopique par des transferts d'énergie lors d'interactions concernant des particules situées à l'interface entre le système et son environnement.

Le transfert d'énergie par rayonnement ne fait ici l'objet que d'une approche simple et qualitative à partir d'exemples courants (soleil, lampe...) »^{763 764}

Plusieurs remarques peuvent être proposées à la lecture de ce texte. Tout d'abord, comme nous l'avons signalé précédemment, le transfert par rayonnement n'est pas classé parmi les transferts thermiques. Ce classement n'est pas justifié dans le programme. Nous pouvons peut-être proposer une explication possible à ce choix. Les transferts thermiques rassembleraient les transferts d'énergie par chaleur provoqués par une différence de température entre le milieu extérieur et le corps. Ainsi, conduction et convection seraient alors classés comme des *transferts thermiques*. Le transfert par rayonnement serait quant à lui classé à part, puisqu'il n'est fonction que de la température du système considéré. Nous reviendrons plus tardivement dans ce travail sur cette classification.

En outre, le texte officiel distingue clairement la notion de *température* de celle de *transfert thermique* par l'introduction du concept de *système*. En effet, il est précisé que la température

⁷⁶² Cette décision fait suite à la proposition faite dans les programmes de CPGE en 1995 (Cf. Paragraphe III du Chapitre 6)

⁷⁶³ Commentaires du programme 1ere S de 2001 (BO, 31 août 2000) p.190

⁷⁶⁴ Le transfert par rayonnement est encore aujourd'hui dans le programme du secondaire, distingué du transfert par chaleur. Quant à la convection, elle n'est clairement plus abordée dans les documents d'accompagnement ou manuels à destination des élèves.

est caractéristique du système thermodynamique alors que le transfert thermique est un mode de transfert au niveau de *l'interface* du système. Cet aspect déjà souligné dans quelques articles du BUP notamment, est désormais clairement établi dans le programme.

Le changement de dénomination pour désigner la chaleur est justifié dans le document d'accompagnement des programmes de 2001 dans un paragraphe intitulé : *Confusions entre chaleur, température et énergie interne*. Voici les motivations qui ont poussées les concepteurs de programmes :

« Le mot « **chaleur** » est largement utilisé (et compris) non seulement comme caractéristique d'un transfert d'énergie (« la chaleur se déplace », « se propage », etc.) mais aussi dans le sens d'une grandeur d'état, même chez les élèves avancés ou chez des étudiants. On note par exemple, chez de jeune élèves à confondre chaleur et source de chaleur, la croyance en l'existence autonome du « chaud » et du « froid », et chez les plus âgés ou chez les étudiants l'association systématique, voire l'identification de la chaleur et de l'énergie interne [...]

La chaleur est souvent considérée comme l'unique cause possible du changement de température. [...] On évite l'emploi du terme de « chaleur » compte tenu des difficultés conceptuelles importantes qu'il soulève et de la polysémie qui s'est installé de fait dans l'opinion autour de ce mot. On utilise le mot « transfert thermique ». »⁷⁶⁵

Aussi, les arguments avancés reprennent certains aspects que nous avons développés dans ce travail. Les confusions entre chaleur et température ainsi qu'entre chaleur et énergie interne présentes chez les élèves sont également présentes, comme nous l'avons montré, dans les ouvrages et *a fortiori* chez les enseignants. Ainsi, pour mettre un terme à ces confusions, l'idée a été de changer la dénomination de la chaleur en la remplaçant par le mot *transfert thermique*. Il sera nécessaire dans la suite de notre travail de voir si cette consigne a été suivie et si elle a répondu à son objectif. (Cf. chapitre 8)

Mais, il est à noter que dans ces recommandations une ambiguïté persiste. En effet, les auteurs soulignent le fait que la chaleur est comprise comme un mode de transfert et le justifie en citant l'utilisation des expressions « la chaleur se déplace », « se propage », etc. Pourtant, ces expressions laissent sous-entendre que la chaleur est elle-même une grandeur énergétique. Aussi, faudrait-il dire : « l'énergie se déplace par chaleur » ou « l'énergie se propage par chaleur ». Enfin, si nous parcourons la suite du programme officiel, on peut constater que dans la partie III on trouve encore le libellé « énergie électrique » pour désigner le mode de transfert par travail électrique. Cet abus de langage entretient l'amalgame entre énergie et transfert d'énergie.⁷⁶⁶

En outre, ces recommandations semblent *a priori* peu suivies. En effet, dans les ouvrages parus après la réforme on peut lire à titre d'exemples dans les éditions Hachette ou Hatier :

⁷⁶⁵ (Ministère de l'Education nationale, Physique 2001) p.31

⁷⁶⁶ (BO, 31 août 2000) p.191 et (Ministère de l'Education nationale, Physique 2001) p.33

« Lorsque la température de l'eau s'élève, l'agitation des molécules et par conséquent, l'énergie interne de l'eau augmentent. Il y a eu transfert d'énergie à l'eau, appelé transfert thermique (ou plus communément chaleur). Cette énergie provient de la « source de chaleur » utilisée pour chauffer l'eau »⁷⁶⁷

« Les expressions « transfert thermique » et « transfert d'énergie par chaleur » sont équivalentes. »⁷⁶⁸

Aussi, les auteurs prennent en considération les recommandations du programme mais continuent à employer le mot chaleur qui semble ancré dans le langage. Les expressions « transfert de chaleur », « transfert thermique » et « chaleur »⁷⁶⁹ sont présentées comme totalement équivalentes. On retrouve par exemple dans l'énoncé d'un même exercice, la coexistence des deux appellations : « l'énergie consommée est transférée par chaleur à son environnement [...] l'énergie consommée est évacuée par transfert thermique. »⁷⁷⁰

Mais, le manque de considération pour les recommandations du programme de première S est également présent dans le programme des autres matières !

Aussi, dans le document d'accompagnement de Chimie de 2001 pour l'enseignant de première S, les rédacteurs prennent la précaution de parler de transfert thermique. Pourtant, lors d'une proposition de travaux pratiques permettant d'illustrer la partie du programme liée aux aspects énergétiques d'une réaction chimique, on peut lire :

« On se rend compte aisément des pertes d'énergie thermique, essentiellement par les gaz chauds de combustion. Soit Q_p la perte thermique. Soit Q_{te} l'énergie thermique... »⁷⁷¹ Ainsi, la nouvelle appellation proposée soulève à nouveau, un abus de langage. En effet, dans le programme de chimie le mot *énergie thermique* est encore présent pour parler de la notion chaleur. Aussi, on arrive à une persistance du mot énergie thermique à la place de transfert thermique ou même d'énergie interne !

Toujours dans le document d'accompagnement de chimie, les auteurs parlent de « *chaleur latente molaire de vaporisation* »⁷⁷² (même s'il est recommandé de ne pas introduire ce langage aux élèves).

Enfin, comme il est suggéré dans les commentaires de programmes de physique : « *Cette notion de transfert thermique sera réinvestie dans l'enseignement de SVT* »⁷⁷³, il est légitime de s'attarder

⁷⁶⁷ (Durandea, et al., 2001) p.141

⁷⁶⁸ (Bonnin, et al., 2005) p.135

⁷⁶⁹ (Durandea, et al., 2001) p.149

⁷⁷⁰ (Bonnin, et al., 2005) exercice n°20 p.145

⁷⁷¹ (Ministère de l'éducation national, Chimie 2001) p.78

⁷⁷² (Ministère de l'éducation national, Chimie 2001) p.78. Egalement présent dans (Durandea, et al., 2001) p.143

⁷⁷³ Commentaires du programme 1ere S de 2001 (BO, 31 août 2000) p.190

sur le vocabulaire qui est employé dans le programme officiel. Dans la partie « *La machinerie thermique de la Terre* », on trouve les phrases suivantes :

« *Dissipation de l'énergie interne de la Terre. Le flux de chaleur en surface en est la manifestation principale.* »⁷⁷⁴

« *La fabrication de la lithosphère océanique, la subduction et les mouvements des plaques lithosphériques sont les manifestations d'une convection thermique à l'état solide du manteau (transport de chaleur par mouvement de matière).* »⁷⁷⁵

Le mot transfert thermique est totalement absent du programme de SVT. En outre, il est même question de « *chaleur interne* »⁷⁷⁶ pour désigner l'énergie interne. Aussi, nous sommes loins d'avoir une harmonisation du langage, ce qui accentue encore les confusions malgré une volonté de clarifier les concepts.

Enfin, on montre à travers cet exemple, le manque de concertations entre les différents groupes de travail (chimie, physique et biologie) dans l'élaboration des programmes. Ces différences de langage montrent la grande hétérogénéité dans l'appréciation des concepts de la thermodynamique selon le domaine d'application. Nous aurons l'occasion de revenir sur cet aspect dans les chapitres 7 et 8 notamment.

Au cours des années 90, de nombreux changements ont lieu dans l'enseignement des concepts d'énergie, de chaleur et de température. Si le programme dans le début de la décennie se veut très ambitieux, il est rapidement reformulé en 1998 puis simplifié au cours des années 2000. Les choix de présentation du concept de température confirment les orientations des précédentes réformes en favorisant notamment une description microscopique. En outre, les bilans d'énergie s'appuient sur des représentations schématiques où le système thermodynamique d'étude occupe une place centrale. Les grandeurs énergétiques se distinguent nettement des grandeurs de transfert. Pourtant, les confusions et amalgames persistent dans l'enseignement. Aussi, la réforme de 2001 veut proposer une solution de changement de dénomination de la chaleur au profit du mot *transfert thermique*. Une brève analyse vient de nous montrer que cette consigne a du mal à s'imposer. Nous reviendrons sur cet aspect au cours du Chapitre 8. Mais avant cela, il est nécessaire de s'intéresser aux évolutions proposées pour les classes préparatoires aux grandes écoles dont les réformes sont consécutives à celles du second cycle.

⁷⁷⁴ (BO, 31 août 2000) Partie III « La machinerie thermique de la Terre »

⁷⁷⁵ (BO, 31 août 2000) Partie III « La machinerie thermique de la Terre »

⁷⁷⁶ (BO, 31 août 2000) Partie III « La machinerie thermique de la Terre »

III. LA REFORME EN CLASSES PREPARATOIRES

1. Une organisation par filière renforcée

Suite à la réforme du secondaire proposée par François Bayrou, une mise en chantier des classes préparatoires est amorcée en 1994 et la nouvelle organisation entre en vigueur à la rentrée 1995⁷⁷⁷. Il s'agit d'une réforme structurelle dans le but de répondre à deux points essentiels :

1. mieux adapter ces formations aux besoins des entreprises et de l'économie.
2. diversifier le recrutement pour alimenter les 236 écoles d'ingénieurs (publiques ou privées) françaises à la rentrée 1996.

Les modifications portent sur les classes économiques, littéraires mais aussi les classes scientifiques qui nous préoccupent dans nos recherches. Les filières M, M', P, P' et T sont réorganisées en trois sections en 1^{ère} année⁷⁷⁸ (classe de mathématiques supérieures) accessibles depuis un baccalauréat scientifique⁷⁷⁹ : mathématiques-physique et sciences de l'ingénieur (MPSI), physique-chimie et sciences de l'ingénieur (PCSI), physique-technologie et sciences de l'ingénieur (PTSI) qui alimentent quatre voies en 2^{ème} année (classe de mathématiques spéciales) : MP, PC, PT et PSI. (Cf. Figure 49)

Baccalauréats admis	1 ^{ère} année CPGE	2 ^{ème} année CPGE	Concours + écoles accessibles	
S	MPSI	MP	▲ Banque d'épreuves des concours des ENS (MP - PC) ▲ Polytechnique (MP - PC - PSI) et ESPCI (PC - PSI) ▲ Concours commun Mines - Ponts (MP - PC - PSI) ▲ Banque d'épreuves Centrale - Supélec (MP - PC - PSI) ▲ Banque d'épreuves des concours communs polytechniques (MP - PC - PSI) ▲ Banque d'épreuves E3a (MP - PC - PSI)	
		PSI		
	PCSI	PC		
		PSI		
	PTSI	PSI		▲ Banque d'épreuves des concours communs polytechniques
		PT		▲ Concours d'épreuves PT (la plupart des écoles d'ingénieurs recrutent sur la voie PT)
BCPST	BCPST	▲ Concours agro-Ensa - Enita - Vêto ▲ Concours G2E ▲ Ecoles de chimie et E.N.S. Ulm, Lyon et Cachan		

Figure 49 Organigramme des classes préparatoires scientifiques⁷⁸⁰

⁷⁷⁷ Décret n° 94-1015 du 23 novembre 1994 ; Arrêté du 10 février 1995 ; Arrêté du 27 juin 1995.

⁷⁷⁸ Auxquelles il faut rajouter la section BCPST (Biologie, Chimie, Physique et Sciences de la Terre) à destination des industries agroalimentaires et des écoles vétérinaires notamment.

⁷⁷⁹ Le Ministère de l'éducation nationale rappelle néanmoins dans une note de service du 29 mai 1997 qu' : « Il convient de rappeler que le choix de l'enseignement de spécialité en classe de Terminale ne doit pas conditionner l'accès à tel type de classes préparatoires. » Aussi le choix de la filière n'aura pas lieu dès l'entrée en terminale. (Ministère de l'Education nationale, 29 mai 1997)

⁷⁸⁰ (Ministère de l'Education nationale, 2007)

L'idée est de répartir les élèves en fonction de leurs goûts et non par leur niveau en mathématiques. En effet, dans la filière MP, les mathématiques sont la matière la plus importante (35% du volume horaire) avec des épreuves plus relevées que dans les autres filières. La matière « physique-chimie » représente 30% du volume horaire et les options informatiques et sciences de l'ingénieur comptent peu (5%). Dans la filière PC, la physique (35%) et la chimie (10%) sont les matières dominantes avec des épreuves différenciées, les mathématiques (25%) restent valorisées mais il n'y a ni option informatique, ni option sciences de l'ingénieur. La filière PSI, quant à elle, a été notamment créée à l'initiative des grandes écoles d'ingénieurs et des entreprises souhaitant intégrer des profils professionnels généralistes et technologiques. Elle a notamment pour ambition de « *développer chez les élèves le sens du concret et de la réalité physique* » ainsi que de les amener à « *savoir poser un problème et proposer une modélisation.* »⁷⁸¹ Les mathématiques (25%) et la physique-chimie (30%) restent conjointement les deux matières phares mais les sciences de l'ingénieur ont plus d'importance (15%), sans être une matière dominante.

Cette organisation de l'enseignement est encore en cours dans les classes préparatoires scientifiques à l'heure actuelle.

2. Le contenu des programmes

a. Les nouveaux programmes de 1995

La réforme structurelle s'accompagne d'une modification majeure des programmes. Les objectifs s'inscrivent dans la continuité de ceux du second cycle :

« L'enseignement de la physique [...] s'inscrit dans la continuité de l'esprit des programmes du cycle terminal menant au baccalauréat scientifique. Il a vocation dans ces matières à apporter les connaissances fondamentales indispensables à la formation générale d'un futur ingénieur, enseignant ou chercheur. »

Dans un monde en évolution rapide, où une somme énorme de connaissances est disponible, l'enseignement dispensé par le professeur doit éveiller la curiosité face au monde réel, promouvoir le sens de l'observation qui est à l'origine des grandes découvertes et développer chez l'étudiant le goût de l'expérience et du concret.

La formation dispensée au cours des deux années de préparation doit, dans une approche équilibrée entre théorie et expérience, apporter à l'étudiant les outils conceptuels et méthodologiques pour lui permettre de comprendre le monde naturel et technique qui l'entoure et de faire l'analyse critique des phénomènes étudiés.

⁷⁸¹ D'après l'article du journal les Echos, *Classes « prépas » : la réforme sur les rails*, de Jean-Claude Lewandowski – du 31 janvier 1995 (Lewandowski, 31 janvier 1995)

L'objectif essentiel est que l'étudiant devienne graduellement acteur de sa formation, qu'il comprenne mieux l'impact de la science et que, plus assuré dans ses connaissances, il soit préparé à poursuivre son cursus d'études dans les grandes écoles. »⁷⁸²

On remarque une nuance importante vis-à-vis du programme du secondaire où les objectifs étaient clairement de centrer l'enseignement autour de l'expérience. En ce qui concerne les CPGE, la formation doit s'équilibrer entre expérience et théorie, rendant l'étudiant progressivement « *acteur de sa formation* ».

Concernant le choix de la filière de référence pour notre étude, la section PCSI/PC est celle que nous avons privilégiée, dans la mesure où elle est la voie dans laquelle la thermodynamique est la plus développée. L'enseignement de la thermodynamique est fondé sur le concept de *fonction d'état* : énergie interne, enthalpie, entropie et en seconde année (voie PC), sur les fonctions enthalpie libre et énergie libre. Le programme met en avant le modèle du gaz parfait monoatomique qui sert à l'introduction du vocabulaire de la thermodynamique : système, pression, température, équation d'état... C'est également sur cet exemple qu'est introduit une définition de l'énergie interne. (Cf. Figure 50)

Mais la partie « système thermodynamique » autrefois proposée en préambule à la thermodynamique avec de nombreux exemples variés, est ici réduite à l'exemple du gaz parfait. L'universalité de la thermodynamique n'apparaît donc plus aussi clairement que dans la précédente réforme (Cf. chapitre 5).

Le programme s'organise clairement autour de la notion de bilans. On retrouve, en effet, une partie 4 consacrée aux bilans d'énergie, liés au premier principe et aux fonctions d'état énergie interne mais aussi enthalpie, pour laquelle il est suggéré de faire le lien avec l'enseignement de chimie. La partie 5 est consacrée aux bilans entropiques, liés au deuxième principe et à l'entropie. (Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre 9 de ce travail.)

La notion d'équilibre thermodynamique n'est plus présentée de manière explicite dans le programme puisqu'il est seulement précisé : « *Système en équilibre macroscopique global* ». On peut regretter ce choix, car la notion d'équilibre thermodynamique, bien que délicate permet de distinguer clairement la fonction d'état, définie aux états d'équilibre, et les grandeurs de transfert, qui dépendent des états d'équilibre mais aussi du chemin suivi pour passer d'un état à un autre. Enfin, la notion de transformation par voie réversible n'est plus suggérée dans le début du cours de thermodynamique. Elle n'apparaît en effet, qu'au moment des bilans entropiques. Ceci montre une volonté d'imposer l'expression du deuxième principe de Prigogine (Cf. chapitre 4) dans lequel l'entropie produite est la mesure de la réversibilité d'une transformation. Il est en revanche signalé que « *le travail des forces pressantes est calculable dès que l'expression de la pression extérieure p_e ou la pression p en fonction du volume est connue.* » On voit donc apparaître ici, une référence

⁷⁸² Objectifs des programmes des classes préparatoires, citation extraite de (Union des Professeurs de Spéciales, 1996) p.1

non explicite à la notion de transformation par voie quasistatique (Cf. Chapitre 5). Ce type de transformations qui avait fait l'objet de nombreuses discussions au cours des années 70-80 ne semblent donc pas être officiellement accepté dans le programme de thermodynamique. Nous reviendrons sur ces points au cours du Chapitre 9.

1. Le gaz parfait monoatomique.

Description des caractères généraux de la distribution des vitesses moléculaires (homogénéité, isotropie, vitesse quadratique moyenne).

Définition cinétique de la température, de la pression.
Relation entre pression et vitesse quadratique moyenne.
Équation d'état, énergie interne.

Limites du modèle de gaz parfait.

La loi de distribution des vitesses, la théorie des capacités thermiques (théorème d'équipartition) et le théorème du viriel sont hors programme.

L'étude du gaz parfait servira à introduire le vocabulaire de la thermodynamique sans formalisme excessif : système homogène, pression, température, variable extensive, variable intensive, équation d'état, fonction d'état.

On affirmera l'équation d'état et l'expression de U pour un gaz réel dans le modèle de Van der Waals et on dégagera la signification physique des termes correctifs. La connaissance de formules correspondantes n'est pas exigible.

On indiquera ce qui est particulier au gaz parfait monoatomique et ce qui est généralisable au gaz parfait non monoatomique et aux fluides.

4. Bilans d'énergie.

Travail des forces de pression.

Premier principe, énergie interne, transfert thermique.

Enthalpie.

On fera remarquer que le travail des forces de pression est calculable dès que l'expression de la pression extérieure p_e ou de la pression du fluide p en fonction du volume V est connue. En travaux dirigés, on traitera quelques cas classiques pour un gaz parfait sans que les résultats doivent être mémorisés.

Pour des raisons pédagogiques, on veillera à privilégier l'expression de transfert thermique au détriment de celle, courante mais ambiguë, de chaleur.

On calculera les transferts thermiques pour des évolutions non adiabatiques en utilisant le premier principe.

On traitera la détente de Joule - Gay-Lussac.

On introduira l'enthalpie sur l'exemple de la détente de Joule - Thomson. On insistera sur l'intérêt de ces détentes pour l'étude des fluides réels. En liaison avec le cours de chimie, on montrera l'intérêt de l'enthalpie pour le calcul des transferts thermiques au cours des évolutions isobares.

5. Bilans d'entropie.

Deuxième principe. Évolutions réversibles et irréversibles.
Entropie : entropie créée, entropie échangée.

Dans le cadre de la thermodynamique des fluides, la fonction d'état d'équilibre $S(U, V)$ sera présentée comme fonction caractéristique.

Figure 50 Extrait du programme de thermodynamique de CPGE à compter de 1995⁷⁸³

En 2003, un aménagement des programmes est proposé. Il fait suite aux réformes du lycée du début des années 2000. L'objectif de cette modification est clairement exposé :

« Les pratiques d'évaluation doivent être cohérentes avec l'esprit même du programme. Il va de soi que les spécificités de la filière PC doivent se retrouver dans les modalités d'évaluation et de contrôle des connaissances. Celles-ci doivent respecter l'esprit des objectifs : tester l'aptitude de l'étudiant moins à résoudre les équations qu'à les poser, puis à analyser les résultats, tant dans leur caractère théorique que pratique. »

⁷⁸³ Extraits du BOEN hors-série n° 4 du 27 Juillet 1995 (Union des Professeurs de Spéciales, 1995 PCSI) p.4

Le programme a été rédigé et abondamment commenté de façon à limiter toute dérive inflationniste. Afin de revaloriser les contenus au détriment des calculs, il est souhaitable de diversifier les modes d'évaluation : questions qualitatives, questions synthétiques, questions de culture, ordres de grandeurs, discussion d'ordre expérimental... »⁷⁸⁴

Mais, la réforme ne modifie que peu le programme de thermodynamique. Hormis une réorganisation entre la première et la seconde année (diffusion thermique et diffusion de particules), seuls les diagrammes (température, entropie) et l'étude des écoulements en thermodynamique disparaissent de manière significative.

b. Le concept de chaleur en classes préparatoires

Un point majeur du programme de 1995 en PCSI est l'abandon du mot chaleur dans les documents officiels au profit du mot « *transfert thermique* ». Aussi, la modification opérée en 2001 en classe de première scientifique est postérieure à celle des classes préparatoires (sept années d'écart entre les deux consignes !). La justification dans les programmes est assez sommaire : « *Pour des raisons pédagogiques, on veillera à privilégier l'expression de transfert thermique au détriment de celle, courante mais ambiguë, de chaleur.* »⁷⁸⁵

Comme pour le secondaire, une étude de l'impact de ce changement de dénomination devra être faite. C'est un des objectifs du Chapitre 8 ; d'autant que le mot *chaleur* ne disparaît pas totalement en classes préparatoires. Tout d'abord, il est encore présent dans les programmes de certaines filières de CPGE scientifiques, à l'instar de la voie BCPST où le terme « *transfert thermique* » n'apparaît pas dans les consignes officielles. En effet, le mot chaleur reste présent dans le vocabulaire de la thermodynamique comme le stipulent les commentaires de la partie « bilan énergétique » : « *On montrera l'équivalence chaleur/travail.* »⁷⁸⁶

En outre, lors des rénovations des programmes de 2003-2004 le mot chaleur réapparaît dans les contenus exigibles. En effet, on le retrouve dans le programme physique de PCSI dans lequel on peut lire : « *Transferts : transfert thermique (ou chaleur), travail.* »⁷⁸⁷

Egalement, dans le programme de chimie de 1^{ère} année PCSI, on peut trouver : « *Quantité de chaleur mise en jeu lors d'une évolution isochore ou isobare* »⁷⁸⁸, alors qu'il est demandé de traiter la partie thermodynamique chimique « *en relation avec le programme de*

⁷⁸⁴ Commentaires des programmes, citation extraite de (Union des Professeurs de Spéciales, 1995)

⁷⁸⁵ Extraits du BOEN hors-série n° 4 du 27 Juillet 1995 (Union des Professeurs de Spéciales, 1995 PCSI) p.4

⁷⁸⁶ Extraits du Bulletin Officiel de l'Education Nationale hors-série n° 4 du 27 Juillet 1995 (Union des professeurs de Spéciales, 1995 BCPST) p.2

⁷⁸⁷ (Union des Professeurs de spéciales, 2003 PCSI) p.13

⁷⁸⁸ (Union des professeurs de Spéciales, 2003 PCSI (chimie)) p.16

thermodynamique physique »⁷⁸⁹. Un commentaire du programme rajoute d'autant à la confusion en soulignant : « *On signale brièvement que les quantités de chaleur libérées donnent lieu à des transferts thermiques.* »⁷⁹⁰

Enfin, comparativement à ce qui est pratiqué dans le secondaire : le transfert thermique inclut le rayonnement comme mode de transfert thermique : « *Présentation et phénoménologie des modes de transfert thermique d'énergie : conduction, convection et rayonnement.* »⁷⁹¹ L'explication que nous avons donnée précédemment (Cf. paragraphe II de ce chapitre 6) pour justifier la distinction entre transfert thermique et transfert par rayonnement semble donc mise à mal.

Aussi, l'introduction du mot « *transfert thermique* » ne semble pas non plus suivie de manière significative en classes préparatoires. En outre, les étudiants ont suivi au lycée jusqu'en 2001, un enseignement de la thermodynamique faisant appel au concept de chaleur et non pas de transfert thermique. Il va donc être nécessaire d'approfondir la discussion autour de cette notion à compter des années 90. C'est le travail que nous effectuerons dans le chapitre 8 de ce document.

IV. UN BILAN SUR LES ANNEES 90

1. Un bilan sur l'enseignement dans le secondaire

Les réformes des années 90 inspirées par les propositions de la commission Bergé montrent en quelque sorte, un retour aux humanités scientifiques du début du siècle. On le comprend à travers les conclusions émises par Bergé en 1989 : « [...] *le rôle culturel de la Physique dans la vie d'honnêtes hommes est à souligner : elle lui rend intelligible une bonne partie du monde qui l'entoure.* »⁷⁹²

Malgré cela, l'œuvre proposée par le groupe de travail de physique présidé par Boyer, n'est pas acceptée comme innovante par tous. Ainsi, rapporte-t-il dans une interview de 1996 : « *Voilà que quatre de nos plus éminents chercheurs, Pierre-Gilles de Gennes⁷⁹³, Jean-Marie Lehn⁷⁹⁴, Claude Allègre et Jean-Christophe Yoccoz⁷⁹⁵, tiennent des propos que n'aurait pas*

⁷⁸⁹ (Union des professeurs de Spéciales, 2003 PCSI (chimie)) p.16

⁷⁹⁰ (Union des professeurs de Spéciales, 2003 PCSI (chimie)) p.16

⁷⁹¹ (Union des Professeurs de Spéciales, 1996) p.6

⁷⁹² (Bergé, Octobre 1989) p.3

⁷⁹³ Pierre-Gilles de Gennes (1932-2007), prix Nobel en 1991

⁷⁹⁴ Jean-Marie Lehn (1939, 20...)

⁷⁹⁵ Jean-Christophe Yoccoz (1957,20...), médaille Fields en 1994

désavoués H. Bouasse⁷⁹⁶. Comme si rien ne s'était passé ! Acteur directement impliqué dans la rédaction des actuels programmes de physique, je suis abasourdi. »⁷⁹⁷ Certains enseignants reprochent notamment que les refontes des programmes, désormais orchestrées par le Conseil National des Programmes, ne soient pas guidées par des dispositions globales précises, comme on peut le lire dans un article du BUP de 2000 : « Il faudrait enfin et surtout que les grandes orientations de l'enseignement, et en particulier de l'enseignement scientifique, soient clairement définies préalablement à toute réforme de programmes. »⁷⁹⁸

a. Echec des réformes : quels sont les responsables ?

Cependant, les programmes ne sont probablement pas les seuls responsables de cette perpétuelle remise en cause à propos des mêmes doutes et des mêmes questionnements sur l'enseignement des sciences et en particulier de la physique. Or, ce sont toujours les programmes qui sont remodelés à chaque réforme. Selon Gérard Lemeignan et Annick Weil-Barais⁷⁹⁹ : « les changements de programme ne résolvent rien ! [...] Les critiques dont sont l'objet les sciences physiques provoquent de fréquents changements de programme. Mais quand on y regarde de près, la conception des programmes reste toujours la même : une liste de notions organisées autour des lois fondamentales »⁸⁰⁰. Alors, quelles sont les autres responsables de ces échecs consécutifs ?

Dans son entretien à *La Recherche* de 1996, Boyer propose une explication : « C'est une évidence, les programmes ne constituent qu'un aspect du « problème » de l'enseignement des sciences. Qu'en est-il de leur mise en pratique dans les classes ? »⁸⁰¹ Ce que sous-entend Boyer est une remise en cause de la formation des maîtres. Car, le changement des pratiques et des enseignements doit aussi et surtout passer par un changement des enseignants eux-mêmes : « Les physiciens s'amuse dans leur métier, pourquoi pas les élèves ? Hasardons une hypothèse : et si le problème récurrent de l'enseignement des sciences était intimement lié à la formation des professeurs ? Comment peut-on enseigner, avec l'enthousiasme communicatif nécessaire, des connaissances que l'on ne maîtrise pas ? On dit l'école coupée de la vie active et l'on semble s'en étonner. Mais la plupart des professeurs n'ont jamais quitté l'école et ils forment, entre autres, les futurs professeurs qui ne la quitteront jamais... Il fut un temps où les professeurs de physique devaient faire un stage en laboratoire. Celui-ci n'est plus obligatoire. Certes, quelques trop rares professeurs effectuent sur leur initiative des stages proposés par quelques universitaires tout aussi

⁷⁹⁶ En référence aux longues préfaces de Bouasse qui lui permettaient, sur un ton très polémique, de dénoncer les tares et manquements dans l'enseignement des sciences.

⁷⁹⁷ (Boyer, juin 1996) p.8

⁷⁹⁸ (Maurel, Juin 2000)p.1097

⁷⁹⁹ Lemeignan et Weil-Barais sont tous les deux rattachés au Laboratoire Interuniversitaire pour la Recherche en Education Scientifique et Technologique (LIREST).

⁸⁰⁰ (Lemeignan, et al., 1993) p.12

⁸⁰¹ (Boyer, juin 1996) p.8

rare. Certes, d'excellents formateurs s'investissent dans des journées de formation trop peu nombreuses. Mais les pesanteurs des usages et des habitudes font que le système éducatif, parents d'élèves compris, présente une inertie considérable. Aujourd'hui, le vrai débat sur l'enseignement, en particulier celui des sciences, se situe à ce niveau. Le rabâchage du discours sur les programmes manque la cible.»⁸⁰² Cette refondation de la formation des maîtres est d'autant plus nécessaire que les nouveaux programmes encouragent l'interdisciplinarité. Or, celle-ci se heurte à l'organisation des enseignements au sein des établissements : elle nécessite en effet une coordination entre les différents acteurs (enseignants de physique, de chimie, de mathématiques et de SVT), qui n'est pas forcément réalisée. Aussi, redondances et/ou incohérences sont nombreuses dans les programmes (comme nous l'avons souligné plus haut pour le langage sur la chaleur par exemple) et *a fortiori* dans l'application de ceux-ci.

Cette interdisciplinarité soulève une autre explication possible à ces échecs successifs : le problème du langage. Le rapport Bergé le suggère d'ailleurs dans son compte-rendu de 1989 : « ... évidemment le français est la matière interdisciplinaire par excellence. Mais à force d'être évidente, l'interdisciplinarité correspondante n'est pas toujours exploitée comme elle le devrait. Pourtant, l'échec scolaire –au collège en particulier – est bien souvent lié à une non-maîtrise du langage. La Physique, comme les autres sciences, est l'occasion d'exercer l'usage de la langue dans un cadre différent, et très complémentaire de celui de la littérature. Par exemple, une question de Physique étant résolue, il n'est pas toujours facile, mais très formateur, d'explicitement clairement méthodes et résultats, oralement d'abord, puis, exercice plus difficile encore, par écrit. D'autre part, lire et comprendre des textes scientifiques (ou d'histoire des sciences) diversifie salutairement le registre des lectures purement littéraires. Enfin, la comparaison des acceptions de certains mots de la langue courante avec celles, plus spécifiques, que ces mêmes mots acquièrent dans diverses disciplines est source d'enrichissement. »⁸⁰³ Or, nous venons de voir que le vocabulaire en thermodynamique joue un rôle crucial dans la compréhension des notions d'énergie, de chaleur *etc.* Les concepteurs des programmes de physique ont par ailleurs suggéré une modification de dénomination afin de faciliter les appropriations et éviter les confusions, d'autant que le langage courant influe sur le langage scientifique. Mais ces recommandations ne semblent pas réellement suivies dans les faits.

Enfin, pour les enseignants, l'échec de ses réformes successives est peut-être dû à une trop grande hétérogénéité des classes. Dans un article du BUP, de 2000, Josette Maurel, présidente de l'Union des Physiciens s'exprime ainsi :

« Chaque fois que l'occasion nous en a été donnée, nous avons insisté sur les difficultés vécues et rapportées par de nombreux collègues en classe de seconde : ce ne sont pas les contenus des enseignements qui posent le problème majeur mais l'hétérogénéité des classes. Ce sont les

⁸⁰² (Boyer, juin 1996) p.8

⁸⁰³ (Bergé, Octobre 1989) p.3

différences de motivation, de projet, de capacité de concentration et de travail des élèves d'une même classe qu'il est de plus en plus difficile à gérer. Les élèves de seconde trouvent pratiquement tous un intérêt aux séances de travaux pratiques. Des activités suffisamment diversifiées peuvent encore mobiliser un certain nombre d'entre eux en classe entière. Mais ce seront toujours les passages les plus conceptuels qui poseront problème. Il ne faut pas les faire disparaître pour autant : ils sont indispensables pour que certains élèves ayant du goût pour les sciences puissent faire un choix réfléchi d'orientation. »⁸⁰⁴

C'est donc une remise en cause de la massification de l'enseignement et de la détermination en classe de seconde qui est ainsi suggérée par les enseignants qui doivent appliquer les programmes. Tous les élèves de seconde n'ont pas les mêmes capacités et ne peuvent pas tous comprendre la physique et le formalisme qui lui est lié. En effet, la pratique expérimentale ne résout pas les difficultés conceptuelles de la physique elle-même. Déjà au début du siècle, Bouasse dénonçait le recours systématique à l'expérience alors que certains principes devaient être nécessairement posés avant tout développement pratique (Cf. chapitre 3).

b. La place des mathématiques dans l'enseignement secondaire

Les réformes des années 90 se démarquent des réformes précédentes par la place qu'elles donnent (ou qu'elles reprennent) aux mathématiques. En effet, celles-ci sont clairement désignées comme un frein à la fois à la démocratisation du système éducatif et au développement des études scientifiques. Comme le souligne Duverney dans son article de 2006, la baisse de la part des mathématiques dans la formation scientifique a été un des objectifs majeurs de la rénovation pédagogique des années 1988-1993, et de la réforme des lycées des années 1998-2002. Christian Forestier (1944-20..), directeur général des enseignements supérieurs, s'exprime en 1995 :

« La mise en place des enseignements de spécialité dans les classes terminales de la voie générale visait à reconnaître et donc à valoriser différents profils au sein de séries plus larges. La répartition observée cette année suscite quelques commentaires par rapport à cet objectif.

En série S [option] SVT, la répartition est de 38 % pour les mathématiques, 38 % pour les sciences de la vie et de la Terre et 24 % pour la physique-chimie. Cette répartition, si elle ne révèle pas, comme cela était craint, un quasi-monopole des mathématiques, ne laisse pas la place souhaitable aux sciences physiques. À travers l'option sciences expérimentales de première S, les professeurs de physique-chimie doivent montrer aux élèves tout le profit qu'ils pourront tirer de l'enseignement de spécialité. La nouvelle organisation des classes préparatoires scientifiques doit leur être également présentée pour leur faire comprendre la place nouvelle qu'y prennent les sciences physiques. »⁸⁰⁵

⁸⁰⁴ (Maurel, Juin 2000) p.1096

⁸⁰⁵ (BO, 4 mai 1995)

Aussi, on comprend que le développement de la filière physique-chimie, au détriment de la spécialité « mathématiques », a été volontairement organisé.

2. Un bilan sur l'enseignement supérieur

Après trois ans de baisse régulière, les effectifs des classes préparatoires ont connu pour l'année scolaire 1995-1996 une forte croissance, qui traduit manifestement un regain d'intérêt des étudiants pour ces classes à l'occasion de leur réforme en septembre 1995. Ainsi, en 1995-1996, les classes scientifiques - dont les structures et les programmes ont été profondément modifiés - accueillent 47 875 étudiants (+ 8 %). Les effectifs des premières années, principalement touchés par la réforme, progressent de près de 15 %. Mais cette augmentation n'est que de courte durée et les effectifs retombent à leur niveau du début des années 90, à l'aube des années 2000 (44 975 élèves). (Cf. Figure 55)

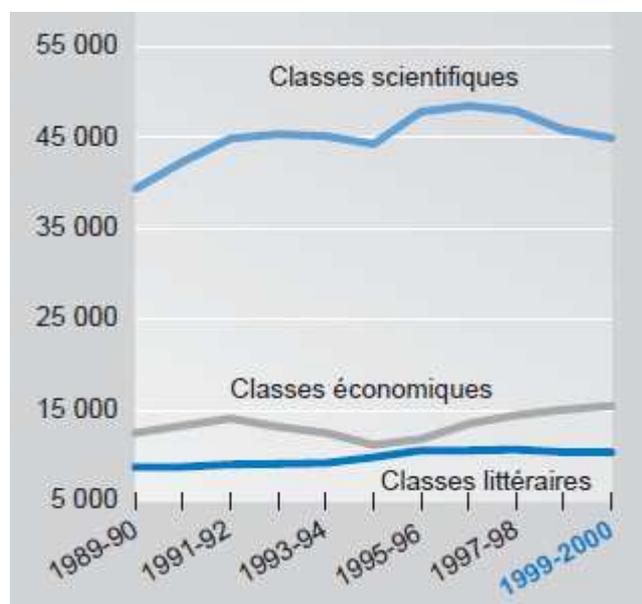


Figure 51 Evolution des effectifs en CPGE à la suite des réformes des années 90⁸⁰⁶

Cette évolution des classes préparatoires se situe dans un contexte de baisse des poursuites d'études dans l'enseignement supérieur amorcée en 1996 : les nouvelles inscriptions dans le premier cycle universitaire (hors IUT) ont baissé de 2,2 % à la rentrée 1999, le recul des inscriptions dans les filières scientifiques atteignant 5,5 %.

En revanche, même si la filière MPSI reste dominante, la voie PCSI est la seule à voir ses effectifs croître. A titre d'exemple en 1997, en première année, les effectifs diminuent dans toutes les spécialités, à l'exception des classes de PCSI qui gagnent 8,5 % et en seconde année les effectifs

⁸⁰⁶ Graphique issu de la note d'information du MEN de Juin 2000, extrait de (Baudelot, et al., décembre 2003) p.96

des classes de MP sont en baisse, ceux de PC sont stables et la filière PSI augmentent fortement (+ 9,3 %) ⁸⁰⁷.

Aussi la politique menée au cours des années 95 semble avoir deux conséquences immédiates. Premièrement, l'augmentation des effectifs en CPGE n'est pas pérenne et la réforme ne permet pas d'accroître le nombre de préparatoires (d'autant que les classes préparatoires ne sont plus la seule voie d'accès aux écoles d'ingénieurs) ⁸⁰⁸. Deuxièmement, le succès que rencontrent les filières scientifiques des lycées où le poids des mathématiques a diminué, encourage davantage les étudiants à suivre des voies plus expérimentales comme les filières physique chimie (PC) et sciences de l'ingénieur (PSI).

3. Un bilan sur les recherches à mener

La rénovation des programmes de 1995 en classes préparatoires engendre une modification du programme de thermodynamique. Le point significatif et qui a déjà fait l'objet de nombreuses discussions, est le cas de la notion de *chaleur*. En 1995, en CPGE, puis en 2001, pour les classes de première, la chaleur devient « *transfert thermique* ». Cette modification dans le vocabulaire scientifique à utiliser n'est pas une première en sciences physiques. A titre d'exemple, un autre problème de langage avait été souligné dans les programmes de 1957. En effet, il avait été suggéré de remplacer le mot *poids* par le mot *masse* :

« *Il sera possible alors d'utiliser dès le départ un langage correct ; les expressions « masse atomique masse volumique, ... » remplaçant désormais celles de « poids atomique, poids volumique, ... ».* » ⁸⁰⁹

Pourtant, pour ce qui est de la chaleur, nous avons vu que les ouvrages du secondaire n'adoptent pas un vocabulaire identique malgré les consignes des programmes. En outre, d'une discipline à une autre le mot chaleur réapparaît, alors que les connaissances interdisciplinaires et transdisciplinaires sont privilégiées dans la réforme.

Pour ce qui est du supérieur, le nombre d'ouvrages parus dans cette décennie est relativement conséquent et les manuels sont souvent comme pour le secondaire, le fruit de collaborations entre plusieurs auteurs. Aussi, nous nous sommes uniquement intéressés pour le moment qu'aux contenus explicites des programmes et de leurs commentaires. Là encore, nous

⁸⁰⁷ note d'information du MEN de Juin 1998, extrait de (Baudelot, et al., décembre 2003) p.108

⁸⁰⁸ Par exemple, certaines écoles d'ingénieurs comportent des cycles préparatoires intégrés auxquels les élèves accèdent directement après le baccalauréat (5 900 élèves à la rentrée 1999). Les bacheliers qui intègrent ces formations présentent des profils très proches de ceux des élèves admis dans les classes préparatoires scientifiques des lycées. Mais ils sont moins souvent titulaires d'un bac S avec la spécialité « mathématiques ». (Baudelot, et al., décembre 2003) p.136

⁸⁰⁹ (BUP, 1957) p.497

avons pu souligner une incohérence entre les filières et entre les matières. Il est donc nécessaire de réaliser une étude approfondie du concept de chaleur pour la période allant des années 1990 à la première décennie des années 2000. L'étude que nous allons réaliser (Cf. chapitre 8) va porter sur plusieurs points. Premièrement, la mise en évidence de la difficulté d'appréciation du concept malgré les précautions prises par les rédacteurs des programmes. Deuxièmement, un classement des définitions du concept de chaleur dans les ouvrages à destination du supérieur. Puis, une analyse de sujets de concours et de rapports de jury. Et enfin, nous nous intéresserons à l'impact de la réforme sur la compréhension des élèves et étudiants.

Mais avant cela, il est nécessaire de réaliser une analyse similaire sur la notion de système car, comme le justifient clairement Lemeignan et Weil-Barais « *sans les concepts de **système**, d'**état**, de **variation d'état** de système ainsi que de **transfert** entre systèmes, il est tout à fait illusoire de pouvoir effectuer une distinction claire entre chaleur et température, tout comme d'ailleurs entre énergie et [chaleur].* »⁸¹⁰ Aussi dans le chapitre 7, nous allons poursuivre les discussions que nous avons pu avoir sur cette idée de *système thermodynamique*.

Enfin, le dernier point de cette quatrième partie consistera à analyser la notion d'*entropie* et l'introduction du *deuxième principe*. En effet, la réforme de 1995 fait de la thermodynamique une science des bilans : bilan énergétique et bilan entropique. Elle met donc en avant l'énoncé du deuxième principe proposé par Prigogine (Cf. Chapitre 4). Par une analyse des significations données à l'entropie, nous allons tenter de mettre en évidence l'intérêt des énoncés historiques dans l'appropriation du concept d'entropie. Pour cela, nous appuierons notre travail sur des travaux déjà publiés montrant les difficultés liées à l'entropie et à son introduction dans l'enseignement.

⁸¹⁰ (Lemeignan, et al., 1993) p.14

PARTIE IV

ETUDE DE L'ENSEIGNEMENT DES CONCEPTS DE SYSTEME, DE CHALEUR ET D'ENTROPIE APRES LES REFORMES DES ANNEES 90

CHAPITRE 7

LE CONCEPT DE *SYSTEME* EN THERMODYNAMIQUE A COMPTER DES ANNEES 1990⁸¹¹

I. LA NOTION DE *SYSTEME* THERMODYNAMIQUE DANS LES PROGRAMMES

1. Nécessité du concept de système en thermodynamique

Selon Lemeignan et Weil-Barais : « *Quand on parle de système on évoque généralement un assemblage d'objets matériels et/ou symboliques (c'est en ce sens qu'on parle de système*

⁸¹¹ Le travail qui suit a fait l'objet de plusieurs communications. Premièrement, durant la journée d'étude en Histoire des Sciences, « *Sur la définition du système en thermodynamique classique, depuis la fin du 19ème siècle* » (Lille, 20 décembre 2013). Deuxièmement, lors de la conférence européenne d'histoire des sciences, intitulée *Spaces and modes of communication : popularization scientific concepts within history of science, education and society : "The problem of defining a classical thermodynamic system"*. (Lisbonne 4-6 septembre 2014). Enfin, dans le cadre d'un enseignement de thermodynamique rencontre avec des étudiants de S5 "*Comment définir un système pour résoudre un problème en thermodynamique?*". (Lille, 2 décembre 2015)

d'équations). En sciences physiques, quand on parle de système, il y a également l'idée d'ensemble d'objets.»⁸¹². Or, la première fois où l'on rencontre la notion de système dans les enseignements de physique est sans doute la mécanique. Le système est désigné la plupart du temps, comme l'objet d'étude, possédant une masse et ramené parfois à un point dans des cas simples. Ce corps ou cet objet est donc un système physique dont on étudie le mouvement par rapport à un référentiel d'étude, sous l'action de forces extérieures agissant sur lui et engendrant ou non un mouvement.

Mais toujours selon Lemeignan et Weil-Barais « pour qu'un système soit constitué, il faut que le physicien puisse en donner une description suffisante pour répondre à la question qu'il se pose. Autrement dit, un système est défini par un ensemble d'objets et par un jeu de grandeurs physiques qui le décrivent ; chaque état est défini par un ensemble de valeurs de ces grandeurs. Le système est donc une construction intellectuelle de la part du physicien. Celui-ci a toute liberté quant aux regroupements d'objets qu'il peut faire. »⁸¹³ La désignation d'un système en mécanique paraît alors assez immédiate dans la mesure où l'on cherche à déterminer les grandeurs de position et la vitesse déterminant l'état du système.

Qu'en est-il de cette notion en thermodynamique ? Est-ce que le système désigne la même notion en mécanique et en thermodynamique ? Certains auteurs en sont convaincus, comme on peut le lire par exemple dans l'ouvrage *Thermodynamique* de niveau licence de Brochard de 1963 : « En Thermodynamique, comme en Mécanique, on désigne sous le nom de système un ensemble de corps étudié en tenant, éventuellement, compte des actions exercées par le milieu extérieur. »⁸¹⁴

En thermodynamique pourtant, il semble moins évident de se représenter ne serait-ce que par la pensée un système comme 'objet d'étude'. En effet, si l'on souhaite étudier un gaz se trouvant dans un récipient, l'esprit a davantage de difficultés à le visualiser que de concevoir un pavé de masse m posé sur un plan incliné, dont on ferait une étude mécanique. On peut lire comme par exemple dans le cours de thermodynamique des Mines d'Albi de Jacques Schwartzenrube, que « l'air présent dans la pièce où vous travaillez est un système »⁸¹⁵ mais que « les molécules d'azote qui font partie de l'air qui vous entoure ne forment pas un système : il n'existe pas de frontière macroscopique (visible à l'œil nu) qui les délimite. »⁸¹⁶

⁸¹² (Lemeignan, et al., 1993) p.56

⁸¹³ (Lemeignan, et al., 1993) p.56

⁸¹⁴ (Brochard, 1963) p.4

⁸¹⁵ (Schwartzenrube, 2007)

⁸¹⁶ (Schwartzenrube, 2007)

Ainsi, le concept de système en thermodynamique a ceci de complexe : la représentation que l'esprit donne à cet 'objet' d'étude. Il va de soi que la transcription littérale de ce concept qui paraît déjà abstrait pour l'esprit, est donc une difficulté importante.

Mais, choisir un système c'est aussi définir l'état du système. En thermodynamique cela revient à déterminer des grandeurs « mesurables » ou « repérables » comme la pression, le volume ou la température. Cet état caractérise le système mais permet aussi de déterminer son évolution. Aussi, comme le suggèrent Faroux et *al.* dans leur ouvrage de 2002 : « *Un système "thermodynamique" diffère d'un système "mécanique" ; un système mécanique peut être entièrement décrit, après modélisation, par le choix d'un certain jeu de paramètres "géométriques" de position, d'orientation des divers éléments constituant le système. Un système thermodynamique est plus riche en ce sens qu'une telle géométrisation est insuffisante pour en décrire les propriétés. Nous verrons que sa description nécessite l'introduction de deux grandeurs fondamentales, spécifiques, la température et l'entropie.* »⁸¹⁷

Un exemple qui illustre l'importance du choix du système en thermodynamique, est le suivant : on considère une enceinte de volume $2V_0$ entièrement calorifugée, séparée en son milieu par une paroi mobile et elle aussi calorifugée. Chaque volume ainsi formé contient n mole de gaz parfait (de rapport de capacité thermique $\gamma = c_p/c_v$) dans les conditions P_0, T_0, V_0 . Le récipient de gauche contient également une résistance R (de volume négligeable) alimentée par un générateur d'intensité I . On chauffe très lentement le gaz de gauche en alimentant pendant un temps Δt la résistance⁸¹⁸. (Cf. Figure 52)

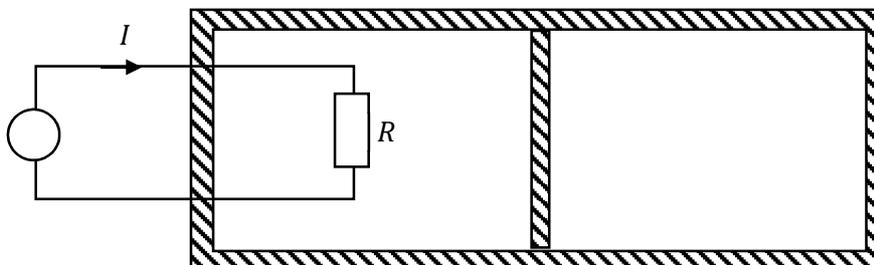


Figure 52 Représentation du dispositif à deux enceintes calorifugées

L'objectif du problème est de déterminer les conditions finales du réservoir droit (P_d, T_d, V_d) et du réservoir gauche (P_g, T_g, V_g) lorsque le piston s'immobilise. Pour déterminer ces grandeurs il est nécessaire de faire appel à la loi des gaz parfait $PV = nRT$ (ou tout autre équation d'état à laquelle obéit le gaz considéré) mais également une relation entre les paramètres d'état liée à la

⁸¹⁷ (Faroux, et al., 2002) p.2

⁸¹⁸ Exercice extrait de (Gréacias, et al., 1999) p.684

nature de la transformation ; ici la loi de Laplace reliant la pression et le volume d'un gaz parfait en évolution quasistatique⁸¹⁹ et adiabatique⁸²⁰ : $PV^\gamma = \text{Constante}$.

Si on choisit comme système le gaz parfait dans le compartiment droit, les lois de Laplace peuvent s'appliquer, on obtient alors que : $P_d V_d^\gamma = P_0 V_0^\gamma$.

Si on cherche maintenant, à appliquer les lois de Laplace au compartiment gauche contenant le gaz parfait, on réalise que l'évolution n'est plus adiabatique, car la résistance fournit de l'énergie par transfert thermique au gaz, ainsi : $P_g V_g^\gamma \neq P_0 V_0^\gamma$.⁸²¹

En outre, si on choisit comme système gauche {gaz parfait, résistance}, il est encore une fois impossible d'appliquer la relation de Laplace car le système ainsi défini n'est pas constitué exclusivement du gaz parfait⁸²².

A travers cet exemple, on réalise que choisir un système est fortement lié aux conditions d'évolution de l'expérience et à la question posée. Il paraît donc important de chercher à comprendre ce que peut représenter la notion de système et les conséquences du choix de celui-ci pour résoudre un problème de thermodynamique.

Or, si on regarde le questionnaire relatif à cet exercice, on constate que le système d'étude n'est pas clairement proposé dans l'énoncé. (Cf. Figure 53)

a) Déterminer les paramètres d'état à gauche (g) et à droite (d) : V_g, T_g, P_d, T_d, V_d , dans l'ordre de votre choix. Donnée : γ .

b) Faire un bilan d'énergie pour chaque compartiment (et pour le système global) : $W_g, Q_g, \Delta U_g$ et $W_d, Q_d, \Delta U_d$. En déduire l'énergie thermique Q fournie par la résistance.

$$4. \text{ a) } T_d = 5^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} T_0 \text{ et } T_g = T_0 \left(10 - 5^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right); \quad \text{b) } Q = 8 \frac{R}{\gamma-1} T_0.$$

Figure 53 Extrait de l'exercice et de la correction ^{823,824}

⁸¹⁹ L'évolution quasistatique est définie ici comme une évolution infiniment lente permettant au système d'évoluer tout en étant à chaque instant en équilibre avec les contraintes extérieures. (Cf. chapitres 5 et 9)

⁸²⁰ L'évolution adiabatique est définie ici comme une évolution qui se déroule sans échange d'énergie par chaleur, c'est le cas notamment quand les parois du récipient sont calorifugées.

⁸²¹ Si on ne prend pas garde au caractère non adiabatique de la transformation et que l'on souhaite quand même appliquer la loi de Laplace on arrive au résultat suivant $V_g = V_d$. En effet, il est évident qu'à l'équilibre $P_g = P_d$ afin de réaliser l'équilibre mécanique du piston mobile. Mais si $V_g = V_d$ alors le piston n'a pas bougé : il n'y a pas eu d'évolution et donc la résistance n'a fourni aucune énergie au gaz !

⁸²² Dans cet exemple, on considère que la paroi n'intervient que par le caractère calorifugé et non comme un objet physique réel.

⁸²³ (Grécias, et al., 1999) p. 684 et p. 687

⁸²⁴ Même si ce n'est pas l'objet de la discussion dans ce chapitre, on peut signaler l'appellation maladroite et incorrecte d'énergie thermique pour désigner Q dans cet exercice.

Les auteurs parlent des paramètres d'état « à gauche et à droite » sans préciser si la résistance est associée à l'un de ces "systèmes". Ils proposent enfin de « faire un bilan d'énergie pour chaque compartiment (et pour le système global) ». Aussi doit-on sous-entendre que le système global est le gaz contenu dans le compartiment de droite et celui dans le compartiment de gauche ? La résolution du problème étant peu détaillée (Cf. Figure 53), on ne peut savoir ce qui est attendu. Or, comme nous l'avons montré plus haut, le choix des lois à utiliser est fonction du système.

Ce constat est couramment fait dans les exercices de thermodynamique. Le système n'est pas précisé ou est sous-entendu. Malheureusement, ces imprécisions engendrent régulièrement des difficultés dans l'appropriation et dans la restitution des concepts par l'étudiant mais aussi dans la transmission du savoir par l'enseignant.

2. Le système en classes préparatoires aux grandes écoles

L'exemple précédent montre l'importance du choix du système pour la résolution des problèmes en thermodynamique. Cet exemple fait écho à une phrase que l'on retrouve presque régulièrement dans les ouvrages, soulignant l'intérêt et la difficulté de choisir un système dans les problèmes de thermodynamique : « Il est important de définir de manière très précise le système étudié. »⁸²⁵

Cette définition semble primordiale *a priori* dans la résolution de problèmes thermodynamiques. Il est donc légitime de s'attendre à avoir une définition précise du concept de système dans les programmes.

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, à travers la lecture des programmes, le mot *système* apparaît notamment en mécanique à travers l'étude des systèmes matériels. En revanche le concept de système en thermodynamique dans les sections de CPGE reste absent jusqu'à la réforme de 1968 (Cf. chapitre 4). Aussi, dans le programme des classes préparatoires C1 (actuelles BCPST), il apparaît dans la partie *Chaleur-thermodynamique* :

« Concepts fondamentaux : notion d'état d'un système »⁸²⁶

Cette première référence à la notion de système, en préambule à toute observation thermodynamique, montre que le système est le point de départ à toute étude. Néanmoins, le programme ne fournit nulle part de définition du système. Il ne propose qu'une description de celui-ci à travers son état. Le programme souligne également que l'état de ce système est décrit par des « caractères macroscopique et statistique »⁸²⁷ le distinguant *a fortiori* du système

⁸²⁵ (Briffaut, et al., 1995) p.102

⁸²⁶ Publié au BO du 29 février 1968, citation extraite du (BUP, avril 1968) p.897

⁸²⁷ Publié au BO du 29 février 1968, citation extraite du (BUP, avril 1968) p.897

mécanique détaillé dans le programme : « *Représentation des systèmes matériels ; Notion de point matériel* »⁸²⁸, ne faisant en aucun cas appel à une description statistique.

En 1987, le concept de système prend comme nous l'avons vu au chapitre 5 une place beaucoup plus importante.

Avec la réforme de 1995, l'introduction du concept de système en thermodynamique est à nouveau bouleversé. Alors que le programme de 1987 encourageait à multiplier le nombre d'exemples pour introduire le concept de systèmes thermodynamiques⁸²⁹, c'est désormais le gaz parfait qui sera l'exemple de référence: « *L'étude du gaz parfait servira à introduire le vocabulaire de la thermodynamique sans formalisme excessif : système homogène, pression, température, variable extensive, variable intensive, équation d'état, fonction d'état* »⁸³⁰. Néanmoins, le programme ainsi élaboré propose toujours d'introduire la « *notion de système. Etats d'un système* »⁸³¹. En outre, il y est introduit les adjectifs « *ouverts et fermés* » absents du précédent programme et qui avaient fait l'objet d'une discussion de notre part (Cf. chapitre 5). Cette présentation restera valable jusqu'à la réforme de 2014.

3. Le système dans le secondaire

a. Le système dans les programmes du secondaire

Le mot système apparaît également distinctement dans les programmes du secondaire, comme celui de première D de 1979 : « *exemples de non-conservation de l'énergie mécanique totale d'un système* »⁸³², ou encore dans le programme de première S de 1994 : « *analyse des échanges énergétiques concernant un système donné* »⁸³³. Si, encore une fois, aucune définition n'est clairement exprimée dans les programmes, on peut lire dans le livret d'accompagnement en classe de première S de l'académie de Lille de 1994 (Cf. Figure 54) :

« *Savoirs faire théoriques. Définir et identifier : un système, un système isolé ou non ;...* »⁸³⁴

Ainsi, définir un système et le qualifier est un préambule nécessaire à tout bilan énergétique. Si le concept de système n'est pas détaillé dans le programme, il est suggéré à l'enseignant d'évaluer l'acquisition de cette notion par l'élève, notamment à travers les représentations schématiques des diagrammes énergétiques comme nous l'avons souligné au Chapitre 6.

⁸²⁸ Publié au BO du 29 février 1968, citation extraite du (BUP, avril 1968) p.903

⁸²⁹ « *On utilisera des exemples de systèmes les plus variés possibles* » (Ministère de l'éducation nationale, 1989) p.38

⁸³⁰ (Union des Professeurs de Spéciales, 1995 PCSI) p.4

⁸³¹ (Union des Professeurs de Spéciales, 1995 PCSI) p.4

⁸³² (BUP, avril 1979) p.973

⁸³³ (BO, 20 février 1992)

⁸³⁴ (Groupe Réussite au Lycée, 1994)

Référentiel de Première S Conservation de l'énergie (horaire prévu : 4 h classe entière, 1 T.P.) 1/1					
PROGRAMME	CONNAISSANCES DES CLASSES ANTERIEURES	CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES	SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX	SAVOIR-FAIRE THEORIQUES	PISTES D'ACTIVITES
2.1 Analyse des échanges énergétiques concernant un système donné. Introduction au principe général de conservation de l'énergie.		Notion d'énergie Sources d'énergie : Soleil fossile hydraulique nucléaire.		Définir et identifier : un système ; un système isolé ou non ; un système en équilibre ou non ; un système à énergie constante ou non.	Recherche et étude de documents (EDF,...)
2.2 Différentes formes d'énergie : énergie cinétique et énergie potentielle. Aspects macroscopique et microscopique.		Energie cinétique : Aspect macroscopique ; aspect microscopique. Energie potentielle de position. Energie nucléaire. Energie chimique.		Savoir identifier les différentes énergies.	
2.3 Transferts d'énergie : travail, conduction de la chaleur, convection, rayonnement				Reconnaitre les différents modes de transfert d'énergie : chaleur, travail, rayonnement et par convection.	Etude d'exemples usuels : automobile, avion, appareil domestique, être vivant, centrales thermique et nucléaire, centrale hydraulique
2.4 Analyse d'une ou deux chaînes énergétiques.					

Figure 54 Référentiel en classe de 1ère S (sciences Physiques) Année scolaire 1994-1995

En 2001, le programme de première S fait référence au système dans la partie « travail mécanique et énergie ». On peut ainsi lire « à tout système dans un état donné, on peut associer une grandeur appelée « énergie ». L'énergie d'un système isolé est constante »⁸³⁵. Cette référence au système est développée dans le document d'accompagnement en première S de 2001 :

« [...] la recherche des différentes contributions à l'énergie d'un système n'est pas toujours simple. De plus, et c'est peut-être le cas ici la difficulté essentielle de cette approche, dans les situations les plus simples par lesquelles on aborde le sujet, les systèmes considérés ne sont pas isolés. Pour appliquer la conservation de l'énergie sous cette forme, il faut donc identifier les systèmes avec lesquels le système choisi initialement interagit, puis considérer un système plus général qui les contient tous et qui pourra être considéré comme isolé. Cette gymnastique est difficile pour un élève, et il n'est du reste pas indispensable de s'y livrer [...] en mettant l'accent sur le transfert d'énergie, le programme fait l'économie de la recherche d'un système isolé. »⁸³⁶

Cette proposition soulève deux remarques :

1. La première consiste encore une fois à souligner le fait que le système est un concept clairement utilisé dans les programmes mais qu'aucune proposition n'est faite pour le définir. Pourtant, comme le souligne le document, le choix du système est nécessaire pour réaliser des bilans énergétiques.

⁸³⁵ (BO, 31 août 2000) p.189

⁸³⁶ (Ministère de l'Education nationale, Physique 2001) p. 32

2. Deuxièmement, la proposition suggère que la contribution de plusieurs sous-systèmes peut former également un système. Si on réunit un ensemble de systèmes qui interagissent entre eux, alors l'ensemble est considéré comme isolé. Mais, les auteurs affirment que la recherche de ces systèmes isolés est une difficulté importante pour l'élève. Aussi, le premier principe de la thermodynamique présenté sous la forme de la conservation de l'énergie, sera préférentiellement remplacé par son application à des systèmes réalisant des transferts d'énergie. Un système interagit avec un autre système au travers des transferts énergétiques. Le choix du système est donc un aspect fondamental pour l'application d'un principe. Pour illustrer cette proposition, le document s'accompagne d'une représentation schématique. (Cf. Figure 55)

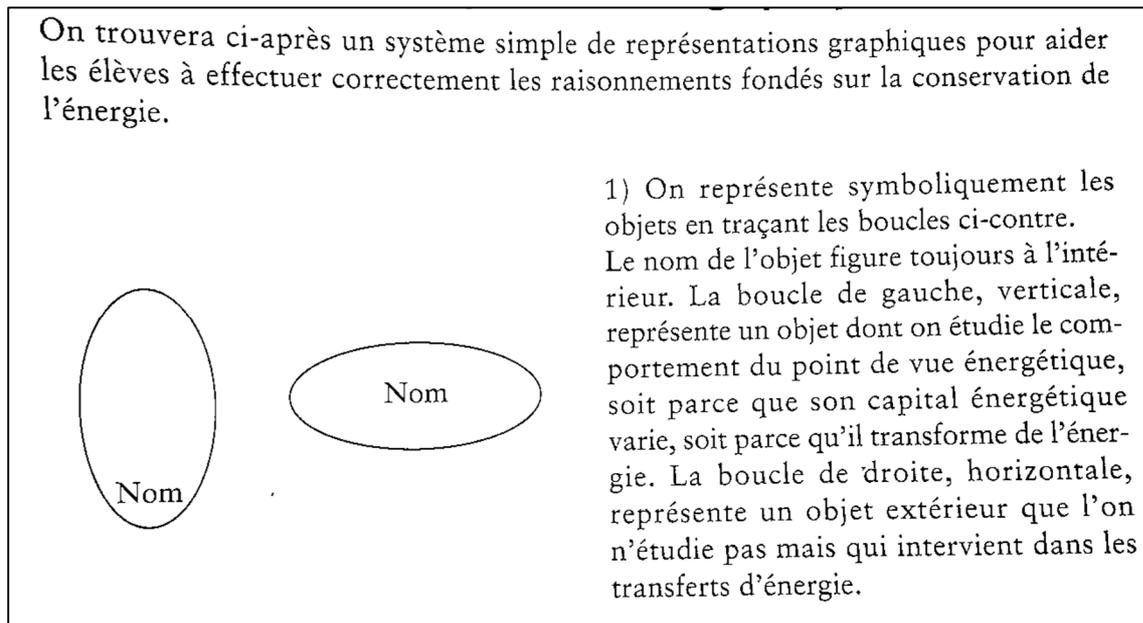


Figure 55 Représentation schématique du système Accompagnement des programmes Physique, classe de première S⁸³⁷

Le système d'étude (représenté à la verticale sur le schéma) se distingue du milieu extérieur (représenté à l'horizontale sur le schéma) ; les transferts d'énergie se faisant à l'interface de l'objet ainsi défini. Aussi, cette consigne officielle va à l'encontre de ce qu'estime Roulet comme nous l'avons vu au chapitre 5, pour qui il est nécessaire dans l'apprentissage de la thermodynamique, de multiplier les résolutions d'un même exercice en faisant choisir à l'élève différents systèmes.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, cette représentation était déjà présente à travers les schémas des chaînes énergétiques et encouragée dans le document d'accompagnement en première S de l'académie de Lille de 1994 : « *savoir-faire théoriques : traduire sous la forme d'un schéma les variations d'énergie et les transferts d'énergie opérés.* »⁸³⁸ Le système est donc

⁸³⁷ (Ministère de l'Education nationale, Physique 2001) p. 33

⁸³⁸ (Groupe Réussite au Lycée, 1994)

au cœur de cette représentation. Pourtant, si le système est désigné et représenté comme un convertisseur d'énergie effectuant des transferts avec d'autres systèmes, il n'est en aucun cas clairement dit quel est le contenu de cet « objet d'étude ». Voyons comment cette notion est abordée dans les manuels scolaires.

b. Le système dans les manuels et articles destinés au secondaire

Il ne s'agit pas ici d'être exhaustif dans l'étude des manuels scolaires, mais il s'agit de montrer ce que l'on peut trouver dans des références à destination du secondaire, sur la notion de système. Au-delà des représentations sur les chaînes énergétiques, des manuels d'exercices destinés au secondaire permettent aux élèves de s'autoévaluer en fonction des instructions officielles. Comme le présentent Talbourdel et *al.*, auteurs d'un de ces ouvrages : « *ce livre n'est ni un manuel de cours, ni un simple recueil d'exercices corrigés. [...] Son principal objectif est l'acquisition de méthodes de travail.* »⁸³⁹

Ainsi dans la partie « *échanges de chaleur* », on trouve un « point méthode » stipulant que la première étape de réflexion est de « *définir le système* ».

Point Méthode	
<p>1 – Définir le système.</p> <p>2 – La partie du système dont la température est inférieure à la température d'équilibre (« corps froids ») reçoit de la chaleur : cette quantité est positive. La partie du système dont la température est supérieure à la température d'équilibre (« corps chauds ») cède de la chaleur : cette quantité est négative.</p> <p>3 – Appliquer la définition de la quantité de chaleur : $Q = m.C. (T_f - T_i)$. Ne pas oublier son signe.</p>	<p>4 – La somme algébrique des quantités de chaleur échangées est nulle pour un système adiabatique : $\sum Q = 0$</p> <p>Ou : la quantité de chaleur gagnée par les corps froids est égale à l'opposé de la quantité de chaleur cédée par les corps chauds.</p> <p>5 – Quand il y a un changement d'état (fusion, solidification,...), penser à la chaleur latente de transformation. Faire attention à son signe !</p>

Figure 56 Point méthode, Manuel Première S⁸⁴⁰

A la lecture des points méthodes suivants, on découvre que le choix du système du point 1- est en fait un faux choix. En effet, au point 2- on lit : « *la partie du système dont la température est inférieure à la température d'équilibre [...] la partie du système dont la température est supérieure à la température d'équilibre...* »⁸⁴¹ Il apparaît donc clairement que le

⁸³⁹ (Talbourdel, et al., 1990) p.3

⁸⁴⁰ (Talbourdel, et al., 1990) p.130

⁸⁴¹ (Talbourdel, et al., 1990) p.130

choix du système est ici un système isolé composé des deux corps qui interagissent uniquement entre eux, ce qui est confirmé par le point 4- *la somme algébrique des quantités de chaleur échangées est nulle pour un système adiabatique* $\sum Q = 0$. Cet exemple fait naturellement écho à la remarque de Roulet en 1981, que nous avons souligné dans le chapitre 5, sur le fait que les manuels n'insistent pas ou peu sur la possibilité de choisir plusieurs systèmes différents pour résoudre un problème de thermodynamique. Il va également à l'encontre de la recommandation du programme qui suggère de définir un système non isolé afin de pouvoir prendre en compte les grandeurs de transfert. Néanmoins, dans le cas de la calorimétrie, n'est-il pas plus simple pour la résolution du problème de choisir un système global isolé du milieu extérieur ?

Talbourdel et al. proposent d'illustrer leur méthode sur un exercice de calorimétrie⁸⁴².

Exercice 19

1 – Un calorimètre contient 200 g d'eau à la température de 20 °C. On y ajoute 150 g de cuivre à la température de 250 °C. Quelle est la température de l'eau à l'équilibre ? On donne les chaleurs massiques de l'eau et du cuivre : A_1, A_2, B_2

$$C_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$C_{\text{Cu}} = 384 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

On considère le calorimètre idéal dans ce calcul.

2 – On réalise l'expérience et on s'aperçoit que la température d'équilibre est 33 °C. En déduire la capacité calorifique du calorimètre. A_1, A_2, B_2 et C_1

Figure 57 Exercice de calorimétrie, Manuel 1ère S⁸⁴³

La résolution de l'exercice proposé suit naturellement la méthode illustrée précédemment.

Rédaction exercice 19

1 – Le système est délimité par l'enceinte adiabatique.

L'eau est la partie du système qui gagne de la chaleur ; exprimons la chaleur gagnée par l'eau. Appelons T_f la température d'équilibre.

$Q_1 = m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} (T_f - T_1)$ avec T_1 : température initiale de l'eau.

Cette quantité est positive.

Le cuivre est la partie du système qui perd de la chaleur

La température d'équilibre est 35 °C

2 – Les parties du système qui gagnent de la chaleur sont l'eau et le calorimètre puisque celui-ci n'est pas idéal. Exprimons cette quantité

$$Q'_1 = m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} (T'_f - T_1) + C (T'_f - T_1)$$

$$= (m_{\text{eau}} C_{\text{eau}} + C) (T'_f - T_1)$$

où C est la capacité calorifique du calorimètre.

T'_f est la nouvelle température d'équilibre

T_1 est la température de l'eau et du calorimètre au départ.

Figure 58 Résolution de l'exercice de calorimétrie, Manuel 1ère S⁸⁴⁴

⁸⁴² On peut également noter que le point 3- *Appliquer la définition de la quantité de chaleur* : $Q = m.C.(T_f - T_i)$, ne représente en aucun cas la définition de la quantité d'énergie échangée par chaleur. Il s'agit d'un cas particulier où le travail est nul et pour lequel Q s'identifie à la variation d'énergie interne. Nous reviendrons sur ce point au chapitre 8.

⁸⁴³ (Talbourdel, et al., 1990) p.130

⁸⁴⁴ (Talbourdel, et al., 1990) p.131

Le système effectivement choisi pour la résolution est « *délimité par l'enceinte adiabatique* » constitué de « *l'eau [...] partie du système qui gagne de la chaleur* » et du « *cuivre [...] partie du système qui perd de la chaleur.* »

Ainsi, bien que dans les programmes, la notion de système soit suggérée et que dans les manuels du secondaire, la nécessité de bien identifier le système pour résoudre un problème est clairement souligné, peu d'ouvrages proposent une définition de celui-ci⁸⁴⁵. Ainsi, on peut se demander comment dans les livres de thermodynamique, notamment ceux à destination du supérieur, les auteurs définissent la notion de système. On sait qu'à titre d'exemples Kastler et Joyal au début des années 60 en proposaient une définition (Cf. chapitre 4). Qu'en est-il dans les ouvrages des années 90 ? Quels sont les critères pour définir un système thermodynamique ? Comment le représenter ou le décrire ?

II. LES DEFINITIONS DE LA NOTION DE SYSTEME

1. Méthodologie d'analyse

Explicitement présentée dans un chapitre dans l'ouvrage de Kastler en 1962⁸⁴⁶, la référence au système en thermodynamique est abordée de manière succincte dans quelques ouvrages des décennies précédentes. A titre d'exemple, on peut citer comme références historiques, l'ouvrage de Duhem *Traité élémentaire de mécanique chimique fondée sur la Thermodynamique* dans lequel on peut lire « *l'état d'un système sera en thermodynamique défini par un certain nombre de variables* »⁸⁴⁷ ; Ou encore, Bouasse qui emploie le mot système, sans le définir pour introduire le principe d'équivalence en 1913 : « *Soit un système qui passe d'un état à un état infiniment voisin...* »⁸⁴⁸. On peut constater que ce mot n'était d'ailleurs pas employé dans la première édition de son ouvrage de 1907. En effet, on peut lire pour introduire le principe d'équivalence « *pour toute transformation infiniment petite on a ...* »⁸⁴⁹ .

⁸⁴⁵ On peut toutefois citer l'ouvrage de Tréherne en 1957 qui en donnait une définition (Cf. Chapitre 4)

⁸⁴⁶ S'il faut attendre le début des années 1960 en France pour voir apparaître un chapitre consacré au système thermodynamique, Fermi y consacre son premier chapitre « *thermodynamic systems* » dans son ouvrage *Thermodynamics* de 1937. (Fermi, 1956), chapitre 1 p.1.

Mais Fermi consacre en réalité ce chapitre à lister les transformations que peut réaliser un système thermodynamique. Il ne donne pas de définition du système thermodynamique à proprement parler. Il le définit uniquement par son état d'équilibre.

⁸⁴⁷ (Duhem, 1897) Chapitre I du Livre I p.30

⁸⁴⁸ (Bouasse, 1913a) p.72

⁸⁴⁹ (Bouasse, 1907) p.8

L'objet de cette partie est de présenter un classement des différentes définitions du mot *système* ou de l'expression *système thermodynamique*. Aussi, à travers l'étude de 45 ouvrages traitant de thermodynamique destinés pour la plupart à un niveau d'enseignement de niveau L1 à L3, il s'agit de proposer un examen le plus exhaustif possible du concept de système en thermodynamique. Nous aurions également pu réaliser une étude des documents ou extraits de cours facilement accessibles sur Internet. Mais, nous avons choisi d'écarter de cette étude ces documents rarement signés ou dont les auteurs sont difficilement identifiables. Les ouvrages dans cette étude sont donc majoritairement des œuvres de thermodynamique physique, généralistes (CPGE ou universitaires), de thermodynamique industrielle (33 ouvrages). De plus, nous avons complété notre étude par l'analyse de quelques ouvrages de chimie (9 ouvrages) et de biologie (3 ouvrages), dans lesquels la notion de système ou système thermodynamique est également abordée et qui proposent parfois des compléments aux définitions proposées dans les ouvrages de physique.

En première constatation, on peut affirmer que très peu d'ouvrages parmi l'ensemble des documents consultés (en dehors des 45 présentés ici), ne proposent aucune définition du mot système en thermodynamique. On peut par exemple citer l'ouvrage *Précis de thermodynamique rationnelle* de 1994 de Dennery professeur honoraire à l'Ecole centrale de Paris qui ne fait que suggérer l'existence d'une surface de contrôle⁸⁵⁰.

Généralement, le concept de *système* ou de *système thermodynamique* est présenté dans l'introduction de l'ouvrage ou dans un premier chapitre qui lui est entièrement consacré. Aussi, trouve-t-on des ouvrages dans lesquels les définitions ne dépassent guère une ligne alors que parfois, un paragraphe d'une dizaine de lignes est nécessaire aux auteurs pour présenter ce qu'est un système en thermodynamique (Cf. Annexe n°1). Avant de parcourir l'ensemble de ces références, nous proposons ici quelques exemples parmi ceux référencés. Chacun d'entre eux propose une définition différente de la notion de système, montrant que le classement que nous suggérerons au prochain paragraphe, devra réunir plusieurs idées proches :

Dans le *Physique tout en un* de 2013 de Sanz et al., on peut lire :

« On appelle système thermodynamique tout système constitué d'un très grand nombre de particules microscopiques. Un échantillon de matière de taille macroscopique est un système thermodynamique. Un échantillon de matière de dimensions mésoscopiques est aussi un système thermodynamique. Choisir un système revient à partager le monde en deux : le système choisi et le reste de l'univers que l'on nomme extérieur. »⁸⁵¹

Dans cette définition, les auteurs insistent sur la nécessité d'un très grand nombre de particules microscopiques pour définir un système, qu'ils nomment de plus explicitement « *système thermodynamique* ». Ainsi, le choix d'un système thermodynamique nécessite de concevoir

⁸⁵⁰ (Dennery, 1994)

⁸⁵¹ (Sanz, et al., 2013) p.812

l'aspect microscopique des objets. Cette définition se rapproche de la définition donnée par Blain et *al.*, dans l'ouvrage de première S aux éditions Magnard de 1982⁸⁵². (Cf. Chapitre 5)

Dans une autre définition issue d'un ouvrage de chimie, *Chimie physique Approche moléculaire* de Mc Quarrie et *al.* de 2000, les auteurs proposent ce commentaire :

« *Nous entendons par système cette partie du monde que nous étudions et par milieu extérieur, tout le reste.* »⁸⁵³

L'observateur étant dans le milieu extérieur, il est *a priori* plus aisé pour lui de présenter l'objet d'étude par rapport au milieu avec lequel il interagit. En soit, dans cette définition très courte, le système est d'abord défini par tout ce qu'il n'est pas.

Cette désignation 'milieu extérieur', on le verra plus loin, est une notion qui est présente dans la quasi-totalité des livres référencés. Il apparaît donc important pour définir un système, comme le signale Roulet dans l'article du BUP de 1981 (Cf. chapitre 5), d'indiquer clairement tout ce qui n'est pas le système.

Dans un ouvrage de Biologie de 1991, *Bases thermodynamiques de la biologie cellulaire*, Thellier et *al.* proposent :

« *On appelle système, ou milieu intérieur, la portion de l'espace limitée par une surface réelle ou fictive, où se situe la matière étudiée. Le reste de l'univers est le milieu extérieur. La distinction entre système et milieu extérieur est largement arbitraire : le système est ce que l'observateur a choisi d'étudier.... Un système thermodynamique, stricto sensu, est un système macroscopique, c'est-à-dire un système pour lequel le détail des caractéristiques microscopiques est inaccessible, et où l'on ne peut atteindre que des caractéristiques statistiques.* »⁸⁵⁴

Cette définition se rapproche du premier exemple. La nécessité d'un grand nombre de particules est notamment justifiée par le fait que grâce à cela, il est possible de réaliser des moyennes sur des paramètres microscopiques afin d'obtenir des grandeurs macroscopiques caractéristiques de l'état du système⁸⁵⁵. Cette définition se rapproche des attentes parues dans le programme de CPGE de 1987. En outre, cette caractéristique statistique permet de réaliser une distinction nette avec le système défini en mécanique.

Mais, il est également important de souligner que les auteurs insistent sur la nécessaire existence d'une frontière entre le système et le milieu extérieur. Cette frontière est réelle ou une réalisation de pensée.

⁸⁵² (Blain, et al., 1982) p.102

⁸⁵³ (McQuarrie, et al., 2000) p.811

⁸⁵⁴ (Thellier, et al., 1991) p.5

⁸⁵⁵ Il est important de souligner que cette remarque fondamentale apparaît dans un ouvrage de biologie. Or la thermodynamique appliquée à la biologie nécessite une définition précise du système dans la mesure où la plupart du temps les systèmes vivants sont des systèmes ouverts (i.e. échangeant énergie et matière).

Notons enfin, que les auteurs parlent de « *matière étudiée* » : la masse serait donc *a priori* une nécessité dans le concept de système. Un commentaire vient alors : est-ce qu'un ensemble non matériel, comme un gaz de photons par exemple, peut être considéré comme un système thermodynamique ?

Enfin dans le *Thermodynamique Chimique* de Chabanel et *al.* de 2011, on peut lire :

« *La thermodynamique s'applique aux objets macroscopiques, qui sont formés d'un grand nombre d'individus microscopiques appelés molécules*⁸⁵⁶. *Un système thermodynamique est une portion de l'univers limitée par des parois abstraites à définir avec précision. Ces parois ne s'opposent pas forcément à certains échanges avec l'extérieur (appelé aussi environnement ou entourage). L'ensemble système + entourage est considéré comme formant un "super-système" isolé.* »⁸⁵⁷

Dans cette dernière définition, on retrouve les notions abordées précédemment, mais les auteurs en parlant de « *parois* » au pluriel laisseraient la liberté de penser que le système peut être formé de plusieurs surfaces. Cette nuance peut paraître légère mais elle ouvre pourtant la possibilité de choisir un système formé par l'union de systèmes non nécessairement connexes, comme le figurait Blain et *al.* dans leur représentation schématique du système⁸⁵⁸. (Cf. chapitre 5)

Ces quatre définitions montrent les diverses propositions pour définir la notion de système. Quarante-cinq ouvrages parus entre 1989 et 2013, ont été référencés et il s'agit ici de tenter de synthétiser et de rassembler les définitions dans des tableaux comparatifs.

2. La diversité des définitions

Les définitions ont été répertoriées en annexe n°1 de ce mémoire. Mais, afin d'en avoir une lecture plus efficace, nous avons tenté de les rassembler en les classant par catégories :

1. Définir ou non ce qu'il y a dans le système
2. Définir le système par son volume de contrôle (i.e. par son ou ses interfaces)
3. Système simple ou composite

Enfin, on peut souligner que 17 des 45 ouvrages (soit 38%) présentent la notion de *système thermodynamique* à la place de la notion de *système*.

⁸⁵⁶ Il n'est pas étonnant de retrouver l'usage du terme « *molécule* » pour décrire le contenu du système dans la mesure où il s'agit d'un ouvrage de chimie.

⁸⁵⁷ (Chabanel, et al., 2011) p.15

⁸⁵⁸ (Blain, et al., 1982) p.102

a. Définir ou non ce qu'il y a dans un système

Il s'agit ici de montrer dans les définitions du système, la diversité des dénominations relatives au contenu (ou ce qui n'est pas son contenu) d'un système :

	Référence au(x) corps ou objet(s)		Référence aux particules			Pas de référence au contenu ou à la taille du contenu	Référence à l'environnement extérieur	
	un corps/ un objet	ensemble de corps / d'objets	Constituants / particules élémentaires / microscopiques	Contenu / ensemble matériel et particules matérielles	Un grand nombre de particules		Portion d'espace	Milieu extérieur
TOTAL	11%	24%	16%	22%	20%	7%	13%	73%
	35%		58%			7%	86%	

Tableau 3 Définir ce qu'il y a dans le système (à gauche). Référence à l'espace (à droite)

Il est intéressant de constater que 86% des ouvrages font référence à l'environnement extérieur pour définir le système (Tableau 3 droite). On dénombre à ce propos 33 ouvrages sur 45 (soit 73%) qui désignent en priorité le système par ce qu'il ne lui appartient pas : c'est-à-dire le *milieu extérieur*. On pourrait conclure qu'il semble simple pour les auteurs de représenter le système par ce qui ne fait pas partie de ce dernier, avant d'en décrire le contenu, comme nous l'avions déjà suggéré à travers la définition proposée par Thellier et *al.* dans leur ouvrage *Bases thermodynamiques de la biologie cellulaire*, de 1991. Cette notion de *milieu extérieur*, apparaît aussi dans la notion d'*univers* qui est abordée dans 20 ouvrages sur 45 (soit 44%, non présentée dans le tableau synthétique). L'*univers* est alors défini comme l'union du système et du milieu extérieur. Cependant, l'*univers* peut-il lui aussi, former un système thermodynamique ? Chabanel et *al.* le présentent en 2011 comme un « *"super-système" isolé.*»⁸⁵⁹ Mais dans ce cas, il n'y aurait, pour ce système, aucun milieu extérieur ! Aussi certains auteurs, comme Thellier et *al.* nuancent :

« *Remarque sur le milieu extérieur : Nous venons de voir que, pour que l'on puisse traiter d'un système, il fallait pouvoir y faire la mesure des valeurs prises par les variables thermodynamiques. Or nous avons défini le milieu extérieur d'un système comme étant le reste de l'univers, ce qui implique que ce milieu extérieur s'étende à l'infini. Comme on ne peut pas procéder à la mesure de l'ensemble des variables intensives à des distances infiniment lointaines, il s'ensuit qu'en toute rigueur le milieu extérieur n'est pas un système sur lequel on a le droit de raisonner ! On se tire de cette difficulté en admettant que, pour ce qui concerne les échanges d'un système avec l'extérieur, le milieu extérieur se comporte comme un réservoir limité au proche environnement du système. Mais la difficulté n'en est pas moins réelle. En particulier,*

⁸⁵⁹ (Chabanel, et al., 2011) p.15

lorsque nous en arriverons à étudier l'évolution des systèmes il faudra ne considérer que des systèmes finis.»⁸⁶⁰

Aussi, au sens thermodynamique du terme, la notion d'*univers* fait référence non pas à un système infini mais à un milieu fini fait de la réunion du système étudié et de son environnement proche appelé *milieu extérieur*. Ce dernier ne peut alors réaliser des échanges qu'avec le système thermodynamique considéré. Ainsi l'union {système et milieu extérieur} pourrait donc être considéré comme un ensemble globalement isolé, que l'on nommerait *univers*.

Cette remarque fait également écho à la notion d'Univers développée par Clausius lors de la présentation des principes (Cf. Paragraphe II Chapitre 1). En effet, en 1865 Clausius énonçait : « *L'Énergie de l'Univers est constante, l'Entropie de l'Univers tend vers un Maximum.* » Ainsi, à la lumière de notre précédente discussion, on peut se demander si l'Univers de Clausius, constitue un système thermodynamique dans lequel les principes sont applicables. Cet Univers est-il considéré comme un milieu fini ou infini ? La question semble délicate, puisqu'en l'état actuel de nos connaissances, on ne peut affirmer que l'Univers n'est pas un système infini. Or, comme nous l'avons suggéré, les systèmes isolés étudiés en thermodynamique sont des systèmes finis. Aussi, le concept d'énergie totale et le principe de conservation qui est associé n'ont finalement peut-être aucun sens dans le cas de systèmes infinis.

Un second aspect important de la définition de système est celui relatif à son contenu. En effet, 93% des ouvrages, (Cf. Tableau 3 gauche) font référence explicitement à ce qui se trouve dans le système. On distingue deux grands types de contenus selon les termes employés par les auteurs. Premièrement, la référence pour 35% des ouvrages, au concept de *corps* ou d'*objet(s)*. L'utilisation relativement courante de cette terminologie est due à son caractère assez vague. En effet, un corps ou un objet peuvent désigner toute sorte de choses, matérielles, immatérielles et de toute taille. En outre, l'utilisation du pluriel ou du singulier laisse sous-entendre qu'un système peut être formé d'un seul (11% des ouvrages) ou d'un ensemble de constituants (24%). Ainsi, si on considère un glaçon d'eau pure par exemple (soit environ 20g) il s'agit bien d'un objet unique au sens macroscopique du terme. En revanche, si on l'explore à des dimensions plus faibles, on réalise qu'il est constitué de minuscules objets que sont les molécules d'eau, elles-mêmes constituées d'atomes *etc.* Aussi, certains ouvrages préfèrent utiliser le terme de *particules* pour désigner le contenu du système (58%). Mais à chaque fois le terme est alors employé au pluriel. Dans l'exemple du glaçon, cet *objet* est en effet constitué d'environ 6.10^{23} molécules d'eau, i.e. d'un « *grand nombre* » de particules. Ce grand nombre permet en effet, de caractériser spécifiquement le système thermodynamique : c'est un système décrit de manière statistique pour lequel il est possible de réaliser des moyennes spatiales et temporelles de grandeurs microscopiques (vitesse quadratique notamment). La description du système se fait alors par les grandeurs macroscopiques associées (température, pression *etc.*).

⁸⁶⁰ (Thellier, et al., 1991) p.12

Il est également intéressant de noter que 22% des ouvrages précisent que ces ensembles de particules sont *matérielles*. L'emploi de cet adjectif peut faire l'objet de discussions puisque, comme nous l'avons souligné précédemment, la question de systèmes thermodynamiques sans masse, tel un gaz de photons par exemple, se pose de nouveau.

b. Définir le système par son volume de contrôle

Définir un système thermodynamique, c'est aussi présenter ce qui le sépare du milieu extérieur. On dénombre ainsi 42 ouvrages sur 45 (soit 94%), qui introduisent une ou des *séparation(s)* entre le système et le milieu extérieur. (Cf. Tableau 4)

	Une surface/frontière/paroi/séparation réelle ou imaginaire (fermée)	Limites ou frontières du système
TOTAL	76%	18%

Tableau 4 Définir le système par son volume de contrôle

Ce choix d'une surface de contrôle est un élément important pour la détermination du système car c'est à travers ces parois (ou cette paroi) que les transferts de matière ou d'énergie avec l'extérieur se réalisent (Cf. Figure 59).

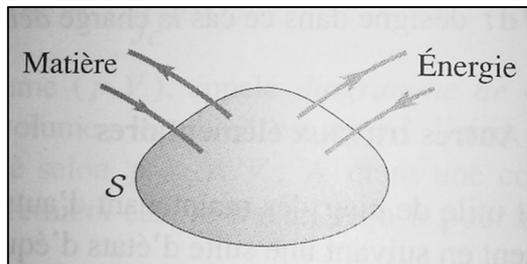


Figure 59 Représentation schématique d'un système thermodynamique⁸⁶¹

Les surfaces permettent à ce propos l'algébrisation des grandeurs d'échange. Ainsi, comme cela s'est progressivement imposé après les années 30 (Cf. chapitre 3), les transferts se comptabilisent en comptant positivement ce qui est gagné par le système et négativement ce qui est perdu.⁸⁶²

Les ouvrages s'accordent de plus, sur le fait que cette frontière entre le milieu extérieur et le système peut être réelle ou fictive. Délimiter un système revient donc à réaliser une opération de pensée dans laquelle on isole fictivement le système thermodynamique d'étude. Ainsi, on peut

⁸⁶¹ (Pérez, 1997) p.8

⁸⁶² Une discussion sur les adjectifs « perdu » ou « reçu » par un système peut être également proposée. En effet on trouve dans la littérature l'expression « reçu algébriquement » pour désigner un gain (reçu positivement par le système) ou une perte (reçu négativement par le système).

reprendre l'exemple de Schwartzentrube de 2007 « *L'air présent dans la pièce où vous travaillez est un système.* »⁸⁶³

Enfin, parmi les 42 ouvrages qui abordent la notion de séparation du système avec l'extérieur, on en dénombre 8 (soit 18%) qui proposent une éventuelle multiplicité des frontières du système. L'utilisation du pluriel pour les surfaces de séparation laisse sous-entendre ce qui va être abordé dans le prochain paragraphe : le cas des systèmes composites.

c. Système simple ou système composite

Plus d'un tiers des ouvrages (17 sur 45 soit 38%) soulignent que certains systèmes sont composés de sous-systèmes ou sont des systèmes non homogènes. Or, seuls 18% d'entre eux suggèrent, comme nous l'avons vu, une multiplicité des surfaces. Il est pourtant difficile de concevoir un système hétérogène formé que d'une seule surface. En effet, si on prend l'exemple de la vapeur d'eau en équilibre avec son liquide, l'ensemble {eau liquide et eau vapeur} peut former un système thermodynamique. Pourtant, ce système n'est clairement pas homogène et se découpent donc en plusieurs sous-systèmes se délimitant les uns par rapport aux autres par une ou des frontières. La référence au système composite apparaît souvent tardivement dans les ouvrages. En effet, on trouve une définition générale du système dans les premières pages du livre. Puis, lors du chapitre sur les transitions de phases, les auteurs corrigent ou complètent la définition initialement proposée. Ainsi, on peut lire dans le livre *Physique tout en un, 1ère année* de Sanz et al. de 2002 : « *un système thermodynamique est un système contenant un très grand nombre de particules élémentaires.* »⁸⁶⁴ La définition est complétée ensuite plus tardivement : « *une phase est un système homogène ou sous-système d'un système hétérogène.* »⁸⁶⁵

Pourtant, les systèmes composites ne sont pas spécifiques au changement de phase. En effet, deux systèmes thermodynamiques non connexes, peuvent constituer un système thermodynamique. C'est le cas par exemple, d'un système composé de deux cuves contenant deux gaz qui peuvent être *a priori* différents, fermés par deux pistons étanches. Ces deux pistons sont solidaires en ce sens que leurs axes restent verticaux et sont attachés aux bras d'un levier (Cf. Figure 60). En outre, il est possible d'imaginer que ces deux cuves cylindriques reposent sur une table conductrice thermiquement (une table métallique par exemple). Ainsi, le bras de levier permet les échanges d'énergie par travail et la table permet les échanges d'énergie par chaleur entre les deux systèmes, c'est-à-dire entre les gaz contenus dans les deux cuves. En revanche, le système complet formé par ces deux cylindres peut être considéré comme isolé.

⁸⁶³ (Schwartzentrube, 2007)

⁸⁶⁴ (Sanz, et al., 2002) p.771

⁸⁶⁵ (Sanz, et al., 2002) p.906

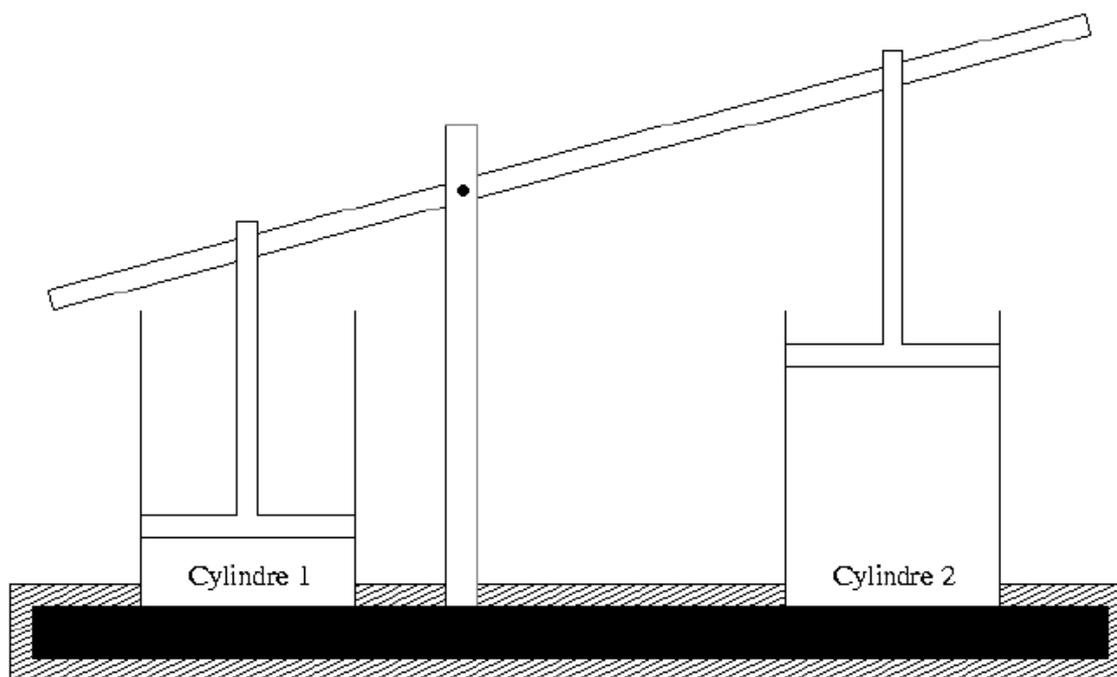


Figure 60 Exemple de systèmes thermodynamiques non connectés⁸⁶⁶

On retrouve ainsi, la représentation schématique proposé par Blain en 1982, comme nous avons pu le voir au chapitre 5 (Cf. Figure 34). Nous reviendrons sur ce point lors du paragraphe III de ce chapitre relatif à l'exemple du compresseur.

Enfin, concernant la multiplicité des frontières, que penser de cet exemple précédemment cité : « *Les molécules d'azote qui font partie de l'air qui vous entoure ne forment pas un système : il n'existe pas de frontière macroscopique (visible à l'œil nu) qui les délimite* »⁸⁶⁷ ? En quoi l'ensemble formé des molécules d'azote ne formerait-il pas un système thermodynamique ? En effet, les molécules d'azote semblent répondre aux critères de certaines définitions d'un système thermodynamique : il y a en effet un très grand nombre de particules permettant de réaliser une moyenne statistique ; et bien que l'on ne puisse pas concevoir une frontière macroscopique qui les délimite on peut imaginer une ou des surfaces rassemblant toutes les molécules de diazote ! Nous reviendrons sur ce point dans le prochain paragraphe.

Ainsi, la multiplicité des définitions n'aide pas à donner un sens précis de la notion de système en thermodynamique. On note, en outre, que certains travaux, en marge de la thermodynamique physique, comme certains ouvrages relatifs à la thermodynamique chimique

⁸⁶⁶ Extrait du Concours communs des Ecoles des Mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes, *Partie C : Étude de quelques phénomènes irréversibles* (Concours Commun Sup., 2003) pp.6-8

⁸⁶⁷ (Schwartzentrube, 2007)

proposent des définitions bien différentes de celles que nous venons de rencontrer. Ainsi, peut-on lire dans la partie « *Notions fondamentales de thermodynamique* » du *Thermodynamique chimique* de Pierre Souchay publié en 1961 : « un système est un ensemble de substances susceptibles ou non de réagir chimiquement [...] un système est dit en équilibre lorsque ses propriétés ne varient pas avec le temps. »⁸⁶⁸ On voit ici que cette définition est uniquement applicable dans les milieux réactionnels ; elle ne correspond en rien aux cas généralement rencontrés en thermodynamique.

Compte tenu de ces nombreuses définitions et notamment de leur disparité, on peut se poser la question de savoir si un système thermodynamique possède des propriétés “essentielles” nécessaires à sa constitution ? C’est notamment l’objet du prochain paragraphe.

3. Quelles propositions de définition pour le système thermodynamique ?

Une proposition sur laquelle on peut accorder les définitions, est la nécessité pour un *système thermodynamique* d’être constitué d’un ensemble d’*entités* microscopiques (y compris, éventuellement un gaz de photons) formant un ou des ensembles macroscopiques. Cette région de l’espace contient un très grand nombre de « motifs » (ou « d’objets ») microscopiques (de l’ordre de grandeur du nombre d’Avogadro : $N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$). Il permet alors de réaliser une moyenne statistique afin d’avoir accès à des paramètres macroscopiques telles que la température ou la pression caractérisant l’état d’équilibre thermodynamique du système.

La définition du système thermodynamique comprend aussi une autre idée fondamentale : la possibilité pour lui d’effectuer des transferts d’énergie et/ou de matière avec les systèmes environnants. Nous avons vu dans les précédents chapitres, l’intérêt de définir ces frontières pour distinguer les grandeurs caractéristiques du contenu (telle que l’énergie) des grandeurs de transfert (tels que les modes de transfert par travail et par chaleur). Ces transferts permettent alors au système d’évoluer d’un état d’équilibre thermodynamique vers un nouvel état d’équilibre thermodynamique. Ces transferts peuvent alors se faire au travers d’une ou plusieurs surfaces. Celles-ci peuvent représenter des frontières réelles ou imaginaires créées par l’esprit. Tout ce qui se trouve à l’intérieur de ces surfaces fermées constitue le système thermodynamique, tout ce qui se trouve au-delà constitue le *milieu extérieur* avec qui le système peut interagir. La réunion de ces ensembles forme alors un ensemble fini globalement isolé, que l’on peut nommer *univers*. Le fait qu’un système thermodynamique puisse être constitué de plusieurs surfaces fermées permet donc de définir comme système un ensemble formé de deux systèmes (ou davantage) non nécessairement connexes et donc non nécessairement en équilibre thermodynamique entre eux.

⁸⁶⁸ (Souchay, 1961) p.3

La définition du système thermodynamique impose donc un choix fondamental pour la détermination des paramètres d'état mais aussi des grandeurs de transfert. Définir la notion de système et en donner les propriétés semblent donc être un point de départ essentiel à toute réalisation de bilans (énergétique et entropique). La définition du système doit laisser comprendre à l'étudiant l'importance de la mise en relief des frontières de ce dernier. Il reste alors dans l'étape de résolution d'un problème de thermodynamique, à choisir le système thermodynamique et à se tenir à ce choix pour évaluer l'ensemble des grandeurs caractéristiques.

Toutefois, les propositions que nous venons de faire sont émises sous de nombreuses réserves. La première d'entre elles a concerné, comme nous l'avons vu, le caractère non nécessairement massif des particules constitutives du système. Mais, d'autres remarques sont possibles. A titre d'exemples, on peut citer le long développement que propose Kastler dans la cinquième édition du Bruhat, en 1962, à la suite des définitions de certains concepts de thermodynamique. Il estime en effet que donner une définition d'un système thermodynamique est difficile dans la mesure où certains sous-entendus ou approximations apparaissent nécessairement. Aussi, propose-t-il notamment deux points de réflexion.

1. Le premier d'entre eux concerne la géométrie et la nature des parois d'un système thermodynamique.

« La description macroscopique d'un système telle que nous venons de la préciser fait volontairement abstraction d'un certain nombre de propriétés de ce système. Elle précise par exemple le volume occupé par le système, mais elle ne mentionne pas la forme géométrique de ce volume, c'est-à-dire la forme et la nature des parois qui limitent le système. Nous distinguons bien entre des parois adiabatiques et des parois diathermanes, mais sans préciser leur nature chimique. Cette limitation est légitime, car la forme géométrique du contenu et la nature des parois sont des caractères secondaires qui n'influencent pas ou influencent peu sur les relations d'interdépendance entre les caractères principaux qui définissent le système thermodynamique : sa pression, son volume, sa température, les concentrations des divers constituants et les grandeurs énergétiques. Mais ceci n'est vrai qu'en première approximation.

En toute rigueur, l'étendue des parois et leur nature, ainsi que l'étendue des surfaces de séparation entre plusieurs phases distinctes influent sur les propriétés énergétiques d'un système, car il existe une énergie de surface liée à l'étendue et à la nature des surfaces. Dans les systèmes usuels où l'étendue des surfaces de séparation reste petite et où le nombre de molécules dans les couches superficielles est en général inférieur au millionième du nombre total de molécules, on peut négliger l'énergie de surface, et il est légitime de faire abstraction de l'étendue des surfaces de séparation, de la forme du récipient et de la nature des parois. Mais, une telle approximation n'est plus permise lorsque les surfaces sont grandes (lames minces, dispersion colloïdale de deux phases l'une dans l'autre) et il faut avoir présent à l'esprit les conditions de validité de cette

approximation. »⁸⁶⁹ La remarque de Kastler pose une condition sur l'étendue de la surface qui délimite le système. Couramment, le problème ne se pose pas puisque les surfaces de contrôle habituellement choisies possèdent une dimension finie. En outre, le rapport volume du système sur la surface extérieure du système est en faveur du volume i.e. privilégiant les grandeurs au sein du système vis-à-vis des grandeurs caractéristiques de la surface. En revanche, si on reprend l'exemple proposé par Schwartzenrube en 2007, les molécules de diazote contenues dans l'air, ne peuvent constituer un système thermodynamique « habituel » dans la mesure où les phénomènes de surface seraient privilégiés. En effet, la surface du système ainsi formée serait la réunion de chaque surface de chaque molécule de diazote diluée dans l'air. Ainsi, sa dimension serait considérée comme infini. Le rapport volume sur surface du système serait donc cette fois en faveur de la surface, dont les grandeurs caractéristiques seraient alors privilégiées. En outre, chaque système ne posséderait pas nécessairement suffisamment de particules pour pouvoir réaliser une moyenne statistique représentative de l'état du système.

2. Le deuxième point de discussion concerne à ce propos l'état d'équilibre thermodynamique du système.

« Nous devons faire encore une autre réserve : nous avons admis que le volume, la densité, les propriétés énergétiques d'un corps pur sont parfaitement définis lorsqu'on se donne les valeurs actuelles de la température et de la pression. Il existe des cas, en particulier pour les corps à l'état solide, où ces propriétés dépendent du traitement antérieur subi par ces corps. La densité et les propriétés énergétiques d'un métal dépendent du traitement mécanique et thermique que ce métal a subi : écrouissage, trempe, recuit et non seulement de la température et de l'état de pression actuels.

*De même les propriétés magnétiques d'un corps ferromagnétique ne dépendent pas seulement des valeurs momentanées de la température et du champ magnétique, mais de la manière dont la température et le champ ont évolué antérieurement. Nous caractérisons cette sorte de comportement par le mot « hystérésis ». L'hystérésis est liée à des modifications internes de structure d'un solide que seul le point de vue microscopique permet de caractériser. Nous devons exclure des systèmes thermodynamiques que nous étudierons les solides qui présentent ces phénomènes d'hystérésis.»*⁸⁷⁰ Cette remarque de Kastler est importante. La définition du système et de ses frontières permettent d'identifier les grandeurs de transfert mais aussi les grandeurs caractéristiques du système en lui-même. Aussi, « l'histoire » des transformations subies par le système peut influencer, par un phénomène d'hystérésis, l'état du système. Les grandeurs d'état d'un système donné, ne dépendent pas seulement de la nature des échanges ni des corps qui le constitue, mais de son passé. Kastler souligne néanmoins que l'étude de tels systèmes sera régulièrement écarté des problèmes de thermodynamique car « le domaine d'étude principal de

⁸⁶⁹ (Kastler, et al., 1962) pp.25-26

⁸⁷⁰ (Kastler, et al., 1962) pp.25-26

la thermodynamique est l'étude des propriétés des fluides où cette complication ne se présente pas. »⁸⁷¹ Une remarque qui peut être néanmoins nuancée, si l'objet d'étude est par exemple un ferrofluide, pour qui il est possible d'observer des phénomènes d'hystérésis⁸⁷².

Aussi, ces remarques montrent la difficulté dans la définition de la notion de système, d'être le plus exhaustif possible. On se rappelle de la proposition faite par Joyal (Cf. Chapitre 5) reposant exclusivement sur des propriétés mathématiques. Cependant, cette définition ne peut s'imposer dans les ouvrages de thermodynamique, car elle apparaît trop abstraite, mais aussi en décalage avec la volonté d'une moins grande implication des mathématiques dans l'enseignement des sciences physiques. Aussi, comme le suggèrent Faroux et *al.* en 2002, dans leur cours de thermodynamique, il est nécessaire qu'« une grande souplesse existe dans la définition du système ; l'essentiel est de bien l'explicitier et de s'y tenir dans la suite de l'étude. »⁸⁷³ Cette remarque est par ailleurs l'objet du prochain paragraphe de notre travail. La détermination du système apparaît comme un élément fondamental de la thermodynamique. Comment réalise-t-on un tel choix ?

III. LE CHOIX DU SYSTEME EN THERMODYNAMIQUE

1. Choisir le système dans la résolution des problèmes de thermodynamique : illustration sur un sujet de concours

Les ouvrages semblent donner des définitions très éparpillées de la définition de système (ou système thermodynamique), et les programmes se contentent généralement d'en connaître uniquement le qualificatif isolé, fermé, ouvert, *etc.* Pourtant, de nombreuses remarques présentes dans les manuels notamment, invitent l'étudiant ou l'enseignant à *choisir* correctement un système pour la résolution du problème car comme le suggère Jech en 2004, « ... sans cela, tout n'est que litigieux et surtout raté. »⁸⁷⁴

Mais la tâche ne sera *a priori* pas aisée pour l'étudiant car : « il n'existe pas de règles précises pour définir [le système]. Néanmoins, un volume de contrôle choisi de manière astucieuse peut

⁸⁷¹ (Kastler, et al., 1962) pp.25-26

⁸⁷² A titre d'exemple, il est possible de consulter l'article de Narelle J. Hillier et David P. Jackson, *Width of a ferrofluid finger: Hysteresis and a double energy minimum*, publié en mars 2007 in Physical Review

⁸⁷³ (Faroux, et al., 2002) p.2

⁸⁷⁴ (Jech, 2004) p.344

simplifier considérablement l'analyse »⁸⁷⁵, comme le rappellent Cengel et *al.* dans l'ouvrage *Thermodynamique : Une approche pragmatique* de 2009.

Dans cette partie, il s'agit d'illustrer l'importance du concept de système à travers un sujet de concours⁸⁷⁶. Cet exemple traite du problème du compresseur (Cf. Figure 61) qui peut être considéré comme un exercice *classique* de la thermodynamique. En effet, il est présent dans de nombreux ouvrages⁸⁷⁷ et il est le sujet d'au moins onze problèmes de concours d'entrée en école d'ingénieurs entre 1991 à 2015⁸⁷⁸. Le sujet qui va être présenté, doit mettre en lumière les difficultés dans le choix du système et la corrélation de ce choix avec les définitions précédemment données.

L'analyse va porter sur la première partie du problème dont l'énoncé est donné en annexe n°2.1. L'objectif de ce problème est de réaliser un bilan énergétique et notamment de calculer les échanges d'énergie par travail au cours d'un aller-retour du piston que l'on peut représenter par trois étapes : l'admission d'une quantité donnée de gaz à (P_1, T_1) (étape I), la compression adiabatique de celui-ci (étape II) et enfin son refoulement dans des nouvelles conditions de température et pression (P_2, T_2) (étape III).

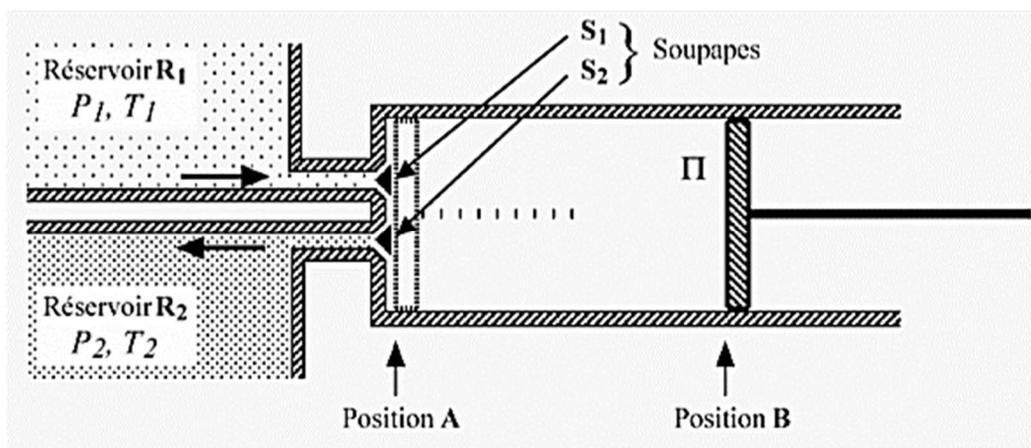


Figure 61 Schéma du compresseur proposé dans le sujet concours CCP 2005

On peut noter que lors de la présentation du problème, les auteurs du sujet parlent d'une « transformation en trois étapes » mais n'emploient le terme de « transformation » que pour

⁸⁷⁵ (Cengel, et al., 2009) p.7

⁸⁷⁶ Concours de 2005 de la banque d'épreuves CCP Deug (donné en annexe n°2.1). Le concours national d'admission dans les grandes écoles d'ingénieurs (CCP Deug) est réservé aux étudiants ayant validé quatre semestres de licence dans le champ des sciences et technologies. Le programme du concours est identique à celui des classes préparatoires aux grandes écoles.

⁸⁷⁷ Il est par exemple traité dans 11 ouvrages sur les 45 référencés pour illustrer la notion de système et notamment dans (Grécias, et al., 1999) pp.681-683 et dans (Pérez, 1997) pp.216-217

⁸⁷⁸ ENSAM 1991, INA ENSA 1995, ENSAM 1995, CCP TSI 1999, ENSAIT 1999, ENGEES 2000, ESIM 2000, ESIM 2003, filière PC CCP Deug 2005, Concours commun Maroc 2006, Centrale Supélec 2015.

l'étape II, relative à la compression adiabatique du gaz. Cette précaution est probablement due au fait qu'une transformation est une évolution dans des conditions particulières d'un état d'équilibre thermodynamique (P_1, T_1) à un autre état d'équilibre thermodynamique (P_2, T_2) pour un système donné. Le fait que les étapes I et III ne soient pas qualifiées de transformations montre sans doute la difficulté d'identifier l'évolution d'un système dans ces étapes. Pourtant, le titre de la partie est intitulé « *Etude énergétique des transformations* ». On note donc ici l'emploi du pluriel pour le mot transformation : une première ambiguïté quant à la considération des transformations (incluant les étapes) ou de la transformation (relative à l'ensemble des étapes).

A la suite de la présentation de l'énoncé, les concepteurs proposent classiquement de réaliser une étude énergétique⁸⁷⁹ sur le compresseur. Pour ce faire, le questionnaire est découpé de façon à accompagner l'étudiant dans l'élaboration de ce bilan.

I. Etude énergétique des transformations

- 1) Préciser la nature de la transformation (II) subie par la masse m de gaz.
- 2) Représenter les trois étapes de fonctionnement du compresseur dans un diagramme donnant la pression intérieure P_i en fonction du volume intérieur V_i du cylindre.
- 3) Déterminer le travail reçu par la masse m de gaz **au niveau du piston**, au cours de chacune des trois étapes, pour un aller-retour de la paroi mobile Π .
- 4) Faire apparaître, sur le diagramme de la question I.2, la représentation graphique du travail total de compression reçu par la masse m , au niveau de la paroi mobile.
- 5) Donner l'expression du travail massique w reçu, au niveau du piston, par l'unité de masse du fluide ayant transité dans le compresseur.
- 6) Montrer que ce travail w représente la variation d'une fonction d'état massique du fluide entre les états (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .
- 7) Donner, en fonction de T_1, P_1, P_2 et γ , l'expression de la température T_2 .
- 8) *Application numérique* : calculer T_2 et w .
- 9) Donner la variation d'entropie massique Δs du fluide lors de son passage du réservoir R_1 au réservoir R_2 .

Figure 62 Questionnaire du sujet « compresseur », CCP Deug 2005

On peut voir dans le questionnaire (Cf. Figure 62), que les auteurs du sujet font référence à différents systèmes d'étude pour la résolution de ce problème :

1. Masse m de gaz (ou unité de masse) : questions 1, 6 et 9
2. Cylindre du compresseur : question 2
3. Masse m de gaz (ou unité de masse) **au niveau du piston** (ou paroi mobile) : questions 3), 4) et 5)

Si on analyse les différents systèmes proposés pour répondre aux questions, on peut remarquer deux points importants :

⁸⁷⁹ Une étude entropique est également proposée dans le sujet. Elle ne sera pas étudiée ici.

Premièrement, le cas de la question 2 est singulier. En effet, le cylindre du compresseur peut-il être considéré comme un système thermodynamique ? Si on fait référence aux définitions précédemment exposées, cela ne peut être le cas. En effet, lors des étapes I et III, aucune particule de gaz ne se trouve dans le cylindre, empêchant toute moyenne statistique amenant à des paramètres macroscopiquement mesurables telles que la température ou la pression.

Deuxièmement, les auteurs distinguent les systèmes « *masse m de gaz* »⁸⁸⁰ et « *masse m de gaz au niveau du piston* »⁸⁸¹. Cette distinction est clairement mise en évidence dans le document par l'utilisation de caractères gras. Il est clair que la masse *m* de gaz peut constituer un système thermodynamique corrélativement aux définitions données. Néanmoins, y-a-t-il une différence entre le système {masse *m* de gaz} et {masse *m* de gaz au niveau du piston} ? *A priori*, le complément d'information « *au niveau du piston* » apparaît pour les concepteurs du sujet, comme un renseignement crucial pour la résolution du problème ; mais comment cela impacte-t-il la réponse à apporter à la question ?

C'est ce qui va être exposé dans la suite, en comparant deux corrections facilement accessibles sur internet⁸⁸² et en analysant des copies d'étudiants de CPGE et de Master Enseignement à qui le sujet a été proposé en exercice.

2. La résolution d'un problème selon le système

a. Analyse des deux corrections suivant le système choisi

Les deux corrections présentées en annexe n°2^{883,884} proposent des corrigés distincts de ce problème. L'objet de cette partie est d'analyser ces propositions de résolution, notamment en fonction du système ou des systèmes choisis.

En question n°2, les concepteurs de l'énoncé proposent de réaliser la représentation des trois étapes dans le diagramme (P, V) où P représente la pression intérieure et V le volume intérieur du cylindre. On parle alors d'un diagramme de Watt. Ainsi, il ne s'agit pas du système {gaz} mais d'un système {cylindre}, qui ne peut pas être considéré comme nous l'avons vu comme un système thermodynamique puisque le cylindre passe par un volume nul et ne contient donc à cet instant aucune particule. Dans les corrections proposées, les diagrammes font clairement apparaître chacune des trois étapes et il est précisé que lors de l'étape II, le volume du cylindre

⁸⁸⁰ Ou unité de masse

⁸⁸¹ Ou au niveau de la paroi mobile

⁸⁸² Il ne s'agit en aucun cas de corrections officielles du sujet (qui n'existent d'ailleurs pas), mais de corrections disponibles en libre consultation sur internet.

⁸⁸³ Annexe n°2.2 (Le Hir, 2007) pp. 1-2

⁸⁸⁴ Annexe n°2.3 (Micolau, 2005) pp.39-42

correspond au volume du gaz. Dans le diagramme de Watt, les étapes I et III correspondent quant à elle, à des évolutions à pression constante. (Cf. Figure 63 gauche).

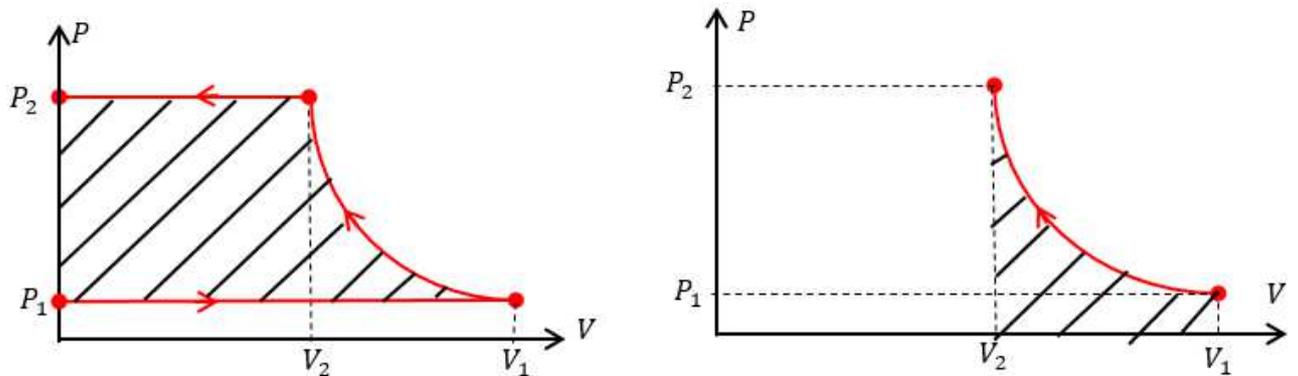


Figure 63 Diagramme de Watt⁸⁸⁵ du compresseur (à gauche) et Diagramme de Clapeyron du gaz (à droite). Les étapes d'admission et de refoulement sont représentées par des points

Mais, dans le diagramme (P, V) , dit diagramme de Clapeyron, où le volume V désigne cette fois le volume occupé par le gaz, (Cf. Figure 63 droite), les étapes I et III ne correspondant à aucune transformation thermodynamique, sont représentées par seulement par des points : l'état du système n'a pas changé.

Cette distinction entre les deux diagrammes amène donc deux réponses différentes pour la question 4 relative à la représentation graphique du travail⁸⁸⁶ pour la masse m de gaz. En effet, celui-ci s'exprime comme l'opposée de l'aire sous la courbe dans le diagramme d'équilibre (P, V) . Ainsi, si le système est la {masse m de gaz}, comme le propose le sujet, alors la réponse correcte est la Figure 63 de droite, puisque le gaz ne subit que la transformation relative à l'étape II. En revanche, si le concepteur du sujet souhaite illustrer le travail récupéré sur le diagramme de Watt pour le système {cylindre}, comme proposé dans la question 2., alors c'est la Figure 63 de gauche qui est correcte.

Le sujet se poursuit avec la troisième question « Déterminer le travail reçu par la masse m de gaz **au niveau du piston**, au cours de chacune des trois étapes, pour un aller-retour de la paroi mobile **II** ». Encore une fois, le système à choisir pour l'étude est clairement proposé dans le texte : « travail reçu par la masse m ». Le candidat est donc invité à choisir un système fermé assimilé à un gaz parfait. Mais, il est intéressant de constater que les auteurs mettent clairement en relief l'expression « **au niveau du piston** ».

⁸⁸⁵ On parle de diagramme de Watt dans la mesure où l'abscisse du diagramme (P, V) désigne non pas le volume du gaz mais le volume du cylindre du piston.

⁸⁸⁶ Les calculs des grandeurs de transfert par les diagrammes d'équilibre (P, V) seront à nouveau discutés dans le chapitre 9.

Dans le corrigé 1⁸⁸⁷, le correcteur ne fait pas apparaître distinctement le système étudié. Partant du principe que le sujet l'énonce clairement, on peut penser qu'il se dispense de le préciser car il est "évident que" le système est le gaz de masse m . Néanmoins, il paraît important au correcteur 1 de souligner à nouveau « *travail reçu au niveau du piston* ». En ce qui concerne l'élément de réponse pour l'étape I, on lit : « $W_I = -P_1V_1 = -\frac{m}{M}RT_1$ c'est le gaz qui travaille pour refouler l'atmosphère, de l'autre côté du piston. » Ainsi, dans cette correction, le système n'est pas défini mais il semble néanmoins immédiat que ce soit le gaz. L'élément pertinent pour proposer une réponse est ici le piston qui *a priori* est identifié comme la frontière de séparation du système gaz avec le milieu extérieur et qui permet ainsi les transferts d'énergie par travail.

Pour la correction n°2⁸⁸⁸, le correcteur propose immédiatement une définition du système « *nous allons donc étudier le travail échangé par le gaz de masse m* » mais termine sa phrase par « *au cours des trois transformations* ». Il faut donc comprendre que le gaz subit trois transformations, i.e. une transformation pour chacune des étapes. Le calcul est davantage détaillé que pour la correction 1 et le résultat est clairement différent « $W_I = 0$ ». Le correcteur justifie son calcul par le fait que lors de l'étape I le gaz subit une "transformation nulle", puisque ses paramètres d'état sont constants ($\Delta U = 0$) et que l'ensemble est calorifugé ($Q_I = 0$) ainsi par l'application du premier principe $W_I = 0$. Une autre justification est également proposée. Elle repose sur le caractère isochore de la transformation du gaz de masse m : dans ce cas $W_I = -\int P_{ext}dV = 0$. La correction 2 ne reprend pas la phrase « *au niveau du piston* » de l'énoncé. Cet aspect ne semble donc pas être *a priori* dans cette résolution, un élément majeur du raisonnement.

Toutes ces remarques s'appliquent évidemment à l'identique pour l'étape III. Le corrigé 2 propose avec les mêmes arguments $W_{III} = 0$. Le corrigé 1 justifie un travail non nul pour le gaz « $W_{III} = +P_2V_2 = +\frac{m}{M}RT_2$. Cette fois c'est le gaz qui est refoulé et reçoit un travail positif ».

Intéressons-nous désormais à l'étape II. Dans la représentation graphique du diagramme (P, V), nous avons déjà mentionné que cette étape II revêt le caractère de transformation II pour le gaz de masse m . Ainsi, les deux corrigés s'accordent à dire que pour cette transformation adiabatique et réversible d'un gaz parfait, le travail s'écrit :

$$W_{II} = \frac{m}{M} \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$$

On peut résumer toutes les remarques dans un tableau synthétique mettant en relief les deux corrections proposées (Cf. Tableau 5):

⁸⁸⁷ (Le Hir, 2007)

⁸⁸⁸ (Micolau, 2005)

	Correction 1	Correction 2
Etape I	$W_I = -P_1V_1$	$W_I = 0$
Etape II (Transformation II)	$W_{II} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1}$	
Etape III	$W_{III} = +P_2V_2$	$W_{III} = 0$
Sur un aller-retour	$W_{tot} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}(P_2V_2 - P_1V_1) = \Delta H$	$W_{tot} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1} = \Delta U$

Tableau 5 Tableau synthétique des réponses des deux corrigés

A la dernière ligne, la contribution de chacune des trois étapes est sommée, correspondant à un aller-retour du piston. La correction 1 aboutit donc à $W_{tot} = \Delta H$; où H désigne l'enthalpie du gaz parfait, qui est un résultat attendu sur les études de compresseurs (nous reviendrons sur ce point dans la discussion qui suivra). La correction 2 se conclut quant à elle, sur le fait que $W_{tot} = \Delta U$, où U désigne l'énergie interne du gaz parfait.

Si on analyse la rédaction proposée en correction 1, on constate qu'il n'y a aucune mention du système étudié lors de la proposition de la solution. Le système est sous-entendu dans le corrigé 1, et est choisi comme le suggère l'énoncé, comme étant la {masse m de gaz}. Mais, si on s'intéresse à la détermination des travaux W_I et W_{III} , il apparaît que le système réellement étudié est un volume dit de *contrôle* qui correspondrait à l'intérieur du compresseur passant successivement d'un volume nul à un volume V_1 lors de l'admission de gaz, puis d'un volume V_2 à un volume nul lors de l'éjection des gaz. Pourtant, il est impossible que le volume de contrôle soit un système thermodynamique car comme nous l'avons dit, à volume nul il n'y a pas de particules dans le système ainsi dénommé, rendant impossible toute détermination de grandeurs telles que la pression ou la température, caractéristiques de l'état du système.

Quant à la correction 2, à chaque début de question le correcteur souligne le fait que le système choisi est, comme le propose le sujet, la masse m de gaz. Ainsi, lors des étapes d'admission et de refoulement, le gaz ne subit pas de transformation. Il est simplement déplacé d'un lieu à un autre lieu. On parle donc de *travail de transvasement*⁸⁸⁹ qui ne modifie pas l'état du système. Ce dernier n'échangeant d'énergie ni par travail ni par chaleur avec l'extérieur.

⁸⁸⁹ Le libellé *travail de transvasement* proposé ici pour désigner la quantité $P_2V_2 - P_1V_1$, pourrait être l'objet de nombreuses discussions. En effet, certains auteurs utilisent ce terme pour désigner l'ensemble du travail au niveau du compresseur, c'est-à-dire le travail nécessaire pour que le gaz passe de l'état (P_1, T_1)

Une question vient alors immédiatement : Pourquoi, la correction 1 proposée, se dirige dans cette voie ?

La réponse a, en réalité, déjà été donnée. Le problème du compresseur est un classique de thermodynamique, généralement traité dans le cadre des systèmes ouverts. Or, le résultat attendu est une énergie récupérable par travail par l'utilisateur, égale à la variation d'enthalpie ΔH , c'est-à-dire la variation d'énergie interne (étape II) à laquelle on a soustrait le travail de transvasement (étape I et III). Ainsi, on légitime par cette remarque la réponse du correcteur 1. Mais à regarder le sujet de plus près, on remarque que les concepteurs du sujet encouragent le candidat à choisir comme système « *la masse m de gaz* ». Ainsi, les réponses données dans la correction 2, même si elles sont différentes de celles *a priori* attendues, sont celles qui correspondent le mieux à la question posée.

Mais l'analyse peut être en réalité toute autre. Il est en effet, également possible de se demander ce que souhaitaient en réalité les concepteurs du sujet pour résoudre ce problème. Nous sommes en effet, amenés à nous poser cette question à cause de l'expression « *au niveau du piston* » ou « *au niveau de la paroi mobile* » que l'on trouve de façon récurrente dans le sujet. Pourquoi les concepteurs du sujet insistent sur ce point ? Pourquoi, comme il a été vu, le système choisi pour le questionnaire est sans cesse modifié ? La réponse probable qui peut être donnée est que les auteurs cherchent sans doute à faire comprendre que le travail utile (réellement récupéré) est le travail de la compression adiabatique auquel on a ôté le travail de transvasement (qu'il suggère au lecteur à travers la remarque « *au niveau du piston...* »). Dans ce cas de figure, la correction attendue serait la numéro 1.

Naturellement ceci n'est qu'une hypothèse, nous reviendrons sur ce point lors de l'analyse du rapport du sujet. Cependant, avant cela, pour montrer encore mieux les difficultés et les ambiguïtés de ce problème, le sujet a été soumis à un autre regard : celui des étudiants.

à l'état (P_2, T_2) , comme dans (Grécias, et al., 1999) p.682. Nous nous contenterons de signaler ce point, sans entrer dans les détails.

b. Analyse des copies d'étudiants de CPGE et de Master enseignement

Le sujet présenté plus haut a été proposé en devoir sur table à 15 étudiants de CPGE⁸⁹⁰ (dont 2 étudiants redoublants leur deuxième année de CPGE désignés par 5/2)⁸⁹¹, et 20 étudiants de Master enseignement⁸⁹².

Dans le tableau ci-dessous (Cf. Tableau 6) une synthèse des résultats proposés par les étudiants, a été faite :

	$W = 0$ étapes I, III	$W \neq 0$ étapes I, III	Sur un aller- retour Energie interne ΔU	Sur un aller- retour Enthalpie ΔH	Sur un aller- retour Autres	Sur un aller- retour Pas de réponse
Etudiants de Master	1 ⁸⁹³	17	4	2	5	8
Etudiants de CPGE	1 ⁸⁹⁴	14	3	5 ⁸⁹⁵	4	3
%	5,7%	88,6%	20%	20%	25,7%	31,4%

Tableau 6 Tableau synthétique des réponses des étudiants

Le constat est sans appel : moins de 6% des étudiants suivent la correction 2 pour les valeurs des travaux lors des étapes I et III. Ils sont donc une large majorité à concevoir que le gaz lors des étapes d'admission et de refoulement, subit une transformation. Certaines copies montrent clairement des erreurs de raisonnement que nous ne détaillerons pas ici, mais d'autres expriment clairement que le travail est égal au produit pression, volume (P_1V_1 ou P_2V_2).

En revanche, si on regarde l'expression du travail utile total, les réponses sont partagées : 20% se retrouvent dans le cas de la correction 1 et 20% dans le cas de la correction 2. Aussi, une partie des étudiants considère que les étapes I et III s'annulent deux à deux lors de l'expérience, le bilan se ramenant alors à l'étape II faisant apparaître la variation d'énergie interne du gaz. Quant aux autres étudiants, ils somment les trois travaux et aboutissent à la variation d'enthalpie du gaz. C'est notamment le cas des étudiants 5/2. On peut alors remettre en doute l'objectivité de l'expérience pour ces deux étudiants qui ont déjà eu à traiter l'exemple du compresseur. Aussi,

⁸⁹⁰ Etudiants en CPGE section PSI* au Lycée César Baggio de Lille, année scolaire 2013-2014.

⁸⁹¹ Le programme de thermodynamique de cette section aborde les bilans énergétiques sur les systèmes ouverts, tel que le compresseur. Mais au moment du test, les étudiants n'avaient pas encore traité cette partie du programme, (hormis les 5/2)

⁸⁹² Etudiants en Master enseignement à l'université de Lille 1, année scolaire 2013-2014

⁸⁹³ Justifié par : « le volume est constant d'où $dV=0$ »

⁸⁹⁴ Justifié par : « la transformation est isotherme et adiabatique »

⁸⁹⁵ Dont les deux redoublants

retrouvent-ils le résultat attendu : sur un aller-retour le travail correspond à la variation d'enthalpie ΔH . L'un des étudiants commente d'ailleurs sa réponse d'une remarque confirmant notre hypothèse : « on retrouve ici l'expression du premier principe industriel [i.e. du premier principe de la thermodynamique appliquée au système ouvert]. » (Cf. Figure 64)

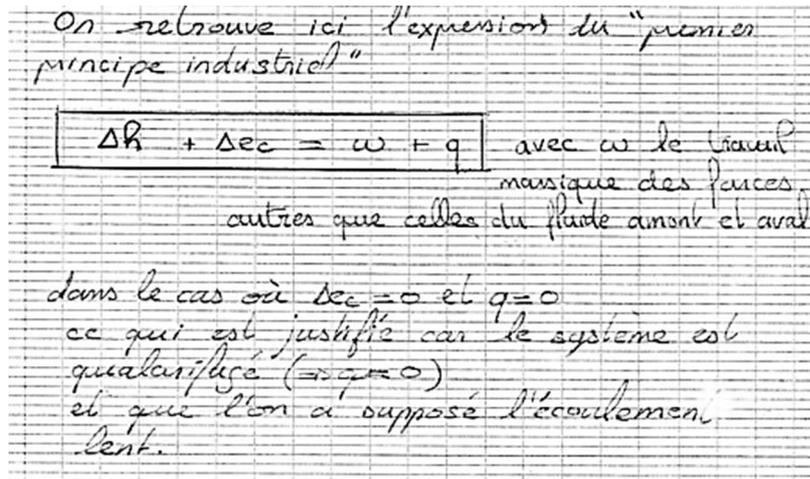


Figure 64 Commentaire d'un étudiant sur un résultat attendu pour un compresseur

Pourtant dans sa copie, l'étudiant avait clairement identifié le système : {masse m de gaz au niveau du piston} comme le suggère l'énoncé. (Cf. Figure 65)

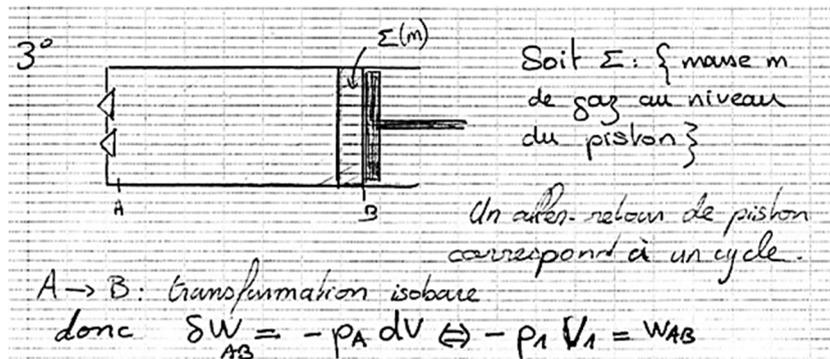


Figure 65 Système proposé par un étudiant pour l'étude énergétique du compresseur

Aussi, avec le système ainsi défini, la « transformation » $A \rightarrow B$ est à la fois isobare, isotherme, isochore et isoénergétique, car aucune transformation n'est réalisée.

En définitif, il semblerait donc que l'indication du système de la part de l'étudiant tient plus du réflexe que d'un raisonnement basé sur le système proposé. En effet, il n'y a pas corrélation entre le système et la réponse. Ce constat est d'autant plus édifiant puisqu'on remarque que la majorité des étudiants ne précise en réalité presque jamais le système étudié (ils ne sont que 4 sur 35 à présenter clairement le système). Enfin, aucun d'entre eux ne signale la notion de système ouvert alors qu'ils sont 20% à proposer une correction relative à un système ouvert (i.e. aboutissant à la variation d'enthalpie du gaz).

Il convient donc de se demander en toute logique l'influence ou le poids que peut avoir le vécu de l'étudiant sur le traitement et l'analyse des problèmes. Cette remarque est notamment étayée

par la copie d'un étudiant n'ayant jamais traité le problème d'un système tel que le compresseur. Il suit alors un raisonnement proche de la correction 2. En effet, l'étudiant décrit le système en début de problème en stipulant : « on a un gaz parfait ». Puis, il applique les principes à ce système clairement identifié. (Cf. Figure 66)

Phase I:

D'après le 1^{er} principe, $dU = \delta W + \delta Q$.

Or, l'ensemble est parfaitement calorifuge, donc $\delta Q = 0$.

$\Rightarrow dU = \delta W$.

Or, on a un gaz parfait, donc

$$dU = n c_{v,m} dT$$

donc $W_{(I)} = n c_{v,m} \Delta T = 0 \text{ J.}$

Pour la phase (II), on part de $T_1 \rightarrow T_2$, donc

$$W_{(II)} = n c_{v,m} \Delta T = n c_{v,m} (T_2 - T_1).$$

Pour la phase (III), on a $T_2 = \text{cte.}$

donc $W_{(III)} = 0 \text{ J.}$

4) On a $W_{\text{tot}} = W_{(II)} = n c_{v,m} (T_2 - T_1)$

Or, $W = \int -P_{\text{ext}} dV = \text{aire sous la courbe}$

5) On a $W = n w$.

donc $w = \frac{n}{m} c_{v,m} (T_2 - T_1).$

$$\Rightarrow w = M c_{v,m} (T_2 - T_1).$$

6) On a un gaz parfait, donc

$$P_1 V_1 = n R T_1 \text{ et } P_2 V_2 = n R T_2.$$

donc $T_1 = \frac{P_1 V_1}{n R}$ et $T_2 = \frac{P_2 V_2}{n R}$.

donc $w = \frac{M c_{v,m}}{n R} (P_2 V_2 - P_1 V_1).$

$$\Rightarrow w = \frac{c_{v,m}}{m R} (P_2 V_2 - P_1 V_1).$$

Figure 66 Copie d'étudiant rédigeant sa réponse en fonction du système clairement choisi au départ

Comme on le voit sur la Figure 66, qui reprend un extrait de la copie de l'étudiant, celui-ci aboutit à la réponse de la correction 2, où le travail se ramène à la variation d'énergie interne :

$$\Delta U = \frac{C_{v,m}}{mR} (P_2 V_2 - P_1 V_1)$$

Il y a donc une difficulté certaine à appréhender la résolution de ce problème. Si, comme l'invite le sujet, le candidat doit choisir le système {masse m de gaz} alors la correction attendue doit être proche de la correction 2. Le résultat obtenu diffère alors des résultats "classiques" des compresseurs. En revanche si, comme le suggère les concepteurs du sujet avec l'indication « **au niveau du piston** », les calculs des travaux doivent conduire à un résultat tel que le travail utile est la variation d'enthalpie, alors c'est la correction 1 qui fait foi.

Comme il est impossible d'accéder au corrigé officiel d'une épreuve de concours, on peut alors chercher à se tourner vers le rapport de jury pour analyser les attentes des jurés.

c. Analyse du rapport de jury

Dans le rapport de jury du concours, on peut lire « *le manque d'attention et de concentration des candidats au cours de la lecture d'un énoncé [alors que] ce dernier "regorge" de renseignements intéressants qui permettent de résoudre un bon nombre de questions.* »⁸⁹⁶ Dans le cas du compresseur, on peut naturellement penser que ces renseignements intéressants sont les informations donnant le système à étudier et notamment l'information récurrente « **au niveau du piston** ». Le rapport du jury condamne sévèrement le manque de rigueur de certains candidats car « *la rigueur imposée par la thermodynamique ne supporte pas de telles erreurs !* »⁸⁹⁷

Pourtant, compte tenu des différences entre les corrections que l'on peut rencontrer pour ce problème, on peut se demander ce qu'attend le rapporteur vis-à-vis du sujet.

Ainsi, comment interpréter la remarque suivante : « *Le diagramme $P_i = f(V_i)$ proposé par la majorité des candidats montre que ces derniers sont loin de faire preuve d'un bon sens physique.* »⁸⁹⁸ ? Naturellement, on peut imaginer certains diagrammes farfelus présentés par les candidats. Nous avons pu nous même le constater dans le test effectué sur les étudiants de CPGE et de Master. Mais comme nous l'avons souligné plus haut, deux diagrammes peuvent satisfaire cette question selon le système choisi : {masse de gaz} ou {cylindre} qui rappelons-le, ne correspond pas à un système thermodynamique comme nous l'avons présenté. Aussi le « *bon sens physique* » valide-t-il la première ou la seconde proposition ?

⁸⁹⁶ (Faynot, 2005) p.8

⁸⁹⁷ (Faynot, 2005) p.9

⁸⁹⁸ (Faynot, 2005) p.9

La remarque suivante du rapport est encore plus ambiguë : « *Le calcul du travail reçu (sous forme de travail de forces de pression) par un système thermodynamique gazeux, au cours d'une adiabatique, comme au cours d'une isotherme, pose toujours d'énormes problèmes.* »⁸⁹⁹ En effet, si les deux corrections s'accordent pour le calcul du travail lors de la transformation adiabatique (étape II du fonctionnement du compresseur) : $W_{II} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1}$, on peut se demander ce qui est attendu dans la remarque « *au cours d'une isotherme* ». En effet, le travail sur une isotherme fait apparaître le logarithme du rapport des volumes. Or, ni la correction 1 ni la correction 2 ne proposent ce genre de résultat.

Pourtant, on peut penser que l'auteur du rapport attend pour cette question un résultat proche de la correction 1. En effet, dans une dernière remarque relative au problème du compresseur on peut ainsi lire : « *L'égalité $w = \Delta h$, dans le cas des compresseurs calorifugés, est inconnue.* »⁹⁰⁰ Ainsi, le rapporteur de l'épreuve valide la correction 1 et non la correction 2 pourtant fidèle au sujet qui « *“regorge” de renseignements intéressants* ». L'information « *au niveau du piston* » apparaît alors comme un élément fondamental pour la résolution du problème selon les souhaits des auteurs. On ne peut en outre, rester que perplexe à la lecture de la conclusion du rapport de l'épreuve : « *Pour réussir cette épreuve, il est nécessaire de bien dominer les bases fondamentales du programme, grâce à un travail assidu.* »⁹⁰¹ « *Les candidats bien entraînés ne manquent pas d'en tirer profit.* »⁹⁰² Les tests effectués auprès des étudiants, montrent qu'un tel sujet peut aboutir à des résultats bien différents. En outre, parmi les « mauvaises » copies, on peut également imaginer qu'elles sont le résultat de travaux d'étudiants assidus et appliqués mais qui ont peut-être été déstabilisés par les indications ambiguës du sujet pour définir le système d'étude.

3. Comment résoudre le problème du compresseur ?

Compte tenu de ce que nous venons d'exposer, on peut finalement conclure que l'ambiguïté vient de la définition du système proposé par le sujet. Clairement, le système ne correspond pas à ce qui semble être les attentes du jury en ce qui concerne le bilan énergétique (Cf. Tableau 7):

⁸⁹⁹ (Faynot, 2005) p.9

⁹⁰⁰ (Faynot, 2005) p.10

⁹⁰¹ (Faynot, 2005) p.11

⁹⁰² (Faynot, 2005) p.8

Système suggéré	Bilan
{masse m de gaz}	$W_{tot} = \Delta U$
{cylindre} ou {masse m de gaz au niveau du piston}	$W_{tot} = \Delta H$ (Attente du jury ?)

Tableau 7 Tableau bilan du sujet « compresseur »

Les indications « au niveau du piston » ne définissent en rien le système thermodynamique et n'éclairent en rien le choix de celui-ci. En effet, à la lumière de la définition donnée à un système thermodynamique cette information ne change pas le fait que le système proposé est la {masse m de gaz}.

La question est donc : comment doit être présenté le sujet pour que l'étudiant aboutisse au résultat donnant « l'égalité $w = \Delta h$ » ? Lorsque le rapporteur annonce que « La détermination de l'expression du travail massique w , reçu par l'unité de masse de fluide ayant transité dans le compresseur, est délicate »⁹⁰³ ; il devrait poursuivre en ajoutant : “car le système d'étude reste ambigu. Il est donc difficile d'estimer les transferts d'énergie par travail !”

On voit donc ici toute la difficulté du problème : exposer clairement un énoncé en choisissant clairement le système d'étude pour amener l'étudiant au but souhaité. Ainsi, le sujet du compresseur peut être traité avec le système {masse m de gaz}, sans insister sur la notion « au niveau du piston ». Dans ces conditions, le résultat attendu serait proche de la correction 2. Comment aboutir alors à une résolution aboutissant à la correction 1 : c'est-à-dire à un bilan pour lequel le travail sur un aller-retour est la variation d'enthalpie du gaz ? C'est ce que nous proposons de faire dans la suite de ce paragraphe en proposant trois corrections distinctes suivant le choix du système.

a. Le compresseur un problème de mécanique

Une des réponses possibles réside dans le fait que le problème du compresseur peut être présenté finalement comme un problème de mécanique et non pas comme un problème de thermodynamique. On pourrait alors exposer le sujet du point de vue de la mécanique galiléenne en choisissant un système au sens mécanique du terme tel que le {piston} du compresseur subissant un aller-retour.

Ainsi, lors de la première étape, le travail des forces au niveau du piston est calculé en prenant en compte le travail des forces de pression qu'exerce le gaz parfait dans le réservoir R_1 à la

⁹⁰³ (Faynot, 2005) p.10

pression P_1 sur le piston de section S et le travail des forces de pression due à l'atmosphère ambiante à la pression P_{atm} . (Cf. Figure 67)

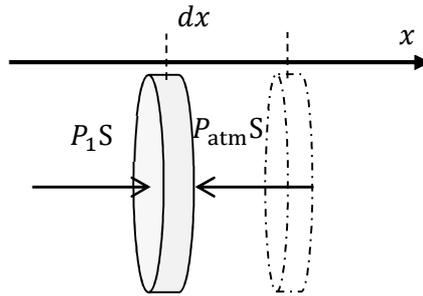


Figure 67 Représentation schématique du piston du cylindre soumis au gaz parfait à la pression P_1 et à la pression atmosphérique P_{atm}

La pression P_1 du réservoir R_1 exerce sur le piston une force élémentaire sur un élément de surface $d\vec{S}$ telle que :

$$d\vec{F}_1 = -P_1 d\vec{S} = +P_1 dS\vec{e}_x$$

De même, la force élémentaire qu'exerce la pression P_{atm} sur un élément de surface du piston est:

$$d\vec{F}_{atm} = -P_{atm} dS\vec{e}_x$$

Les pressions étant *a priori* constantes sur l'ensemble de la surface S du piston, on peut intégrer directement le résultat précédent, donnant la résultante des forces :

$$\vec{F} = (P_1 - P_{atm})S\vec{e}_x$$

Si on note $x = 0$ la position initiale du piston (formant un volume nul dans le cylindre), la force \vec{F} provoque le déplacement du piston d'une distance (algébrique) dx . Le travail qui est alors fourni au piston est :

$$\delta W_{pI} = +(P_1 - P_{atm})S\vec{e}_x \cdot dx \cdot \vec{e}_x = (P_1 - P_{atm})dV$$

Avec $dV = Sdx$ le volume balayé par le piston. Ainsi, pour accueillir la masse m de gaz occupant un volume V_1 à la température T_1 , le travail vaut :

$$W_{pI} = \int_0^{V_1} (P_1 - P_{atm})dV = P_1V_1 - P_{atm}V_1$$

Avec la même démarche on aboutit au travail suivant l'étape III : le travail transféré par le piston pour refouler un volume V_2 de gaz à la pression P_2 (et à la température T_2) vaut :

$$W_{pIII} = P_{atm}V_2 - P_2V_2$$

Pour l'étape II, cette fois, le {piston} doit fournir un travail au gaz pour réduire le volume de ce dernier de V_1 à V_2 et augmenter sa pression de P_1 à P_2 . En tenant compte de l'action de la pression atmosphérique, on peut estimer que le travail qui est alors fourni par le piston au gaz dont la pression à un instant donné est notée P , est :

$$W_{pII} = \int_{V_1}^{V_2} (P - P_{atm})dV = -P_{atm}(V_2 - V_1) + \int_{V_1}^{V_2} PdV$$

En utilisant la relation de Laplace $PV^\gamma = C^{te}$ sur la transformation II (adiabatique et réversible d'un gaz supposé parfait) pour exprimer la pression du gaz, on aboutit à :

$$\int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} C^{te} \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{P_1 V_1 - P_2 V_2}{\gamma - 1} = \frac{m}{M} R(T_1 - T_2) = -(U_2 - U_1) = -\Delta U_{1 \rightarrow 2}$$

Où $\Delta U_{1 \rightarrow 2}$ représente la variation d'énergie interne du gaz supposé parfait lors de la transformation II. Soit :

$$W_{pII} = -P_{atm}(V_2 - V_1) - \Delta U_{1 \rightarrow 2}$$

Ainsi sur un aller-retour du fonctionnement du compresseur, on peut donner l'expression du travail total échangé par le piston :

$$W_{p_{tot}} = W_{pI} + W_{pII} + W_{pIII}$$

$$W_{p_{tot}} = P_1 V_1 - P_{atm} V_1 - P_{atm}(V_2 - V_1) - \Delta U_{1 \rightarrow 2} + P_{atm} V_2 - P_2 V_2 = -(H_2 - H_1) = -\Delta H_{1 \rightarrow 2}$$

Où $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$ représente la variation d'enthalpie du gaz supposé parfait entre l'état (P_1, V_1, T_1) et (P_2, V_2, T_2) . Ce travail est effectivement échangé avec le gaz qui reçoit en définitive un travail égal à sa variation d'enthalpie : $+\Delta H$.

On remarque que sur l'aller-retour, l'action de la pression atmosphérique n'intervient pas. On peut alors comprendre pourquoi elle n'est pas présentée dans ce sujet relatif au compresseur.

Nous venons donc de montrer que le problème peut se résoudre dans un cadre purement mécanique, en utilisant un système d'étude qualifié de système mécanique qui est le {piston}. L'exercice est ainsi résolu avec une solution correspondant probablement aux souhaits des auteurs et du rapporteur du sujet, sans faire de bilans thermodynamiques à proprement parler.

Nous proposons de voir dans le prochain paragraphe, qu'il peut exister un autre choix de système donnant un résultat similaire. Ce choix fait notamment appel à un système prenant en compte la masse m de gaz dans le cylindre et le piston.

b. Un autre choix de système pour résoudre le problème du compresseur

Nous proposons dans ce paragraphe de définir un système comprenant à la fois le gaz et le piston. Le choix de ce système vient du fait que les auteurs du sujet insistent fortement dans l'énoncé à réaliser les bilans sur la « *masse m de gaz au niveau du piston* ».

Aussi, en suivant au pied de la lettre cette recommandation, nous proposons la résolution du problème du compresseur en choisissant le système {gaz parfait dans le cylindre + piston}. Il s'agit d'un système thermodynamique particulier puisque le gaz dans le cylindre voit sa masse augmenter (respectivement diminuer) au cours de l'admission (respectivement du refoulement). Aussi, on dira que le système est ouvert. En outre, le piston est à chaque instant en équilibre mécanique, puisque le problème étudie la « *compression réversible* » (Cf. sujet en Annexe n°2). Sur ce système s'applique donc deux forces : la force due à la pression atmosphérique P_{atm} et une

force f appliquée par l'opérateur pour maintenir en équilibre mécanique le piston en chaque instant. On se ramène ainsi à la Figure 68 pour l'étape I d'admission :

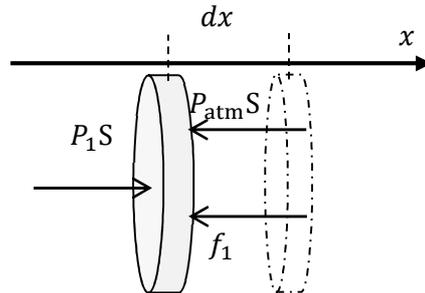


Figure 68 Représentation schématique des forces s'appliquant sur le système masse de gaz dans le cylindre + piston

Il s'agit alors de calculer le travail total W_I lors de cette étape d'admission qui est le travail extérieur au système. La force due à l'action de pression du gaz à P_1 étant à l'intérieur du système, elle n'est donc pas prise en compte dans la réalisation du bilan. On a donc :

$$\delta W_{pI} = -(P_{atm}S + f_1)\vec{e}_x \cdot dx \cdot \vec{e}_x = -(P_{atm}S + f_1)dx$$

$$W_I = - \int_{x=0}^{x=x_1=\frac{V_1}{S}} (P_{atm}S + f_1) dx$$

Or, comme le piston est en équilibre mécanique à chaque instant, le travail de ces forces extérieures est nécessairement compensé par le travail des actions de pression du gaz à P_1 (tel que la somme des travaux (intérieur et extérieur) soit nulle). Aussi,

$$W_I = - \int_{x=0}^{x=\frac{V_1}{S}} (P_{atm}S + f_1) dx = - \int_{x=0}^{x=\frac{V_1}{S}} P_1 S dx$$

Ainsi, le travail transféré au niveau du système {gaz dans le cylindre+piston} lors de l'admission vaut : $W_I = -P_1 V_1$.

On peut reprendre un raisonnement similaire pour l'étape de refoulement (étape III) en s'appuyant sur un schéma identique à la Figure 68 et en faisant intervenir une force de l'opérateur notée f_3 . On a donc :

$$W_{III} = - \int_{x=\frac{V_2}{S}}^{x=0} (P_{atm}S + f_3) dx = - \int_{x=\frac{V_2}{S}}^{x=0} P_2 S dx$$

Ainsi, le travail transféré au niveau du système {gaz dans le cylindre+piston} lors du refoulement vaut : $W_{III} = +P_2 V_2$.

Enfin, lors de l'étape II de compression, la démarche peut à nouveau être reprise, en désignant cette fois par f_2 la force de l'opérateur et par P la pression du gaz dans le cylindre. On a, d'après l'équilibre mécanique du piston :

$$W_{II} = - \int_{x=\frac{V_1}{S}}^{x=\frac{V_2}{S}} (P_{atm}S + f_2) dx = - \int_{x=\frac{V_1}{S}}^{x=\frac{V_2}{S}} PSdx$$

Or, le travail $= - \int_{x=\frac{V_1}{S}}^{x=\frac{V_2}{S}} PSdx$ fourni par le gaz parfait contenu dans le cylindre (de masse m désormais constante puisque l'étape d'admission est terminée) s'identifie à la variation d'énergie interne par application du premier principe à un système fermé en évolution adiabatique :

$$\Delta U_{1 \rightarrow 2} = - \int_{x=\frac{V_1}{S}}^{x=\frac{V_2}{S}} PSdx$$

Ainsi, le travail transféré au niveau du système {gaz dans le cylindre+piston} lors de l'étape II de compression adiabatique, vaut avec les notations de l'énoncé : $W_{II} = \Delta U_{1 \rightarrow 2} = U_2 - U_1$.

Sur un aller-retour de fonctionnement du compresseur, on peut donner l'expression du travail total échangé par le système {gaz dans le cylindre+piston} :

$$W_{tot} = W_I + W_{II} + W_{III}$$

$$W_{tot} = -P_1 V_1 + \Delta U_{1 \rightarrow 2} + P_2 V_2 = (H_2 - H_1) = \Delta H_{1 \rightarrow 2}$$

Où $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$ représente la variation d'enthalpie du gaz supposé parfait entre l'état (P_1, V_1, T_1) et (P_2, V_2, T_2) . Encore une fois, on retrouve le résultat attendu et on remarque que sur l'aller-retour, l'action de la pression atmosphérique n'intervient pas, ni celle de l'opérateur extérieur.

A travers ce second exemple, nous venons de montrer que le problème du compresseur peut se résoudre en insistant sur l'importance du piston, comme cela est suggéré dans le sujet. Mais, encore une fois, nous avons fait appel à des considérations mécaniques pour établir le bilan. Nous proposons dans la suite, un dernier système pour résoudre le problème. Mais cette fois, ce système sera un système purement thermodynamique.

c. Le compresseur un problème de thermodynamique

Régulièrement traité dans le cadre des bilans d'énergie en thermodynamique, le problème du compresseur peut se résoudre comme nous l'avons vu, dans un cadre purement mécanique. Mais, le choix d'un système approprié permet de répondre au problème en ne faisant appel qu'à des considérations thermodynamiques. C'est le cas de la résolution que nous proposons désormais. On définit le système constitué du gaz parfait dans l'ensemble du réservoir R_1 , du gaz parfait dans l'ensemble du réservoir R_2 et du gaz contenu dans le cylindre (c'est-à-dire quand celui-ci est non vide). L'ensemble constitue donc un système *composite* fermé. On note pour les besoins de la rédaction, V_{0_1} (respectivement V_{0_2}) le volume du réservoir R_1 (respectivement R_2) contenant le gaz parfait à (P_1, T_1) (respectivement à (P_2, T_2)).

Ainsi, durant l'étape I d'admission, la force due à la pression P_1 permet la détente isobare du gaz du réservoir R_1 d'un volume V_{0_1} à un volume $V_{0_1} + V_1$, où V_1 est le volume du cylindre du

compresseur. (Il n'existe pour le moment aucun travail au niveau du réservoir R_2). Aussi, le travail durant l'étape I s'écrit :

$$W_I = - \int_{V_{0_1}}^{V_{0_1}+V_1} P_1 dV = -P_1[(V_{0_1} + V_1) - V_{0_1}] = -P_1 V_1$$

De la même façon, durant l'étape III de refoulement, la force due à la pression P_2 permet la compression isobare du gaz du réservoir 2 d'un volume $V_{0_2} + V_2$ à un volume V_{0_2} , où V_2 est le volume du cylindre du compresseur. (Il n'existe aucun travail au niveau du réservoir R_1). Aussi le travail durant l'étape III s'écrit :

$$W_{III} = - \int_{V_{0_2}+V_2}^{V_{0_2}} P_2 dV = -P_2[V_{0_2} - (V_{0_2} + V_2)] = +P_2 V_2$$

Durant l'étape II, on peut appliquer le premier principe sur le système fermé défini plus haut. Or, comme la transformation est globalement adiabatique on peut écrire que :

$$\Delta U_{tot} = W_{II}$$

On peut en outre, scinder l'expression de ΔU_{tot} en la somme des ΔU de chaque sous-système :

$$\Delta U_{tot} = \Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_1} + \Delta U_{1 \rightarrow 2} + \Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_2}$$

Avec $\Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_1}$ la variation d'énergie interne du gaz dans le réservoir R_1 d'un volume V_{0_1} . Or, cette variation est nulle car ce gaz ne subit pas de transformation : $\Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_1} = 0$.

De même, $\Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_2}$ est la variation d'énergie interne du gaz dans le réservoir R_2 d'un volume V_{0_2} . Cette variation est nulle elle aussi, car ce gaz ne subit pas non plus de transformation : $\Delta U_{1 \rightarrow 2}^{R_2} = 0$. Ainsi, on aboutit pour le système considéré :

$$W_{II} = \Delta U_{1 \rightarrow 2}$$

Avec $\Delta U_{1 \rightarrow 2}$ la variation de l'énergie interne du gaz parfait dans le cylindre du compresseur.

Sur un aller-retour de fonctionnement du compresseur, on peut donner l'expression du travail total échangé par le système {gaz dans R_1 , gaz dans R_2 et gaz dans le cylindre} :

$$W_{tot} = W_I + W_{II} + W_{III}$$

$$W_{tot} = -P_1 V_1 + \Delta U_{1 \rightarrow 2} + P_2 V_2 = (H_2 - H_1) = \Delta H_{1 \rightarrow 2}$$

Où $\Delta H_{1 \rightarrow 2}$ représente la variation d'enthalpie du gaz supposé parfait entre l'état (P_1, V_1, T_1) et (P_2, V_2, T_2) .

On retrouve ainsi le résultat attendu mais cette fois à partir d'un système thermodynamique et en appliquant l'expression du travail des forces pressantes et le premier principe de la thermodynamique sur un système fermé.

d. Bilan sur le problème du compresseur

Nous venons de montrer que plusieurs choix de systèmes peuvent convenir pour résoudre le problème du compresseur et pour retrouver le résultat que le travail utile (i.e. en dehors du travail des forces de pression) se ramène à la variation d'enthalpie durant l'étape de compression adiabatique. Aussi, ce problème du compresseur peut être une bonne illustration pour montrer

que le choix du système n'est pas unique mais est essentiel pour la bonne réalisation des bilans, comme le soulignait Roulet dans son article du BUP de 1981 (Cf. Chapitre 5)⁹⁰⁴.

Il aurait été possible d'étudier également les corrections proposées dans le *Thermodynamique* de Pérez ou dans le *Physique Sup. PCSI* de Grécias et *al.* Cependant, beaucoup de remarques sont en fait redondantes vis-à-vis de ce que nous avons déjà présenté : problème de la définition du système⁹⁰⁵, résultats parachutés⁹⁰⁶ *etc.*

En outre, on peut remarquer que le compresseur fonctionnant par cycles sur un aller-retour, ne constitue pas une *machine thermique*. En effet, il ne s'agit en aucun cas d'une transformation cyclique d'un même fluide. Or, on remarque que Pérez propose dans la présentation du compresseur le nom de « *machine thermique ouverte* »⁹⁰⁷ sans préciser de quoi il s'agit. Pourtant, cette appellation n'a aucun sens au niveau thermodynamique. Un système thermodynamique peut être un système ouvert mais en aucun cas une machine. En effet, celle-ci peut être constituée d'éléments possédant une entrée et une sortie de matière et dans lesquels un fluide s'écoule (comme c'est le cas du compresseur, par exemple dans un réfrigérateur), mais le fluide parcourant l'ensemble de la machine thermique constitue un système fermé.

IV. CONCLUSION

La notion de *système* ou de *système thermodynamique* est un concept à la fois courant et ambigu. Mais, comme le suggèrent Lemaignan et *al.*, « *au sens physique du terme, un système ne constitue pas une donnée d'expérience. On ne peut pas montrer des systèmes : on ne peut qu'en construire au sens intellectuel du terme.* »⁹⁰⁸

L'apparition du concept de système est tardive dans les programmes de thermodynamique puisqu'elle y est présente qu'à compter de 1957 dans le secondaire à travers les bilans énergétiques et 1968 dans le supérieur (CPGE) dans l'introduction du cours de thermodynamique (Cf. chapitre

⁹⁰⁴ On peut en outre ajouter une quatrième possibilité de choix du système. En effet, la correction 2 (Cf. Annexe n°2) proposée dans le paragraphe précédent choisit comme système la masse m de gaz. Mais, ce choix de système, comme nous l'avons vu, aboutit à un travail égal à la variation de l'énergie interne du gaz lors de la compression et non à la variation d'enthalpie.

⁹⁰⁵ Exemple dans (Pérez, 1997) p.217 « *reçu par le fluide* » ou « *reçu par la masse considérée de fluide de la part du fluide qui reste dans R_1* » *etc.*

⁹⁰⁶ Exemple dans (Grécias, et al., 1999) p.682, où les bilans énergétiques sont présentés sans jamais faire référence au système étudié.

⁹⁰⁷ (Pérez, 1997) p.216. On peut également noter que Grécias et *al.* emploient également le mot *machine* pour désigner le compresseur, mais ne la qualifient pas de thermodynamique. (Grécias, et al., 1999) p.681

⁹⁰⁸ (Lemaignan, et al., 1993) p.56

4). Mais, les compétences exigibles sur ce concept ne sont finalement que de le qualifier (isolé, ouvert *etc.*) suivant la nature des échanges. Ce sont au final, les ouvrages qui, à partir des années 1960, insistent sur l'importance de ce concept. Mais, le système thermodynamique possède une définition non générale et chaque auteur apporte un élément de réponse. Si nous avons tenté d'en donner des propriétés essentielles, il est difficile d'arrêter cette proposition comme définitive et nous sommes obligés de nous rapprocher des remarques proposées notamment par Kastler dans la cinquième édition du Bruhat de thermodynamique.

La critique première qui pourrait être faite au travail que nous venons d'exposer est la suivante : « *Est-il nécessaire de donner une définition précise au système thermodynamique avec des critères et des propriétés qu'il doit respecter ?* »⁹⁰⁹ sachant comme le suggèrent Faroux et *al.*, qu' « *une grande souplesse existe dans la définition du système* »⁹¹⁰ . Les partisans du non pourraient répondre comme Cengel et *al.*, qu' « *il n'existe pas de règles précises pour définir [un volume de contrôle]. Néanmoins, un volume de contrôle choisi de manière astucieuse peut simplifier considérablement l'analyse* »⁹¹¹. Ou encore, comme Dudeck en 1993 : « *un système thermodynamique est une "collection d'objets sur laquelle on porte son attention"* »⁹¹²

Combien d'étudiants ont entendu ou combien d'enseignants de thermodynamique ont dit, que choisir un système en thermodynamique est « *intuitif* », « *dépendant du problème à résoudre* » ou encore « *fonction de la question* ». Mais, cette « *astuce* », cette « *intuition* », comment la transmettre à l'étudiant ? Cette part de subjectivité n'engendre-t-elle pas une difficulté pour les étudiants (mais aussi pour les enseignants) lors de la résolution des problèmes de thermodynamique ?

La réponse est ici clairement oui ! Comme nous l'avons illustrée sur l'exemple de concours, la résolution d'un problème de thermodynamique dépend du système choisi. Les transferts, (en signe et en intensité) sont évalués relativement au système défini. Et les attentes des jurys peuvent être très différentes des résultats donnés par les étudiants, suivant la nature du système choisi. Ainsi, comme le font déjà de nombreux ouvrages, il paraît essentiel de définir un système thermodynamique, en donnant ses caractéristiques. Mais, il est également important d'appliquer ces définitions lors des résolutions de problèmes en le choisissant clairement et en effectuant les bilans qui correspondent au système réellement préféré. Ce travail, comme le suggère Roulet dans le bulletin de l'union des physiciens de 1981, doit être réalisé avec l'étudiant et ce dernier doit être capable de savoir que plusieurs choix de systèmes sont possibles pour résoudre un problème de thermodynamique. Mais, force est de constater que ce travail n'est pas réalisé. C'est donc un constat douloureux pour l'enseignement de la thermodynamique qui est fait ici. On pourrait alors reprendre la remarque que faisait Bouasse déjà en 1913 : « *vingt ans de professorat à la Faculté*

⁹⁰⁹ Cette remarque a été faite par certains intervenants lors d'une présentation de ces travaux de recherche en décembre 2013, lors de la journée des doctorants du CHSE, Lille1

⁹¹⁰ (Faroux, et al., 2002) p.2

⁹¹¹ (Cengel, et al., 2009) p.7

⁹¹² (Dudeck, 1993) p.11

*m'ont appris que les étudiants ne comprennent généralement pas même l'énoncé des questions qu'il étudient. »*⁹¹³

Le concept de système thermodynamique est apparu dans le vocabulaire du physicien pour distinguer les grandeurs internes caractéristiques du système et les grandeurs de transfert. C'est ce point qui va nous intéresser maintenant avec notamment les transferts d'énergie par chaleur. Nous avons déjà signalé au cours de notre étude les ambiguïtés et amalgames qui sont liés à ce concept, notamment à cause de son histoire. Mais, au cours des années 1990 le mot chaleur subit une modification de dénomination (1995 dans le supérieur et 2001 dans le secondaire) et devient *transfert thermique*. Avec l'étude du chapitre 6, nous avons déjà montré que l'introduction de ce mot n'a pas fait disparaître des livres, ni des autres programmes de sciences, le mot *chaleur*. Aussi, nous nous proposons dans la suite de présenter les différentes définitions sur le concept de chaleur que l'on peut trouver dans les ouvrages du supérieur. Après une analyse de ces propositions, nous étudierons la présence du concept de chaleur dans les épreuves officielles telles que les sujets de concours aux grandes écoles ou les concours de recrutement des enseignants. Enfin, nous exposerons les résultats d'une étude que nous avons menée auprès d'étudiants, pour comprendre leur perception des concepts de chaleur, température et transfert thermique.

⁹¹³ (Bouasse, 1913b) p.XIV

CHAPITRE 8

LE CONCEPT DE *CHALEUR* A COMPTE DES ANNEES 1990⁹¹⁴

I. UN PREMIER CONSTAT : CONFUSION CHALEUR, TEMPERATURE ET ENERGIE

La composition qui suit est le fruit d'un nombre important de recherches dans des ressources bibliographiques et webographiques les plus variées dans le domaine de la thermodynamique classique notamment. Au fur et à mesure des avancées, nous avons eu l'occasion de rencontrer des articles qui ont contribué à construire ce travail aujourd'hui présenté. Une notion est apparue régulièrement comme une difficulté majeure de l'enseignement de la thermodynamique : la notion de *chaleur*. Cette grandeur qui est présentée progressivement au cours du 20^{ème} siècle comme un des modes de transfert de l'énergie, et rebaptisée fin des années 90, *transfert thermique*, (Cf. Chapitre 6) est souvent confondue avec l'énergie interne (notamment avec la partie cinétique de celle-ci). Mais de manière plus courante, peut-être à cause du langage quotidien ou de notre ressenti, la chaleur se confond avec le concept de température. Or, cette notion de température, comme l'a montré Michel Bruneaux dans son article de 1984, *La*

⁹¹⁴ Le travail qui suit a notamment été présenté lors d'une conférence dans le cadre du Plan Académique de Formation (P.A.F.) intitulé : « *Questions de physique abordées par l'histoire des sciences et la didactique* », (Lille, 9 avril 2015)

thermodynamique une science à reformuler, est elle-même un concept difficile à introduire en physique. Car, si elle est présente dans la vie de tous les jours, elle reste une grandeur que l'on atteint uniquement par un phénomène physique qui en est dépendant (dilatation des liquides pour les thermomètres à alcool ou mercure, modification de la résistance pour les sondes de platine *etc.*) Ce problème engendre depuis longtemps, un réel handicap dans l'enseignement et l'apprentissage de la thermodynamique. Comme le présente Bruneaux en 1984, « *les étudiants titulaires d'un baccalauréat scientifique ou technique confondent les différents concepts énergétiques. Soixante-dix pour cent des étudiants entrant dans un département Génie thermique et Énergie d'IUT, devant la question : qu'est-ce que la température ? répondent : c'est une quantité de chaleur !* »⁹¹⁵

1. Un constat dans des documents d'accompagnement

a. Un constat dans les dictionnaires

Cette confusion est également reprise dans les outils sémantiques de base que sont les dictionnaires. Les définitions des termes *chaleur* et *température* dans les dictionnaires de référence comme Le Robert ou Larousse, sont présentées dans le Tableau 8.

Il apparaît clairement que, dans les définitions proposées, le concept de température renvoie à celui de chaleur et inversement. Par ailleurs, les définitions font appel à nos sensations, bien que celles-ci soient trompeuses. On soulignera également que l'expression « *degré de chaleur* » pour désigner la température, contribue d'autant plus à la confusion. Certes, il ne s'agit pas d'ouvrages de spécialité, mais force est de constater que les deux notions restent intimement interdépendantes dans une utilisation courante. On remarque en outre, que les deux dictionnaires signalent un sens particulier de la chaleur en sciences physiques. Mais, la définition proposée n'est pas rigoureuse. En effet, la chaleur n'est pas un « *phénomène physique qui se transmet* » mais est un phénomène de transfert. Par ailleurs, on constate un amalgame entre le concept de transfert d'énergie et celui d'énergie à travers l'expression « *forme d'énergie* » pour désigner la chaleur. Enfin, l'affirmation selon laquelle « *l'augmentation [de chaleur] se traduit notamment par l'élévation de la température* » n'est exacte que dans des conditions expérimentales précises (par exemple en l'absence de travail). Dans le cas contraire, il apparaît une nette confusion entre chaleur et énergie interne.

⁹¹⁵ (Bruneaux, 1984) pp.88-89

	Température	Chaleur
Le Robert ⁹¹⁶	<p>1- Degré de chaleur ou de froid de l'atmosphère en un lieu.</p> <p>2- Chaleur du corps : prendre sa température avec un thermomètre</p> <p>3- Chaleur excessive de l'organisme : avoir, faire de la température (fièvre)</p>	<p>1- Température plus ou moins élevée de la matière (par rapport au corps humain) ; sensation produite par un corps chaud. Température de l'air qui donne à l'organisme une sensation de chaud.</p> <p>2- En sciences : Phénomène physique qui se transmet et dont l'augmentation se traduit notamment par l'élévation de la température.</p>
Larousse ⁹¹⁷	<p>1- grandeur physique qui caractérise de façon objective la sensation subjective de chaleur ou de froid laissée par le contact d'un corps</p> <p>2- Degré de froid ou de chaleur d'un corps</p>	<p>1- Qualité, de ce qui est chaud, Température élevée d'un corps, d'un lieu. – Sensation que donne un corps chaud.</p> <p>2- Une forme d'énergie qui élève la température ou par un changement d'état dilate, fait fondre ou décompose les corps</p>

Tableau 8 Illustration des définitions de chaleur et de température dans des dictionnaires usuels français

Aussi, le mot chaleur semble désigner deux notions distinctes. Dans son “sens commun”, la chaleur est intimement liée à la température. Dans son “sens scientifique” la chaleur est liée à l'énergie. Le dictionnaire ne semble donc pas l'outil adapté pour lever les ambiguïtés sur ces notions d'autant qu'il apparait comme générant de graves confusions. Il est donc nécessaire de se tourner vers les documents spécialisés en thermodynamique.

b. Un constat à travers certains supports à destination de l'enseignement de la thermodynamique

Parmi les documents de spécialité, les textes d'accompagnement des enseignements semblent des supports privilégiés. Pourtant, dans un rapport datant de 2009 provenant du milieu

⁹¹⁶ (Le Robert, 1991) p. 1000 et p.154

⁹¹⁷ (Le Petit Larousse, 1996) p.997 et p.203

de l'enseignement francophone⁹¹⁸, que nous avons pu croiser aux cours de nos recherches, nous pouvons mettre en lumière que ces amalgames précédemment soulignés sont aussi bien présents. En effet, parmi toutes les références consultées, celle-ci a particulièrement retenu notre attention. Ce document, intitulé *La propagation de la chaleur : Un outil à l'usage des enseignants pour favoriser une continuité des apprentissages en sciences lors de la liaison primaire secondaire*, se présente comme le résultat d'un travail de collaboration entre des enseignants du fondamental et du premier degré du secondaire ainsi que des chercheurs en didactique des sciences. Le document est en grande partie un recueil d'activités pédagogiques à réaliser en classe. Plusieurs structures de séquences d'enseignement y sont également présentées. Dans ce développement, un paragraphe à destination des enseignants, intitulé « *Recul théorique pour l'enseignant. Chaleur et température* », est proposé. (Cf. Figure 69)

RECU L THEORIQUE POUR L'ENSEIGNANT
Chaleur et température

La chaleur caractérise l'énergie thermique qui peut être transférée d'un corps à l'autre. Ce transfert peut s'effectuer selon trois modes de propagation : la convection, la conduction et le rayonnement. Il n'existe pas de méthode directe de mesure de la chaleur. C'est la température qui est une mesure de ce contenu énergétique.

Dans l'exemple qui nous préoccupe, celui de l'air chauffé, la chaleur est la somme de l'énergie cinétique, de l'énergie de vibration et de rotation des molécules qui composent l'air. Celles-ci se déplacent à une certaine vitesse (énergie cinétique), vibrent (énergie de vibration) et tournent sur elle-même (énergie de rotation). La température de l'air est une mesure de ce contenu énergétique. Plus les molécules se déplacent rapidement plus elles s'entrechoquent, plus elles vibrent et tournent, donc plus l'énergie thermique est grande. Ainsi, le transfert d'énergie à un corps de moins grande énergie sera important. Si la température de l'air de la pièce est à 20°C, cela signifie que les molécules d'air s'agitent et se heurtent en tous sens, avec une vitesse moyenne de 500 m/s. A 100°C, cette vitesse vaudrait environ 560 m/s.

Figure 69 Extrait du document *La propagation de la chaleur : Un outil à l'usage des enseignants pour favoriser une continuité des apprentissages en sciences lors de la liaison primaire secondaire*⁹¹⁹

Dans ce texte de quelques lignes, qui se veut être une parenthèse théorique sur la thermodynamique, il est simple de constater l'ambiguïté de la définition qui peut être donnée à la chaleur. D'après le texte, la chaleur est désignée comme une « *caractéristique de l'énergie thermique* ». Ce concept d'énergie thermique n'est quant à lui pas défini. Nous avons déjà discuté au cours des chapitres précédents, des différentes significations relatives au terme *énergie*

⁹¹⁸ Rapport publié par Sabine Daro, Nadine Stouvenakers et Marie-Christine Graftiau de l'administration Générale de l'Enseignement de la Recherche Scientifique (ministère de la communauté française Belge)

⁹¹⁹ (Daro, et al., 2009) pp.11-12

thermique. Dans ce texte, fait-il référence à l'énergie cinétique microscopique, à l'énergie interne, à la chaleur elle-même *etc.* ? La réponse n'est pas donnée.

La chaleur est aussi présentée comme un « *contenu énergétique* » ou « *une somme d'énergie cinétique, de vibration et de rotation* »⁹²⁰. Dans ce cas, la chaleur apparaît clairement comme une quantité d'énergie, proche de ce qu'on reconnaît comme la partie cinétique de l'énergie interne i.e. à l'énergie cinétique microscopique. Nous avons déjà souligné cette grave confusion.

En outre, selon le texte, « *la température [...] est une mesure* » de la chaleur. Il convient de remarquer ici que le texte parle de température et non pas de variation de température pour quantifier la chaleur. Or, si la chaleur peut être reliée à la température dans le cas de transformations particulières⁹²¹, c'est non pas le relevé d'une température mais la mesure d'une *variation* de température qui permet d'accéder à la quantité d'énergie échangée par chaleur. Notons également qu'aucune remarque n'est faite au sujet des transitions de phase des corps purs. Il aurait par exemple été intéressant de souligner que lors de telles transformations, les transferts d'énergie par chaleur sont non nuls alors que la température du système reste constante. Enfin, on peut reprocher aux auteurs l'affirmation selon laquelle « *il n'existe pas de méthode directe de mesure de chaleur* ». En effet, une technique d'analyse thermique, couramment utilisée en industrie, appelée la calorimétrie différentielle à balayage⁹²², permet de mesurer les différences d'échanges d'énergie par chaleur entre un échantillon à analyser et un corps de référence.

En outre, dans le texte, la chaleur apparaît comme « *un mode de transfert de l'énergie* ». Mais, l'absence de l'introduction de la notion de système rend la lecture du document très difficile. Si, l'énergie cinétique microscopique est un contenu énergétique au sein du système, la chaleur doit apparaître comme une grandeur de transfert au niveau de l'interface de celui-ci.

Enfin, on notera également cette affirmation : « *plus les molécules se déplacent rapidement, plus elles s'entrechoquent, plus elles vibrent et tournent, donc plus l'énergie thermique est grande.* » Premièrement, on peut souligner que la notion d'énergie thermique fait ici *a priori* référence à l'énergie cinétique microscopique. Mais, comme ce terme est aussi attribué à la chaleur, un amalgame entre les termes est à nouveau présent. De plus, les auteurs présentent dans la

⁹²⁰ Nous pouvons noter également que les détails que souhaitent donner les auteurs sur le contenu de l'énergie cinétique paraissent démesurés. Tout d'abord, dans la partie microscopique de l'énergie cinétique, ce sont les degrés de liberté liés à la translation qui sont tout d'abord libérés. Puis, viennent ensuite les degrés liés à la rotation. Mais, en ce qui concerne les degrés liés à la vibration, ceux-ci ne se libèrent qu'à des températures très élevées (à titre d'exemple 6100K pour le dihydrogène (Pérez, 1997) p.51). Ils sont donc rarement comptabilisés.

⁹²¹ C'est le cas notamment d'une transformation isochore d'un gaz parfait par exemple. On peut écrire, par l'application du premier principe sur le gaz parfait, que la quantité d'énergie transférée par chaleur s'identifie à la variation d'énergie interne et donc, d'après la première loi de Joule à la variation de température $Q = \Delta U = n c_v \Delta T$,

⁹²² En anglais Differential Scanning Calorimetry (ou DSC)

description microscopique des grandeurs, une boucle de rétroaction positive. En effet, selon le texte, la température liée à la vitesse des particules augmente quand celles-ci s'entrechoquent. Leur vitesse croît, augmentant le nombre de chocs, ce qui augmente encore la température... On voit bien que cette description est clairement erronée (les chocs n'augmentent pas la température) et souligne une nouvelle fois la grande confusion dans un texte censé être un « *recul théorique pour l'enseignant* ».

Aussi, dans ce document de quelques lignes, les multiples représentations qui ont pu être attribuées à la chaleur sont abordées : à la fois énergie, température et transfert d'énergie. La maladresse du langage engendre de graves erreurs dans l'appréciation des concepts de thermodynamique. Ce document est d'autant plus important à souligner car il s'agit d'un support proposé par un public averti à destination d'un public lui aussi averti. La confusion que l'on a dans certains manuels, dans les dictionnaires *etc.* est donc également présente chez ceux qui dispensent et étudient les enseignements. Aussi, si l'ambiguïté est présente chez l'enseignant, il est normal d'en retrouver la conséquence chez les étudiants. Ces différentes propositions relatives à la chaleur répandent donc des idées fausses sur ce concept et favorisent une incompréhension totale de cette notion.

Ce document conforte également ce que suggèrent les travaux publiés en 2014 par Anakkar⁹²³ et en 1999 par Williams⁹²⁴ sur l'importance du langage dans l'enseignement des sciences. En effet, Williams souligne dans son étude sur l'impact de la sémantique dans l'enseignement de la physique, que les difficultés linguistiques ont inévitablement des répercussions dans l'enseignement : « *les raisons pour lesquelles la physique est universellement considérée comme "dure" vont au-delà de l'inévitable difficulté de ses concepts et de son association avec les mathématiques. Une partie de la difficulté, voire même une grande partie, se trouve dans le langage et la façon dont nous l'utilisons et l'enseignons.* »⁹²⁵

Un problème supplémentaire est également présent pour introduire le concept de chaleur aux élèves et étudiants. En effet, le mot chaleur et ses dérivés sont également présents dans le langage utilisé quotidiennement. C'est l'objet du prochain paragraphe.

⁹²³ (Anakkar, 2014)

⁹²⁴ (Williams, 1999)

⁹²⁵ «... *Physics is universally viewed as "hard"—reasons that go beyond the unavoidable difficulty associated with its complex concepts and inextricable association with mathematics. Part of the difficulty, perhaps even a large part, lies in language and the way we use it in the practice of physics, and in the teaching of physics* » (Williams, 1999) p.671

2. Un problème du langage quotidien

Les expressions courantes telles que « *quelle chaleur* » ou les commentaires météo comme « *vague de chaleur* », « *on parle de chaleur au-delà de 25°C* », « *excédant de chaleur d'au moins 3°* »⁹²⁶, accentuent cette confusion sur la signification de la chaleur. Chaleur et température deviennent alors subjectivement et inévitablement indissociables. Aussi, comme le soulignent Lemeignan et al., « *les mots de la langue de tous les jours, utilisés en physique, sont le plus souvent bien trompeurs.* »⁹²⁷

Or, depuis les années 1970, (Cf. chapitre 5), l'énergie est une notion très présente dans les esprits à cause de la place qu'elle occupe dans la vie quotidienne. L'ADEME qui a succédé à l'AEE, présente plusieurs campagnes de publicité au cours des années 2010 dans le cadre du programme gouvernemental « *J'éco-rénove, j'économise* », en faveur de la rénovation énergétique des logements.



Figure 70 Extrait de la publicité *J'éco-rénove, j'économise*⁹²⁸

Dans le commentaire associé à la vidéo, il est dit : « *le froid peut s'inviter chez vous à cause d'une mauvaise isolation* ». Ce « froid » est d'ailleurs illustré comme on peut le voir sur la Figure 70 par des petits personnages blancs (« fantômes »). Cette représentation pose deux problèmes de conception : premièrement la matérialisation du froid comme une entité physique et deuxièmement l'idée que le transfert d'énergie se fait des zones de basse température vers les zones de haute température ! Ce qui est contraire au deuxième principe de la thermodynamique.

⁹²⁶ D'après le texte d'un présentateur météo sur BFMTV le lundi 17 août 2015

⁹²⁷ (Lemeignan, et al., 1993) p.186

⁹²⁸ (Ministère du logement, 2013)

Cette dernière remarque met aussi en lumière les dérives qui ont émanées de ces représentations. Il est par exemple devenu courant de parler de « *production du froid* ». On retrouve notamment ce type d'expression dans des cours de thermodynamique industrielle⁹²⁹. On peut lire par exemple dans un cours de base de l'Institut International du Froid en 2006 : « *La production du froid qui consiste à absorber la chaleur contenue dans un milieu peut être obtenue suivant plusieurs modes. L'avancée technologique de nos jours qui autorise un contrôle plus précis de la température et de l'humidité permet d'améliorer la production du froid.* »⁹³⁰. Assurément, ce module est destiné à un public averti. Mais il n'en reste pas moins que la déviance du vocabulaire lié à la chaleur entraîne l'émergence de concepts incompatibles avec la thermodynamique classique, notamment. On remarquera en outre, que la chaleur est une nouvelle fois présentée comme un contenu énergétique et que les auteurs la confondent *a fortiori* avec l'énergie interne.

Comme méthode pédagogique, le support vidéo, en dehors de ces campagnes publicitaires, est aussi utilisé directement pour l'enseignement. Aussi, la chaîne Kézaco, produite par Uniciel, propose des vidéos qui ont « ... *pour vocation première, la diffusion d'une certaine culture scientifique universitaire* » comme il est annoncé dans la présentation du site. Or, dans l'illustration d'une vidéo datant de 2013, appelée *Quel est le principe du réfrigérateur ?*, le narrateur énonce : « *Il y a un transfert de chaleur de la zone chaude à la zone froide* »⁹³¹ ou encore « *L'eau enlève de la chaleur à l'environnement* »⁹³². Si dans ce document, l'erreur n'est pas aussi grossière que dans la vidéo précédente de l'ADEME, on peut noter que la chaleur est considérée comme un contenu énergétique pouvant être stockée dans un corps. La chaleur n'est pas présentée comme un transfert d'énergie mais comme une grandeur transférée !

Se pose aussi la question de l'emploi des verbes d'action « chauffer » et « refroidir ». En effet, lorsque le narrateur dit « *un climatiseur refroidit une pièce en réchauffant l'extérieur* », il existe une ambiguïté sur le sens à donner aux actions refroidir et réchauffer. Font-elles référence au fait qu'il y a un transfert d'énergie par chaleur de la pièce vers le fluide contenu dans le climatiseur (ou respectivement du fluide vers l'extérieur) ou que la température de la pièce diminue (ou respectivement la température de l'extérieur augmente) ? Ce problème de vocabulaire apparaît régulièrement chez les étudiants, notamment en ce qui concerne l'action « chauffer ». En effet, lorsqu'on chauffe un récipient d'eau par exemple sur une plaque électrique, cela signifie à la fois que l'on réalise un transfert d'énergie par chaleur de la plaque vers l'eau, mais également que l'on augmente la température de celle-ci. Cependant, si on atteint 100°C (sous pression atmosphérique), bien que l'on continue de « chauffer », la température reste constante car l'eau

⁹²⁹ On peut citer à titre d'exemple : Francis Meunier, *Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur. Énergétique. Environnement*, Dunod, Paris, 2004 ou encore Jean Desmons, *Aide-mémoire Froid industriel*, 2^e édition Dunod, Paris, 2006

⁹³⁰ (Pilatte A. IIF IIR, 2006) p.9

⁹³¹ (Beaugeois, et al., 2013)

⁹³² (Beaugeois, et al., 2013)

change d'état : l'eau liquide devient vapeur ! Aussi, les mots « chaud », « froid », « chauffer », « refroidir » *etc.* doivent être utilisés avec une grande précaution.

Enfin, il est quand même utile de souligner que les concepts en question (température, « chaleur » et énergie) ont été détournés de leur sens scientifique pour devenir encore plus familiers, comme en témoignent les expressions suivantes : « *prendre la température de l'opinion publique* », « *accueil chaleureux* », « *ami chaleureux* », « *j'ai de l'énergie aujourd'hui* » *etc.*

Cet impact du langage quotidien sur l'enseignement de la physique, notamment en thermodynamique a déjà été souligné par Bruneau en 1984 : « *Dans le cas de la thermodynamique, les représentations de la mémoire se réfèrent à des objets abstraits (concepts) : température, chaleur, énergie. De plus, ces concepts font référence à des notions intuitives chargées de subjectivité. Et ces notions intuitives de température, de chaleur et d'énergie sont différentes des concepts physiques représentés par les mêmes termes. Le même terme peut donc correspondre à des objets conceptuels définis dans l'esprit de l'enseignant et à des objets conceptuels erronés (au sens scientifique) mais fortement implantés par l'apprentissage de la vie quotidienne dans l'esprit de l'apprenant. Tout le monde comprend... mais des choses différentes.* »⁹³³

Suite à ces constats, il est nécessaire de réaliser un inventaire des définitions du concept de chaleur dans les ouvrages à destination du supérieur. Si nous avons vu que dans le secondaire la chaleur était identifiée globalement à un transfert d'énergie, malgré les erreurs de langage, qu'en est-il dans le supérieur ?

II. LES DEFINITIONS DU CONCEPT DE *CHALEUR*

1. Méthodes de recherche

Pour appréhender les difficultés du concept de chaleur, nous proposons de réaliser un inventaire sur un certain nombre d'ouvrages à destination du supérieur sur la période allant de 1990 à 2012.

Les ouvrages considérés dans cette étude sont aux nombres de 60 et comme pour l'étude faite pour la notion de système thermodynamique, il s'agit d'ouvrages de physique (45 ouvrages), de chimie (10), de biologie (1), mais aussi deux ouvrages à caractère professionnel (un ouvrage de génie industriel et un aide-mémoire pour ingénieurs) et enfin deux ouvrages pour la préparation

⁹³³ (Bruneaux, 1984) p.83

aux concours de l'enseignement. Sous le libellé « chaleur », nous désignons l'ensemble des termes s'y rapportant, comme *quantité de chaleur*, *transfert de chaleur*, *transfert calorifique*, *transfert thermique* etc. Il s'agit de relever les définitions proposées pour cette notion, comme elle est présentée dans l'ouvrage.

Parmi les ouvrages consultés, il est quand même étonnant de constater qu'il y a des auteurs (11 ouvrages parmi les 60 consultés, soit 18,3%) qui ne donnent pas la définition de la notion de chaleur⁹³⁴. Heureusement, quelques-uns d'entre eux, comme Brochard et *al.* ou Botet l'introduisent à partir de quelques exemples expérimentaux. Ainsi, peut-on lire :

« *La chaleur est une manifestation de l'énergie [...] Quand un système est en contact avec un milieu extérieur de température plus élevée, il reçoit de la chaleur, ce qui augmente son énergie interne. Ce transfert est facilement vérifiable en saisissant avec la main un objet porté à haute température.* »⁹³⁵

« *Soit un barreau cylindrique homogène, c'est-à-dire de structure uniforme, et isotrope, c'est-à-dire toutes les directions étant équivalentes. Au départ, une extrémité du barreau est à la température T , l'autre extrémité à la température $T' < T$. On suppose que les bords du cylindre sont isolés de l'extérieur (ils sont parfaitement calorifugés). On laisse évoluer le système. On constate que la température tend à s'uniformiser par transfert d'énergie qu'on appelle chaleur de l'endroit où elle est la plus basse (zone la plus froide). On dit qu'il y a conduction de la chaleur. Un transfert de chaleur se fait toujours ainsi : vers les températures les plus basses.* »⁹³⁶

Néanmoins, ces deux exemples ne peuvent suffire pour donner une définition de la chaleur. Tout d'abord, Bachelard et *al.* n'abordent que le cas d'un transfert de chaleur dans le cas où le système est en contact avec une source à température plus importante. Rien n'est dit si le système est soumis à une source à température plus basse. Quant à Botet, il limite la description au phénomène de conduction. Or, pour se faire une idée plus complète de la notion de chaleur à travers le gradient de température, il est important de souligner l'existence d'une différence de température entre deux milieux, comme le suggère par exemple Bachelier et *al.* : « *Expérimentalement, si nous mettons en contact deux corps de températures différentes, le corps chaud cède de la chaleur au corps froid qui le reçoit ; il y a échange de chaleur.* »⁹³⁷

⁹³⁴ Les onze ouvrages ne présentant pas de définition du concept de chaleur (classés par années) : (Papon, et al., 1990), (Botet, 1991), (Trouilhet, 1991), (Tuech, et al., 1995), (Oturán, et al., 1997), (Boutin, et al., 1997), (Richet, 2000), (Faverjon, 2003), (Billy, et al., 2004), (Meunier, 2004), (Brochard-Wyart, et al., 2012)

⁹³⁵ (Brochard-Wyart, et al., 2012) p 176

⁹³⁶ (Botet, 1991) p.45

⁹³⁷ (Bachelier, et al., 1991) p.41

A travers cette étude nous pouvons donc proposer une classification en quatre catégories (bien que certaines définitions auraient pu être classées dans plusieurs divisions) suivant le choix d'introduction du concept de chaleur par l'auteur via :

1. Le gradient de température, qui met notamment en évidence les effets de conduction et de convection. Par exemple : « *La chaleur est un transfert d'énergie résultant d'une différence de température entre le système et son environnement.* »⁹³⁸
2. Le travail macroscopique, qui n'est pas le seul mode de transfert d'énergie. Par exemple : « *Un transfert énergétique qui ne peut être mis sous la forme d'un travail est appelé transfert d'énergie thermique ou chaleur.* »⁹³⁹
3. Le premier principe de la thermodynamique, faisant apparaître le concept d'énergie interne. Par exemple : « *On appelle chaleur la différence entre la variation d'énergie totale entre deux instants et le travail des forces extérieures. La chaleur sera notée Q : $Q = \Delta E - W$* »⁹⁴⁰
4. Une description microscopique i.e. en faisant référence à la notion d'ordre et de désordre, par exemple : « *Mais qu'est-ce alors que la chaleur ? Dans la version classique du mouvement des particules, il s'agit d'une forme désordonnée d'énergie cinétique. Les molécules sont animées d'un mouvement incessant et entrent en collision, ce qui redistribue leur énergie cinétique.* »⁹⁴¹, ou de travail microscopique, comme par exemple : « *Les travaux des forces extérieures non conservatives sont classés en deux catégories : - Le travail de celles entraînant un mouvement macroscopique (déplacement, déformation, etc.) est appelé travail tout court et noté W . - Le travail de celles n'entraînant aucun effet mécanique macroscopique est appelé transfert thermique et noté Q .* »⁹⁴²

2. Classements et analyses des définitions

a. Les définitions de la chaleur

Voici les résultats obtenus sur les relevés des premières définitions données à la notion de chaleur dans les 49 ouvrages sur les 60 étudiés (l'ensemble des définitions est reporté en annexe n°3 de ce document) :

⁹³⁸ (Atkins, 1998a) p.37

⁹³⁹ (Balou, et al., 2004) p. 106

⁹⁴⁰ (Lorenceau, et al., 2003) p.25

⁹⁴¹ (Kondepudi, et al., 1999) pp.34-35

⁹⁴² (Cousin, et al., 2011) p.381

	Référence à un gradient de température	Référence au travail macroscopique	Référence au premier principe	Référence à une description microscopique	
Nombre d'ouvrages	10	12	15	12	
				Ordre et désordre	Travail microscopique
				8	4

Tableau 9 Classification des définitions de « chaleur » dans des ouvrages du supérieur sur la période 1990-2012

D'après le Tableau 9, on constate qu'en moyenne, les représentations associées à la chaleur sont équitablement réparties sur ces quatre catégories. Ce qui signifie que nous sommes très loin d'avoir une définition commune sur laquelle tout le monde serait d'accord. Par ailleurs, il est très utile de noter qu'une analyse minutieuse des ouvrages montre que la première approche donnée de la notion de chaleur est parfois complétée, par certains auteurs, plus tardivement dans leur ouvrage⁹⁴³. Si, généralement, une approche macroscopique est dans un premier temps privilégiée, les auteurs abordent dans la suite une description microscopique de la chaleur. En outre, on peut remarquer, encore une fois, des manquements et des ambiguïtés dans les définitions proposées. Pour illustration, nous nous proposons de reprendre quelques exemples des définitions que nous avons référencées en analysant davantage leur contenu.

Ainsi, Belorizki et *al.* donnent en 1993 la définition de chaleur à partir du gradient de température (approche macroscopique):

*« Si deux systèmes, à deux températures différentes, sont mis en contact, les chocs permettent un transfert d'énergie d'un système à l'autre jusqu'à ce que l'agitation soit en moyenne la même dans les deux systèmes. L'énergie transférée est appelée CHALEUR. Quand il n'y a plus de transfert, les deux températures sont égales et les systèmes sont en équilibre thermique. »*⁹⁴⁴

Et complètent par une description microscopique :

« Ces échanges d'énergie se font sous deux formes :

- Une forme ordonnée due à l'action des forces extérieures comme la compression d'un gaz dans un cylindre sous l'action d'un piston sur lequel on exerce une force : c'est le travail qui peut être mécanique, électrique, chimique, ...

⁹⁴³ Nous avons vu au chapitre 7 que certains auteurs procèdent de la même façon pour le concept de système.

⁹⁴⁴ (Belorizki, et al., 1992) p.58

- Une forme désordonnée qui se produit lorsque le degré d'agitation des molécules du système varie par contact avec les molécules de l'extérieur ou d'un autre système : c'est la chaleur. »⁹⁴⁵

On remarque en outre, une ambiguïté dans la définition proposée. En effet, la chaleur apparaît, selon les auteurs, comme une grandeur de transfert d'énergie entre deux systèmes. On note également que les auteurs n'insistent malheureusement pas suffisamment sur l'intérêt de l'interface lors du transfert (Cf. chapitre 7). Les grandeurs de transfert sont caractéristiques de la surface d'échange, les grandeurs énergétiques sont caractéristiques de l'intérieur du système. L'affirmation deviendrait alors « *les chocs au niveau des interfaces des systèmes permettent un transfert d'énergie d'un système à l'autre jusqu'à ce que l'agitation au sein des systèmes soit en moyenne la même dans les deux systèmes.* »

En outre, la phrase « *L'énergie transférée est appelée CHALEUR* » est construite de telle façon qu'elle laisse sous-entendre que la chaleur est un contenu énergétique et non pas le transfert en lui-même. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe III de ce chapitre en soulignant notamment les conséquences pour les étudiants.

Un autre exemple, cette fois dans l'ouvrage de Hulin et al. de 1994, la chaleur est introduite à travers le travail macroscopique :

« *Le travail, en thermodynamique (contrairement à la mécanique), ne suffit pas à décrire tous les échanges d'énergie possibles entre un système et son environnement. Par définition, le "reste" sera dénommé chaleur.* »⁹⁴⁶

Puis la définition est précisée en faisant intervenir un aspect microscopique :

« *... la chaleur correspond à un transfert d'énergie intervenant au niveau microscopique, indépendamment de déplacements de matière appréciables à notre échelle, et résulte de l'existence d'une agitation thermique permanente des molécules. On peut dire que le travail mécanique correspond à un transfert d'énergie "ordonnée" dû au déplacement en bloc de l'édifice moléculaire que constitue la paroi, la chaleur à un transfert d'énergie "désordonnée" sans mouvement d'ensemble.* »⁹⁴⁷

Aussi, dans cette définition, la chaleur apparaît bien comme un transfert d'énergie distinct du travail, notamment au niveau microscopique. En outre, l'intérêt de l'interface du système est clairement souligné. Mais, comme nous l'avons déjà signalé au Chapitre 5, les adjectifs « ordonnée » et « désordonnée », trop qualitatifs et en plus trop familiers, ne peuvent suffire à distinguer objectivement chaleur et travail. En effet, dans l'enseignement de la thermodynamique, le sens de désordre est souvent utilisé comme un outil pour décrire l'entropie (nous traiterons de ce concept dans le Chapitre 9). Il n'est donc pas étonnant de trouver dans les manuels ou

⁹⁴⁵ (Belorizki, et al., 1992) p.63

⁹⁴⁶ (Hulin, et al., 1994) p.23

⁹⁴⁷ (Hulin, et al., 1994) p.24

d'entendre parfois que l'*entropie* permet de mesurer le degré de désordre ou que ce dernier est désigné par une quantité appelée *entropie*. Afin de trouver un sens à ces mots, il faut les relier au nombre de micro-états ou multiplicité. Baierlein montre, en 1994 dans un article de *American Journal of Physics*⁹⁴⁸, que ce lien devient clair avec l'introduction de la notion de corrélation comme un intermédiaire conceptuel (Ordre ↔ corrélations fortes ↔ multiplicité faible ; désordre ↔ absence de corrélations ↔ multiplicité grande).

Enfin, dans un dernier exemple emprunté à Ménétrie et *al.*, le transfert thermique est présenté à travers le premier principe :

« L'énergie totale $E_{totale} = E_m + U$ ($E_m =$ énergie mécanique, $U =$ énergie interne) de la règle a cette fois diminué bien qu'il n'y ait eu aucun travail échangé avec l'extérieur. Il faut donc, en plus du travail des forces extérieures, ajouter un terme de transfert énergétique « invisible ». On l'appelle transfert thermique noté Q . »⁹⁴⁹

La définition est ensuite à nouveau complétée par une approche microscopique

« Le transfert thermique est un terme d'échange énergétique qui rend compte des travaux des forces microscopiques exercées par les particules du milieu extérieur sur celles du système. »⁹⁵⁰

Pour ces définitions, plusieurs points sont à souligner. Premièrement, on peut remarquer ce que l'on peut considérer comme une erreur dans la définition de l'énergie totale. En effet, elle apparaît comme la somme de l'énergie mécanique et l'énergie interne, ce qui impliquerait de comptabiliser deux fois les énergies potentielles d'interactions (intérieures au système). Nous avons déjà eu l'occasion de soulever ce problème précédemment (Cf. Chapitres 5 et 6). Au-delà de ce point, on peut souligner l'utilisation par les auteurs du qualificatif « invisible » pour distinguer les transferts par travail des transferts par chaleur. Cet adjectif maladroit, voire erroné, est employé ici probablement dans une vision très restrictive des transferts. En effet, on pourrait interpréter cette phrase comme le fait que les transferts par travail ont des conséquences uniquement macroscopiques (déplacement, variation de volume) alors que les transferts par chaleur se résument à engendrer une évolution de température du système. Mais, nous avons déjà souligné le caractère réducteur de cette représentation (Cf. Chapitre 6). Des transferts par chaleur peuvent avoir pour conséquences des modifications du volume du système par exemple, et les transferts par travail des effets invisibles à l'œil nu comme une modification des propriétés magnétiques. Enfin, la référence au travail microscopique des particules extérieures au système pour décrire la chaleur, semble surprenant puisque restreint *a priori* l'échange à un sens unique : de l'extérieur vers le système.

⁹⁴⁸ (Baierlein, 1994)

⁹⁴⁹ (Ménétrie, et al., 2003) p.90

⁹⁵⁰ (Ménétrie, et al., 2003) p.90

En définitive, le fait que les auteurs complètent leurs représentations de la notion de chaleur tout au long de leur ouvrage est une preuve que la notion de chaleur est en fin de compte quelque chose de très difficile à définir clairement. Si l'approche macroscopique est d'abord privilégiée, les auteurs se tournent ensuite vers une approche microscopique. Cet appel à une description microscopique peut-il constituer une interprétation possible de la chaleur, ou constitue-t-il en réalité, la définition de la chaleur ?

On peut enfin remarquer que 9 ouvrages sur 49 présentent clairement la chaleur comme une forme d'énergie et non pas comme un mode de transfert d'énergie (non représenté dans le Tableau 9). Mais, les définitions apparaissent confuses. Ainsi, comme nous l'avons montré pour Belorizki et *al.* qui présentent la chaleur comme une forme de transfert, la notion de contenu énergétique apparaît également dans leur représentation. On retrouve également cette confusion dans l'approche inverse. Ainsi, par exemple, dans l'ouvrage *Thermodynamique appliquée* de Wylen et *al.* de 1992, on peut lire :

« On appelle chaleur la forme d'énergie qui est transmise, à travers les limites d'un système ayant une température donnée, vers un autre système (ou vers le milieu ambiant) ayant une température plus basse et ce, en raison de la différence de température existant entre les deux systèmes. »⁹⁵¹

On voit dans cette définition une certaine ambiguïté. En effet, si les auteurs soulignent le fait que la chaleur est une forme d'énergie, elle ne prend forme qu'aux limites d'un système. On peut donc se demander, s'il n'y pas un amalgame entre la chaleur qui est un phénomène de transfert et la quantité d'énergie transféré par chaleur, que certains auteurs appellent maladroitement « quantité de chaleur ».

Tous ces problèmes de langage doivent donc nécessairement être éclaircis et c'est en l'occurrence l'objet du prochain paragraphe.

b. Les dénominations de la « chaleur »

La chaleur, comme nous l'avons vue, est apparue rapidement dans le langage de la thermodynamique, mais sa représentation est longtemps restée en débat. L'hypothèse du calorique proposée par Black, soutenue par Lavoisier, Laplace et utilisée par Carnot (Cf. Chapitre 1) a laissé dans le langage les adjectifs tels que *calorifique*, *calorique etc.* Mais, elle a également laissé l'empreinte d'une substantialisation de la chaleur, avec des expressions comme « *la chaleur s'écoule* », « *la chaleur passe du corps chaud au corps froid* » *etc.* Ces phrases ambiguës, restent présentes dans la littérature, même récente, bien que les travaux de Rumford, Joule, Mayer, Clausius, Thomson *etc.* aient mis en évidence que la chaleur est une grandeur équivalente à un

⁹⁵¹ (Wylen, et al., 1992) p.75

travail et caractéristique d'un transfert particulier de l'énergie. En réalité, cette conception a mis un long moment à émerger dans le langage, de sorte que la chaleur a été pendant longtemps associée non pas à un transfert, mais à un contenu énergétique comme étant de l'énergie thermique ou de l'énergie calorifique. Nous avons montré que certains auteurs associaient à ces énergies respectivement soit une partie de l'énergie interne (partie cinétique) ; soit l'énergie interne en l'absence de travail (Cf. chapitre 4). La prise de conscience de ces difficultés a commencé au cours de années 30 (Cf. chapitre 3) et s'est poursuivie jusqu'aux années 1990. Les programmes d'enseignement ont pris position dans le supérieur (1995) puis dans le secondaire (2001) afin de remplacer le mot chaleur par l'expression *transfert thermique* (Cf. Chapitre 6). Comme nous l'avons déjà vu, l'objectif était d'éviter les confusions et de souligner notamment le fait qu'il s'agisse réellement d'un transfert d'énergie. On se propose dans notre recherche, d'analyser les dénominations de la chaleur dans les ouvrages que nous avons répertoriés.

Concernant la date de parution des 60 ouvrages qui ont été étudiés dans le cadre de ces recherches sur le concept de chaleur :

- 19 d'entre eux sont parus avant 1995 (réforme des CPGE)
- 38 d'entre eux sont parus avant 2001 (réforme du secondaire)

Signalons d'abord que trois ouvrages, sur les 60 analysés, utilisent le mot « *énergie thermique* » pour désigner la chaleur ; laissant sous-entendre que celle-ci est une forme d'énergie. D'ailleurs, Frère *et al.* s'en défendent en argumentant par le fait que : « *la chaleur se comporte comme la fonction d'état H ; c'est pourquoi nous la désignerons parfois par le terme d'énergie thermique.* »⁹⁵² Cette justification est très dommageable dans le sens où Q n'est pas une fonction d'état car elle dépend clairement du déroulement de la transformation pour passer d'un état d'équilibre à un autre. En outre, si on accepte l'appellation *énergie thermique*, proposée par les auteurs, celle-ci renvoie ici au concept de température qui n'est qu'une contribution de l'énergie interne (sa partie cinétique) et *a fortiori* qu'une contribution de l'enthalpie.

Ensuite, on trouve le dérivé du mot « calorique » dans deux ouvrages. Par exemple, dans le *Dictionnaire de thermodynamique* de Perrot de 1994 on lit « *Une interaction entre deux systèmes fermés n'échangeant pas de travail est dite purement calorifique lorsque les deux systèmes, initialement isolés et dans un état d'équilibre stable sont mis en contact, l'ensemble restant isolé durant l'interaction. L'énergie échangée entre les deux systèmes est alors appelée chaleur [...]. Le concept de chaleur découle de l'existence d'échanges qui ne répondent pas à la définition du travail.* »⁹⁵³ Certes la présence du mot « calorifique » dont nous avons discuté plus haut, est dommageable car il laisserait sans doute penser à l'*énergie calorifique*. Cependant, force est de constater qu'il est utilisé ici uniquement pour désigner le type d'interaction entre deux

⁹⁵² (Frère, et al., 1999) p.274

⁹⁵³ (Perrot, 1994) p.28

systèmes en absence d'échange de travail. Il ne s'agit donc pas d'une définition de la chaleur. D'ailleurs, Perrot généralise cette éventuelle « énergie calorifique » au concept de chaleur dans la suite, mais laisserait quand même entrevoir la synonymie entre les deux termes. Dans le second ouvrage datant de 1997 de Latour on peut également lire : « *On peut aussi parler de "transfert calorifique" ou de "transfert thermique".* »⁹⁵⁴ Aussi, il faut être prudent de ne pas conclure que l'auteur voit les deux adjectifs *calorifique* et *thermique* comme totalement équivalents. En effet, le souci de l'auteur est plutôt de faire une proposition pour remplacer le mot « *chaleur* » ou l'expression « *transfert de chaleur* ».

Il n'est pas étonnant de trouver des ouvrages utilisant l'association ambiguë « *transfert de chaleur* », surtout avant la réforme de 1995 des CPGE. Ainsi, 5 ouvrages sur les 60 font référence à cette association. Par exemple, dans le cours de thermodynamique de Botet de 1991 on peut lire : « *Un transfert de chaleur se fait toujours ainsi : vers les températures les plus basses.* »⁹⁵⁵ Il est clair que l'utilisation des expressions « *transfert de chaleur* », tout comme « *quantité de chaleur* », laissent croire au lecteur, que la chaleur est un contenu énergétique. Un abus de langage grave dans un contexte où la signification du mot *chaleur* n'est pas correctement admise. C'est pourquoi le manuel de Brébec *et al.* de 1995, date justement de la réforme des CPGE, propose tout en utilisant l'expression « *transfert de chaleur* »⁹⁵⁶ de la remplacer par *transfert thermique* :

« *Le transfert thermique Q , ou transfert de chaleur, correspond à l'énergie échangée non comptabilisée dans le travail W . Ce transfert est dû aux interactions microscopiques qui modifient l'agitation désordonnée des particules.* »⁹⁵⁷

Cependant, l'ensemble des auteurs des livres post 1995 ne s'accordent pas sur ce choix de « *transfert thermique* » pour dénommer la chaleur. Comme le rappellent Gié et Barras, dans leur ouvrage *Thermodynamique* de 1996 : « *Le mot chaleur est de loin le plus utilisé : c'est un héritage légué par les fondateurs de la thermodynamique, et qui s'impose par sa simplicité. L'usage courant de formules telles que « l'eau est chaude » confère au mot chaleur une ambiguïté regrettable : on sous-entend ainsi que la chaleur est une forme d'énergie stockée par l'eau, alors que la chaleur n'est qu'une forme d'échange d'énergie. Au prix d'une certaine lourdeur, le programme de la filière PCSI recommande de parler de transfert thermique plutôt que de chaleur.* »⁹⁵⁸



⁹⁵⁴ (Latour, 1997) p.41

⁹⁵⁵ (Botet, 1991) p.45

⁹⁵⁶ On pourrait regretter l'utilisation de l'expression de « *transfert de chaleur* ». Mais, cet ouvrage constitue l'un des premiers à favoriser l'utilisation de l'appellation *transfert thermique* dans l'enseignement de la thermodynamique, conformément aux consignes officielles. D'ailleurs, la dénomination *transfert de chaleur* n'apparaîtra plus dans le reste de l'ouvrage.

⁹⁵⁷ (Brébec, et al., 1995) p.108

⁹⁵⁸ (Gié, et al., 1996) p.133

Aussi, le mot chaleur semble ancré dans le vocabulaire et difficilement modifiable. En fin de compte, à compter de 1993, pour désigner le concept de chaleur, les auteurs sont près de 75% à utiliser encore le mot « chaleur ». Ils ne sont seulement que 14% à utiliser exclusivement le mot « *transfert thermique* » et environ 11% font appel aux deux termes pour insister sur le fait qu'on puisse les employer comme synonyme.

3. Un premier bilan

Les définitions de la notion de chaleur reposent globalement sur quatre aspects : le gradient de température, le travail macroscopique, le premier principe ou la description microscopique. Certains, ouvrages comme le *Thermodynamique* de Perez de 1997, complètent la définition de la notion de chaleur par une ouverture probabiliste : « *dans le transfert par chaleur, seules les probabilités des différents états sont modifiées. En revanche, dans le transfert par travail, les niveaux d'énergie sont modifiés alors que les populations de ces niveaux restent identiques. C'est là le sens précis de la différence de nature entre le transfert d'énergie par chaleur et le transfert d'énergie par travail.* »⁹⁵⁹ Cette approche permet alors de se défaire des adjectifs « ordonné » et « désordonné ». Cependant, elle semble difficilement abordable pour des étudiants de niveau L2. En plus, il faut bien préciser qu'elle n'est valable que pour des transformations réversibles.

Mais au-delà des définitions, il est intéressant de constater que la chaleur est encore désignée comme une forme d'énergie pour une partie des ouvrages et non comme un transfert. La consigne officielle, de remplacer le mot chaleur par transfert thermique, ne semble pas généralement suivie dans les ouvrages de thermodynamique puisque le mot chaleur domine globalement l'ensemble des appellations. Malgré cela, d'autres libellés comme *transfert de chaleur* ou *transfert calorifique* ramènent la chaleur soit dans un premier temps à une grandeur énergétique, ou dans un second temps à la théorie substantialiste de la chaleur liée au calorique. Aussi, la situation au cours des années 90 est clairement résumée par Médard et Tachoire, en 1994, dans *Histoire de la thermochimie. Prélude à la thermodynamique chimique* :

« *Notre mode de pensée et notre langage ont gardé quelque chose de cette doctrine du calorique ; on parle encore, comme il y a deux siècles, de chaleur dégagée ou de chaleur absorbée, employant les mêmes mots que lorsqu'on dit d'un gaz qu'il se dégage ou qu'il est absorbé (par un solvant, par un corps poreux, ...)* »⁹⁶⁰

Sans en faire une richesse, ces nombreuses dénominations contribuent, comme nous allons le montrer dans la suite, à entretenir la confusion entre chaleur, température et énergie.

⁹⁵⁹ (Pérez, 1997) p.275

⁹⁶⁰ (Médard, et al., 1994) p.38

Enfin, le pourcentage élevé de l'utilisation du mot « chaleur » est dû principalement aux habitudes des enseignants ou/et aux ouvrages universitaires qui ne sont régis par aucune consigne de l'éducation nationale. Pourtant, depuis la réforme du lycée datant de 2001, les étudiants ont de plus en plus l'habitude d'utiliser l'expression « transfert thermique ». Par conséquent, il ne sera pas étonnant, dans l'avenir, de voir ce pourcentage baisser. Dans ce sens, on peut citer ce que dit Latour dans ses *Leçons de thermodynamique* pour l'agrégation de sciences physiques : « Dorénavant, on ne doit plus prononcer le mot chaleur ... Le mot chaleur va disparaître des livres de thermodynamique. Ici, l'incidence pédagogique est considérable. ... le mot « chaleur » fait assimiler celle-ci aux autres fonctions d'état, énergie interne, enthalpie, entropie, etc... qui évoque l'état. Donc un élève pourrait très bien parler de la chaleur de l'état... Mais..., cela lui est complètement interdit. »⁹⁶¹

Il sera alors intéressant d'étudier la compréhension de ces termes chaleur et *transfert thermique* par les étudiants. C'est notamment un des objectifs du paragraphe qui suit.

III. L'UTILISATION DU MOT *CHALEUR* DANS LE SUPERIEUR

1. Etude des sujets de concours

Malgré les consignes officielles, les manuels utilisent encore le mot chaleur et les expressions associées laissent planer de nombreuses ambiguïtés. Aussi, on se propose dans cette partie, de réaliser un inventaire des dénominations du mot chaleur dans les épreuves officielles comme les sujets de concours d'entrée en école d'ingénieurs mais aussi les sujets de concours de l'agrégation.

a. Les concours d'entrée en école d'ingénieurs

Les banques d'épreuves pour l'entrée en école d'ingénieurs sont vastes. Aussi, notre choix s'est porté sur le Concours Commun Polytechnique qui permet d'accéder à plus de soixante écoles d'ingénieurs françaises (soit environ 4000 places) dans les filières MP, PC, PSI et PT. Il s'agit donc d'un concours de référence. La démarche que nous avons adoptée est de sélectionner les sujets de thermodynamique posés aux concours après la réforme de 1995 (soit le concours de 1997, l'année 1996 pouvant être considérée comme une année de transition compte tenu de la présence de redoublants, dits 5/2) notamment dans les sections PC où l'épreuve de physique est une des plus importantes.

⁹⁶¹ (Latour, 1997) p.40

Une fois les sujets sélectionnés⁹⁶², nous avons listé la façon dont les échanges d'énergie par chaleur sont nommés dans les sujets. Afin de pouvoir comparer les sujets post 1997, voici à titre d'exemples ce que l'on peut trouver dans les sujets de concours des épreuves de physique :

1995 : « *Faut-il que le réservoir reçoive ou cède de la chaleur à l'extérieur* »⁹⁶³ ; « *la quantité de chaleur échangée* »⁹⁶⁴ ; « *un échangeur de chaleur* »⁹⁶⁵

1996 : « *Cette machine ditherme qui fonctionne en régime permanent échange de la chaleur avec une source chaude* »⁹⁶⁶ ; « Δq : *chaleur massique échangée avec l'extérieur* »⁹⁶⁷ ; « *En déduire la chaleur q_f* »⁹⁶⁸

Aussi, on constate que le mot chaleur est clairement utilisé dans les sujets. En outre, les expressions laissent entendre que la chaleur est un contenu énergétique et non un phénomène de transfert. Il y a encore une fois, une confusion évidente entre le phénomène de transfert et l'énergie transférée par chaleur. Qu'en est-il après la réforme qui suggère comme nous l'avons vue de préférer le mot *transfert thermique* ?

Dans le sujet de 1997, on trouve uniquement la référence à « *transfert thermique* »⁹⁶⁹. Aussi, le premier sujet de thermodynamique posé après la réforme ne fait pas référence au mot chaleur et les concepteurs suivent les recommandations du programme. Mais, cette constatation ne va pas s'étendre au-delà de 1997. En effet dans le sujet de 1998 on trouve : « *quantité de chaleur* » ou encore « *tout échange de chaleur* »⁹⁷⁰. En 1999, les deux libellés sont utilisés : « *la quantité de chaleur nécessaire* »⁹⁷¹, « *Etude du transfert thermique* »⁹⁷²

On remarque ensuite, qu'à compter de 2001, l'année où le mot chaleur est abandonné dans le secondaire, les concepteurs de sujets semblent plus vigilants au vocabulaire employé. Ainsi, en 2001 et en 2002 le mot « *transfert thermique* »⁹⁷³ est utilisé uniquement pour désigner les échanges. A noter néanmoins que dans le sujet de 2002, il est possible de lire : « *l'énergie dissipée sous forme de chaleur* »⁹⁷⁴, alors que l'on devrait lire, *l'énergie dissipée par transfert thermique*. Dans le sujet de 2003 et de 2004 les précautions de langage sont nettes : « *Un réchauffeur apporte, par transfert thermique à pression constante, une quantité d'énergie Q* »⁹⁷⁵

⁹⁶² Les sujets dont les années n'apparaissent pas dans ce travail ne traitent pas de thermodynamique.

⁹⁶³ (CCP, 1995) p.1

⁹⁶⁴ (CCP, 1995) p.1

⁹⁶⁵ (CCP, 1995) p.2

⁹⁶⁶ (CCP, 1996) p.1

⁹⁶⁷ (CCP, 1996) p.1

⁹⁶⁸ (CCP, 1996) p.4

⁹⁶⁹ (CCP, 1997) p.3

⁹⁷⁰ (CCP, 1998) p.2

⁹⁷¹ (CCP, 1999) p.2

⁹⁷² (CCP, 1999) p.3

⁹⁷³ (CCP, 2001) p.1 et (CCP, 2002) p.8

⁹⁷⁴ (CCP, 2002) p.3

⁹⁷⁵ (CCP, 2003) p.2

« On se propose d'étudier les transferts thermiques dans un tube cylindrique pouvant composer un échangeur thermique. »⁹⁷⁶

Mais, cette constatation s'arrête rapidement puisqu'à compter de 2005 le mot chaleur réapparaît : en 2005, « Exprimer la durée t nécessaire au transfert d'une quantité de chaleur Q à travers cette paroi »⁹⁷⁷ ; en 2006, « les concepteurs ont prévu un échangeur de chaleur »⁹⁷⁸ et « l'échange de chaleur avec la source froide »⁹⁷⁹ ; puis en 2007 : « bons conducteurs de la chaleur. »⁹⁸⁰

En outre, dans le sujet de 2006 l'expression *énergie thermique* réapparaît pour désigner le transfert thermique : « Le tube dans lequel s'effectue la détente est calorifugé, de sorte que les échanges d'énergie thermique avec l'environnement sont négligeables »⁹⁸¹ ou encore « A quel endroit du cycle se produit l'absorption d'énergie thermique Q , énergie thermique reçue de la part du système à refroidir ? »⁹⁸²

Il s'agit donc non pas d'un abus de langage mais clairement d'une erreur puisque l'énergie thermique, comme nous l'avons dit, est souvent interprétée plutôt comme une partie de l'énergie interne. En outre, dans le contexte où le mot *transfert thermique* s'impose dans le langage, il est regrettable qu'un amalgame se fasse avec le mot *énergie thermique*.

Pour terminer, présentons le sujet de physique de 2009 qui possède dans un préambule au problème de thermodynamique, une partie relative à des questions de cours dans laquelle il est précisé : « Les questions de cours devront être rédigées avec le maximum de précision pour obtenir les points attribués à la question. Le correcteur ne se contentera pas d'une simple formule mais attend des définitions précises et des explications claires. »⁹⁸³

Dans le libellé d'une question, on trouve pourtant : « la variation d'enthalpie[...] s'identifie à la chaleur échangée par le système ». Or en 2009, il est évident que les étudiants depuis le secondaire n'auraient pas du rencontrer le mot chaleur mais seulement le mot transfert thermique. Il est donc regrettable de trouver le mot chaleur dans un sujet officiel.

En outre, d'après le rapport de Jury de cette épreuve, les résultats sont globalement décevants : « Ceux qui maîtrisent le cours donc le **vocabulaire** et les **notions de base** fondamentales obtiennent très facilement la moyenne pourvu qu'ils fassent preuve d'un minimum d'attention dans les calculs. On ne comprend pas la physique en faisant uniquement des exercices mais d'abord en comprenant et apprenant le cours. Cette vérité première mérite d'être rappelée. »⁹⁸⁴

⁹⁷⁶ (CCP, 2004) p.1

⁹⁷⁷ (CCP, 2005) p.8

⁹⁷⁸ (CCP, 2006) p.11

⁹⁷⁹ (CCP, 2006) p.12

⁹⁸⁰ (CCP, 2007) p.7

⁹⁸¹ (CCP, 2006) p.8

⁹⁸² (CCP, 2006) p.10

⁹⁸³ (CCP, 2009) p.1

⁹⁸⁴ (Briand, 2009) p.2. Les mots en gras et soulignés apparaissent de cette manière dans le texte original.

Il s'agit ici de mettre en avant le fait que les étudiants maîtrisent mal le vocabulaire de thermodynamique. Mais en ce qui concerne la chaleur, comme nous le présentons, le vocabulaire utilisé dans les épreuves est globalement éloigné des attentes du programme. Le mot chaleur est par ailleurs présent dans le rapport de Jury de ce sujet :

« *Les transferts de chaleur dans une machine frigorifique [...] Pas mal de candidats comprennent également mal la notion même de source de chaleur.* »⁹⁸⁵

De telles approximations et libertés dans le concours ne sont pas sans rappeler ce que l'on peut encore trouver dans les ouvrages destinés aux préparateurs. On peut donc conclure que les observations faites dans les manuels se retrouvent intégralement dans les sujets de concours d'entrée en écoles d'ingénieurs. Aussi, il va être intéressant de nous tourner vers les sujets de concours qui sont destinés aux futurs enseignants, notamment le concours d'agrégation de sciences physiques, pour voir si la rigueur dans le vocabulaire est davantage présente.

b. Le concours de l'agrégation

Sans vouloir être exhaustif dans notre recherche sur les concours d'agrégation, notre démarche a été d'analyser les sujets d'agrégation fortement accés sur la thermodynamique. Il s'agit notamment des épreuves d'agrégation interne de sciences physiques, notamment destinées à des enseignants déjà en activité. En outre, l'analyse de ces sujets sera complétée par les rapports de jury de l'agrégation interne dont les commentaires sur la partie thermodynamique soulignent des points intéressants. Sur la période d'étude on trouve notamment deux sujets d'épreuve (2005 et 2010) qui font référence à la thermodynamique.

On peut ainsi lire dans le rapport de jury de l'épreuve de 2005 :

« *Le travail et la chaleur (ou flux thermique) sont des transferts d'énergie : on peut donc parler d'échange d'énergie par travail ou d'échange de travail entre le système et l'extérieur ; on peut dire que telle source fournit de la chaleur au système. Mais il n'est pas correct de parler de quantité de chaleur ou quantité de travail ou d'écrire des relations comme $\Delta U = \Delta W + \Delta Q$ (en donnant à Δ le sens de « variation de ... ») ou $U = W + Q$.* »⁹⁸⁶

Ainsi, le rapporteur n'emploie pas le mot transfert thermique, même 10 ans après la réforme en CPGE. Mais, il semble néanmoins bien insister sur le fait que chaleur et travail sont des transferts d'énergie, en condamnant notamment les expressions telles que « *quantité de chaleur* ». Pourtant, il est aisé de constater que dans le libellé même des questions de l'épreuve, on peut lire : « *On note q_c le transfert thermique ou quantité de chaleur massique reçue par une unité de masse de*

⁹⁸⁵ (Briand, 2009) p.2

⁹⁸⁶ (Jury Agrégation interne de sciences physiques, 2005) p.2

fluide. »⁹⁸⁷ ou encore « *la quantité de chaleur massique...* »⁹⁸⁸ Il apparaît donc un flagrant décalage entre le sujet et son commentaire.

En outre, le mot chaleur dans le sens du contenu énergétique, reste bien présent dans le rapport comme avec l'expression maladroite « *fournit de la chaleur* » au lieu de l'expression « *fournit de l'énergie par transfert thermique* ». Enfin, le rapport associe au mot chaleur, la notion de « *flux thermique* ». Or, l'utilisation de ce terme est très maladroite puisqu'un flux thermique apparaît comme un transfert thermique d'énergie par unité de temps, c'est-à-dire une puissance. Aussi, même avec des précautions de langage, il est courant de faire quelques maladresses dans les expressions.

Dans un autre sujet traitant de la thermodynamique et datant de 2010, le rapport propose de faire à nouveau une mise au point concernant le vocabulaire employé : « *Sans verser dans un purisme excessif, on peut affirmer que l'énergie thermique ou calorifique n'existe pas et il en est de même du transfert thermique par rayonnement. Les termes corrects sont transfert thermique ou transfert de chaleur ou, plus simplement, transmission de la chaleur, qui peut se faire par conduction ou convection.* »⁹⁸⁹

Plusieurs remarques peuvent immédiatement être faites à la lecture de ce rapport.

1. Tout d'abord, les auteurs soulignent un point dont nous avons déjà discuté : l'énergie thermique et l'énergie calorifique n'existent pas. Nous avons discuté de la signification de ces termes, notamment dans les ouvrages des périodes précédentes. Mais, comme ils conduisent à un amalgame entre chaleur et énergie il est prudent de les abandonner. Il ne s'agit pas d'un « *purisme excessif* » mais d'une précaution fondamentale pour éviter les dérives. Rappelons que ces termes apparaissent encore, comme nous l'avons vu, dans des manuels mais aussi dans certains programmes. (Cf. Chapitre 6)
2. Les auteurs soulignent l'équivalence entre les expressions « *transfert thermique* » et « *transfert de chaleur* ». Or, d'après nos développements précédents nous savons qu'il s'agit d'une erreur grave puisque le transfert de chaleur est une expression qui laisse croire que la chaleur est un contenu énergétique. On peut donc également abandonner l'expression « *transmission de la chaleur* » pourtant suggérée dans le rapport. Seule l'appellation *transfert thermique* est correcte.
3. Enfin, le rayonnement n'est pas, selon les rapporteurs, un mode de transfert thermique. Pourtant, comme nous l'avons montré Chapitre 6, le rayonnement est classé dans le programme de CPGE et dans certains manuels⁹⁹⁰ comme un mode de transfert thermique au

⁹⁸⁷ (Agregation Interne de Sciences Physiques, 2005) p.3

⁹⁸⁸ (Agregation Interne de Sciences Physiques, 2005) p.6

⁹⁸⁹ (Jury Agregation interne de sciences physiques, 2010) p.4

⁹⁹⁰ On trouve par, exemple, très clairement dans l'ouvrage de Queyrel et al. de 1996 : « *Le transfert thermique [...] peut se faire de trois manières différentes, celles-ci pouvant coexister : rayonnement [...] conduction [...] convection [...]* » (Queyrel, et al., 1996) pp.91-92

même titre que la conduction ou la convection. On voit donc ici que la place qu'occupe le rayonnement n'est pas tout à fait tranchée : s'agit-il d'un transfert thermique ou d'un troisième mode de transfert (qui s'ajouterait au transfert par travail et au transfert thermique) ?

Nous venons donc de voir qu'à travers les manuels et les sujets de concours officiels, les ambiguïtés sur la notion de chaleur sont bien présentes. En outre, le mot transfert thermique semble avoir du mal à s'imposer et quand il est présent, les déviances de langage ramènent les auteurs à utiliser d'anciennes expressions laissant sous-entendre que la chaleur est un contenu énergétique. Il s'agit donc maintenant, d'étudier les impacts de ces libertés de langage dans la compréhension de ce concept par les élèves et les étudiants, d'autant que le mot chaleur se retrouve régulièrement dans d'autres concepts de thermodynamique. C'est l'objet du prochain paragraphe.

2. Un bilan sur l'introduction de l'expression « transfert thermique »

a. Le mot *chaleur* dans les concepts de thermodynamique

L'introduction du mot *transfert thermique* dans le supérieur, 55 ans après la remarque sur l'« *échange thermique* » dans les ouvrages de Brun⁹⁹¹ (Cf. Chapitre 3) n'a pas résolu le problème sur l'introduction et la compréhension du phénomène lié à ce mode de transfert d'énergie, d'autant qu'il se trouve souvent associé ou supplanté par le mot chaleur. A titre d'illustration, une recherche menée dans les Bulletins de l'Union des Physiciens amène le résultat suivant concernant le nombre d'articles parus :

Mot clé : « transfert thermique » : 0 article

Mot clé : « chaleur » : 107 articles dont 18 après 2001

En réalité, le mot chaleur est intimement lié à la thermodynamique d'un point de vue historique, tout d'abord, mais également pour l'ensemble des notions qui gravitent autour de ce concept. Ainsi, au-delà du mode de transfert d'énergie, le mot chaleur est présent dans le vocabulaire de tous les domaines industriels comme les *pompes à chaleur* ou les *échangeurs de chaleur*. Mais, le mot chaleur est aussi présent dans des notions telles que les *sources de chaleur*, pour lesquelles Duprez et Méheut ont montré dans l'article *A propos du concept de source thermique*⁹⁹², paru en 2007 que les définitions qui sont liées à cette notion sont très variées et parfois ambiguës. Enfin, persistent dans les programmes et dans le vocabulaire scientifique, les

⁹⁹¹ Cf. Chapitre 3

⁹⁹² (Duprez, et al., décembre 2007)

grandeurs comme *chaleur spécifique, chaleur de réaction, chaleur latente* ou encore *équation de la chaleur, etc.*

A cela s'ajoute l'empreinte du vocabulaire courant, comme nous l'avons montré, qui accentue la confusion et l'amalgame entre chaleur, température et énergie. Pourtant, certains auteurs cherchent, malheureusement, encore à montrer la compatibilité entre le langage courant et scientifique. Ainsi, dans l'article datant de 1999, *Température ou chaleur ? Les sensations du corps humain* de Jandaly on peut lire :

« Comme on l'a souligné, les sensations de « chaud » et de « froid » du corps humain sont effectivement davantage liées à l'énergie échangée sous forme de chaleur avec le milieu extérieur qu'à la température de ce dernier (étant entendu que les deux notions sont liées). Par conséquent, des expressions comme « il fait chaud », ou même « quelle chaleur dans cette pièce » sont très acceptables d'un point de vue scientifique ! »⁹⁹³ Non seulement, l'expression « il fait chaud » ne peut-être scientifiquement acceptable, dans la mesure où le chaud et le froid ne sont pas des concepts scientifiques, mais il est, compte tenu de nos illustrations précédentes, encore plus inacceptable de considérer comme valable l'expression « quelle chaleur dans cette pièce ». En effet, en tant que transfert d'énergie, la chaleur n'existe pas en tant que contenu (comme l'a clairement dit Mercier en 1959, Cf. Chapitre 4) et ne doit en aucun cas être systématiquement reliée à des températures élevées. Néanmoins, l'argument de Jandaly selon lequel nous sommes sensibles aux transferts d'énergie par chaleur est tout à fait exact mais les conclusions qu'il en tire sont clairement maladroites.

Aussi, l'on comprend pourquoi le mot transfert thermique s'impose difficilement dans le vocabulaire des épreuves officielles, comme c'est également le cas pour les ouvrages de thermodynamique et probablement dans les enseignements.

Il est donc grandement nécessaire de voir comment le concept de chaleur est compris par les élèves et les étudiants, notamment depuis les suggestions des programmes de remplacer le terme *chaleur* par *transfert thermique*. C'est l'objet de deux prochains paragraphes.

b. L'introduction du « *transfert thermique* » dans le secondaire

En 2006, David Lafargue publie un article dans le BUP, intitulé *Conceptions des élèves sur les notions de « chaleur » et de température après enseignement du programme de première S de 2001*⁹⁹⁴. Il donne les résultats d'une étude menée auprès de 79 élèves de terminale scientifique durant l'année 2003-2004 pour connaître l'impact de l'introduction du mot transfert thermique dans l'enseignement.

⁹⁹³ (Jandaly, mai 1999) p. 856

⁹⁹⁴ (Lafargue, Juin 2006)

Les résultats présentés dans l'article montrent la persistance des sensations et du sens commun des notions de chaleur et de température sur l'interprétation scientifique de ces concepts. Ainsi, pour 42% des élèves, la température est prise comme étant une caractéristique du matériau et non pas comme une propriété qui dépend des conditions extérieures. Certaines substances sont considérées comme naturellement plus chaudes que d'autres. Par exemple, les élèves considèrent que la laine, la fourrure sont chaudes, le carrelage, le marbre, le métal sont froids. Nos sensations sont trompeuses et ne permettent pas de repérer aisément les températures.

Lafargue constate en outre que, malgré l'introduction du mot transfert thermique dans le programme, « 96 % des élèves interrogés utilisent dans au moins une de leurs réponses, les mots (noms, adjectifs, verbes, adverbes) dérivés du mot « chaleur » ou de son antagoniste le mot « froid », et 20 % les utilisent dans chacune de leurs réponses. Inversement, 73 % des élèves interrogés n'utilisent jamais le terme « transfert thermique » et aucun élève ne l'utilise dans chacune de ses réponses. »⁹⁹⁵. Le langage courant lié à nos sensations, est nécessairement une des causes de ces réponses, mais rappelons que les ouvrages mais aussi les programmes (comme ceux de SVT) continuent à utiliser le mot *chaleur*. (Cf. Chapitre 6)

Aussi, à la question « qu'est-ce que le « transfert thermique » ? » les réponses obtenues font nécessairement référence à la chaleur : « 32 % des élèves envisagent un transfert de chaleur et/ou de froid. »⁹⁹⁶

Si, pour 14% des élèves, il s'agit d'un transfert d'énergie, (sans préciser sa particularité), on constate que le mot transfert thermique engendre un rapprochement avec le mot énergie thermique. En effet « 22 % des élèves définissent le transfert thermique en rapportant le terme « thermique » à l'énergie et non au mode de transfert : « transfert thermique = transfert d'énergie calorifique entre deux milieux » ; « un transfert thermique, d'après moi, ...est un échange d'énergie thermique, c'est-à-dire un échange de chaleur, entre un corps et un autre » ; ou en ayant une formulation ambiguë où on ne sait pas si, pour l'élève, le terme chaleur se rapporte à « échange » ou à « énergie » : « c'est un échange d'énergie sous forme de chaleur ». »⁹⁹⁷ Cette confusion entre transfert thermique et énergie thermique apparaît également comme nous l'avons vue dans les programmes mais aussi dans les ouvrages. Ainsi, dans l'exemple introductif sur l'importance du système en thermodynamique que nous avons présenté au Chapitre 7, Grécias et Migeon désignaient par « énergie thermique »⁹⁹⁸ la quantité d'énergie échangée par « transfert thermique ».

Enfin, l'adjectif *thermique* conduit certains élèves à rapprocher la notion de *transfert thermique* de celle de *température* : « 13 % le définissent comme un transfert de température : « c'est un

⁹⁹⁵ (Lafargue, Juin 2006) p.722

⁹⁹⁶ (Lafargue, Juin 2006) p.722

⁹⁹⁷ (Lafargue, Juin 2006) p.722

⁹⁹⁸ (Grécias, et al., 1999)p.653

transfert de température qui va permettre aux deux corps mis en contact de se retrouver à la même température. »⁹⁹⁹ Lafargue explique qu'un glissement sémantique de *transfert thermique* vers *transfert de chaleur*, voire même *transfert de température* peut être fait par les élèves, engendrant d'autant plus de confusion.

L'étude proposée par Lafargue montre donc que l'utilisation du mot transfert thermique n'a pas résolu réellement les problèmes de compréhension, bien que l'idée d'un mode de transfert de l'énergie semble acquise. Les explications de ce bilan mitigé peuvent être nombreuses, comme nous l'avons vu : persistance du mot chaleur, adjectif « *thermique* » qui rappelle trop le concept de température, persistance du sens commun *etc.*

Si le travail que propose Lafargue est fondamental, il se limite uniquement à l'enseignement secondaire. Or, aujourd'hui, aucune étude n'a été *a priori* proposée sur les conséquences de l'introduction du mot *transfert thermique* dans l'enseignement supérieur. C'est pourquoi nous proposons dans notre étude, de réaliser cette enquête auprès des étudiants du supérieur.

c. L'introduction du « *transfert thermique* » dans le supérieur

Dans le cadre de ce travail de recherche, un questionnaire (disponible en annexe n°4) a été proposé à des étudiants de deuxième année universitaire. Au total 177 étudiants ont réalisé le questionnaire dont 96 lors de l'année universitaire 2014-2015 et 81 lors de l'année universitaire 2015-2016. Issus d'un baccalauréat scientifique, ces étudiants de 2^{ème} année universitaire (niveau L2 du semestre 3) ont suivi une formation universitaire en physique fondamentale, physique chimie ou une classe préparatoire intégrée à l'école Polytech de l'Université de Lille 1. Il est important en outre, de noter que ce questionnaire a été effectué avant l'enseignement du cours de thermodynamique. Le but est ici de détecter les conceptions des étudiants en fonction de leurs connaissances du lycée et de première année du supérieur.

La première partie du questionnaire contient cinq affirmations auxquelles, l'étudiant doit répondre par vrai ou par faux. Les trois affirmations analysées dans ce travail portent sur le lien température/chaleur ou température/transfert thermique (dénommée simplement Q dans le questionnaire) dans le but de quantifier ce lien. Voici les affirmations proposées :

A1) $Q = mc(T_f - T_i)$, T_f et T_i sont les températures initiale et finale.

A3) Dans une transformation isotherme (température constante) $Q = 0$.

A4) Dans une transformation adiabatique ($Q = 0$), la température reste constante.

⁹⁹⁹ (Lafargue, Juin 2006) p.722

Aussi, les affirmations ont pour objectif de faire un lien explicite entre la température et la chaleur. Les affirmations A1 et A4 le font dans le sens « chaleur vers température » alors que l'affirmation A3 le fait dans le sens « température vers chaleur ».

Pour chacune de ces affirmations, la réponse attendue est « faux ». En effet, l'affirmation A1 est une expression de Q valable dans des transformations particulières (isochore et isobare). Les affirmations A3 et A4 sont fausses également car reposent sur la confusion entre transformation adiabatique et transformation isotherme.

On présente ici les résultats obtenus pour les échantillons d'étudiants :

Nombre d'étudiants	A1			A3			A4		
	V	F	PR	V	F	PR	V	F	PR
$N_{14-15}=96$	60	17	19	59	29	8	30	52	14
%	62,5	17,7	19,8	61,5	30,2	8,3	31,2	54,2	14,6
$N_{15-16}=81$	68	10	3	50	29	2	28	43	10
%	84,0	12,3	3,7	61,7	35,8	2,5	34,6	53,1	12,3
$N_{\text{Tot}}=177$	128	27	22	109	58	10	58	95	24
%	72,3	15,3	12,4	61,6	32,8	5,6	32,8	53,7	13,5

Tableau 10 Résultats aux questions 1 3 et 4 du questionnaire sur le lien température chaleur¹⁰⁰⁰

D'abord, nous remarquons que les pourcentages de non réponse pour les affirmations A1 et A4 dépassent les 10% (respectivement 12,4% et 13,5%). En revanche, ils ne sont que 5,6% à ne pas répondre à l'affirmation A3 concernant la transformation isotherme. Nous pouvons donc dire que les étudiants ont été clairement mis en difficulté pour répondre aux affirmations A1 et A4 et beaucoup moins à l'affirmation A3.

Pour la première affirmation, le constat est sans appel : la relation de proportionnalité entre Q et la différence de température est considérée à tort, correcte pour 72,3% des étudiants. Aussi, retrouve-t-on pour 61,6% d'entre eux, l'implication que transformation isotherme engendre $Q = 0$. Ces pourcentages élevés ne signifient nullement que ces étudiants considèrent qu'il y ait une équivalence parfaite entre « chaleur » et température ou, dit autrement, une relation de linéarité du type $Q = a \Delta T$ (a étant une constante). Un étudiant sera dans la confusion totale entre ces deux grandeurs s'il répond "Vrai" pour les trois affirmations. D'après le Tableau 11, nous tirons deux informations importantes.

¹⁰⁰⁰ Notations utilisées : N_{14-15} (N_{15-16}) nombre d'étudiants ayant répondu au questionnaire durant l'année scolaire 2014-2015 (2015-2016) : V= vrai, F= faux, PR= pas de réponse

	Affirmations A1, A3 et A4	
	VVV	FFF
$N_{14-15}=96$	11	12
%	11,5	12,5
$N_{15-16}=81$	13	10
%	16,0	12,3
$N_{Tot}=177$	24	22
%	13,6	12,4

Tableau 11 Résultats aux questions lorsque chaque étudiant répond par Vrai ou Faux aux trois affirmations

La première est que seulement 13,6% des étudiants sont dans cette confusion totale et la seconde nous montre que 12,4% de ces étudiants font une distinction très nette entre le concept de température et la notion de « chaleur ».

Les 74% des étudiants qui restent sont également dans une confusion de la température et de la « chaleur », mais il s'agit d'une confusion partielle que nous pouvons qualifier d'asymétrique. En effet, d'après le Tableau 10, si 61,6% des étudiants considèrent que pour une transformation isotherme $Q = 0$ (c'est-à-dire pas d'échange d'énergie par transfert thermique ou par « chaleur » lorsque la température est constante), ils sont seulement 32,8% à conclure que dans une transformation adiabatique, la température reste constante.

Cette asymétrie se confirme, en outre, en comparant uniquement les réponses conjointes pour les affirmations A3 et A4 (Cf. Tableau 12).

	A3 et A4			
	FF	VV	VF	FV
$N_{14-15}=96$	18	19	25	5
%	18,8	19,8	26,0	5,2
$N_{15-16}=81$	11	13	25	12
%	13,6	16,0	31	14,8
$N_{Tot}=177$	29	32	50	17
%	16,4	18,1	28,3	9,6

Tableau 12 Résultats aux questions sur les transformations isotherme et adiabatique¹⁰⁰¹

On constate que 16,4% répondent correctement aux affirmations A3 et A4 : il s'agit d'un pourcentage qui dépasse seulement de 4% celui de 12,4%, c'est-à-dire les étudiants chez qui la distinction entre chaleur et température semble nette. Ils sont également près de 18,1% à affirmer qu'adiabatique implique température constante et isotherme implique $Q = 0$: un pourcentage

¹⁰⁰¹ Notations utilisées : FF= faux aux questions 3 et 4 VV= vrai aux questions 3 et 4 , VF= vrai question 3, faux question 4, FV= faux question 3 vrai question 4.

qui dépasse également de 4,5% celui qui correspond à la confusion totale. En revanche, ils sont près de 38% (précisément $37,9\% = 28,3\% + 9,6\%$) à n'accorder l'affirmation que dans un sens. Pour 28,3% d'entre eux, transformation isotherme implique Q nul mais transformation adiabatique n'implique pas transformation isotherme et seuls 9,6% affirment qu'adiabatique implique isotherme mais pas qu'isotherme implique adiabatique.

En conclusion, indépendamment du vocabulaire employé, nous remarquons que le lien, qu'il soit direct ou asymétrique, entre Q (qu'il soit nommé chaleur ou transfert thermique ou autre) et la température, est bien présent pour près de 85,3% des étudiants (151 étudiants), si l'on prend en compte que 22 étudiants distinguent clairement les deux grandeurs et que seulement 4 étudiants sur les 177 n'ont pas répondu aux trois affirmations.

La première partie du questionnaire que nous venons d'analyser, utilisait un langage spécifique à la thermodynamique. Analysons maintenant la seconde partie du questionnaire qui vise à donner les significations de la température, du transfert thermique et de la chaleur mais de manière plus ouverte. En effet, la question est posée de façon à laisser une liberté à l'étudiant pour utiliser son propre vocabulaire et ses propres interprétations, puisqu'il est demandé : « *que signifient, pour vous, les termes suivants ?* » et non pas « *quelle est la définition des termes suivants ?* ». Les objectifs de cette deuxième partie du questionnaire sont :

- Retrouver la confusion entre la température et la chaleur et certainement avec un pourcentage plus élevé ;
- Retrouver la confusion entre chaleur et énergie dans le sens où la chaleur serait considérée comme un contenu énergétique ;
- L'impact de l'introduction de l'expression « transfert thermique » à la place du mot « chaleur ».

La méthodologie de la catégorisation des réponses obtenues est exclusivement faite en fonction des mots employés par les étudiants pour définir les différents termes. Le classement est donc basé sur les références proposées par les étudiants.

On trouve ainsi, pour parler de température, une référence à l'agitation, par exemple « *c'est une donnée, une unité de mesure pour l'agitation moléculaire* », à l'échelle de mesure « *la température se mesure en Kelvin : $^{\circ}C + 273,15 = K$* » ou à une variable physique « *c'est une valeur physique mesurable en tout point quantifiant la chaleur* ». Mais les étudiants font également appel aux sensations, « *c'est le chaud ou froid* » mais aussi à la notion de chaleur : « *c'est une donnée témoignant du niveau de chaleur* », « *c'est une variation de chaleur* », « *valeur numérique qui quantifie la chaleur* » « *c'est une grandeur physique en rapport avec la chaleur* » etc. Ce rapport avec la chaleur est d'ailleurs souvent associé à son sens commun. En effet, on peut lire : « *la chaleur représente une température élevée* », « *la chaleur est une température haute* » ou encore « *la chaleur est une notion plutôt subjective indiquant un seuil de hautes températures* ». Aussi, à travers ces formules on peut encore une fois signaler que l'expression « *quelle chaleur dans cette*

pièce » défendu par Jandaly dans son article de BUP¹⁰⁰² est clairement à éviter car elle engendre une corrélation trop forte dans les esprits entre la chaleur et le chaud, i.e. les fortes températures.

Voici les résultats de ce classement :

	Agitation	Chaleur	Grandeur, paramètre ou variable physique	Echelle de mesure K ou °C	Energie	Pas de réponse
N ₁₄₋₁₅ =96	27	8	4	24	10	23
%	28,1	8,3	4,2	25	10,4	24,0
N ₁₅₋₁₆ =81	11	26	15	14	7	8
%	13,6	32,1	18,5	17,3	8,6	9,9
N _{Tot} =177	38	34	19	38	17	31
%	21,5	19,2	10,7	21,5	9,6	17,5

Tableau 13 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification de la température

On note que 17,5% des étudiants ne répondent pas à la question, ce qui montre que le concept de température pose encore de réelles difficultés à ce niveau d'étude, alors qu'elle est au programme des lycées, comme nous l'avons vu au Chapitre 6. Pour ceux qui ont proposé une définition, on remarque que la référence à une description microscopique (21,5%) est presque aussi présente que la référence à la chaleur (19,2%). De même, l'échelle de mesure avec la référence aux Kelvins ou aux degrés Celsius représente 21,5% des réponses. En outre, 10,7% des étudiants désignent la température comme une grandeur ou un paramètre physique caractéristique de l'objet étudié. Enfin, ils sont 9,6% à associer à la température le concept d'énergie. Or, clairement ces deux notions sont distinctes, ne serait-ce que par le fait que la température est une grandeur intensive et l'énergie une grandeur extensive.

En ce qui concerne la chaleur (Cf. Tableau 14) et le transfert thermique (Cf. Tableau 15), nous proposons également une classification en lien avec les réponses obtenues :

¹⁰⁰² (Jandaly, mai 1999) p. 856

	Agitation, excitation	Température	Contenu énergétique	Grandeur de transfert énergétique		Pas de réponse
				Dégagement, perte <i>etc.</i>	Transfert, échange	
N ₁₄₋₁₅ =96	12	13	16	9	12	34
%	12,5	13,5	16,7	9,4	12,5	35,4
N ₁₅₋₁₆ =81	9	19	17	14	8	14
%	11,1	23,4	21,0	17,3	9,9	17,3
N _{Tot} =177	21	32	33	23	20	48
%	11,9	18,1	18,6	13,0	11,3	27,1

Tableau 14 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification de la chaleur

	Température	Transfert ou échange de chaleur	Echange d'énergie	Echange d'énergie sous forme de chaleur	Pas de réponse
N ₁₄₋₁₅ =96	23	34	23	8	8
%	24,0	35,4	24,0	8,3	8,3
N ₁₅₋₁₆ =81	16	28	22	10	5
%	19,7	34,6	27,2	12,3	6,2
N _{Tot} =177	39	62	45	18	13
%	22,0	35,0	25,4	10,2	7,4

Tableau 15 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification du transfert thermique

A la lecture de ces tableaux plusieurs remarques peuvent être proposées.

1. Premièrement, le pourcentage de non réponse est plus important pour le concept de chaleur (27,4%, Cf. Tableau 14) que pour le concept de transfert thermique (7,4%, Cf. Tableau 15). Les étudiants semblent donc clairement en difficulté pour aborder la notion de chaleur, mais semblent plus à l'aise avec la notion de transfert thermique.
2. On retrouve la confusion entre la température et la grandeur Q , conformément à ce que nous avons prévu, mais avec des pourcentages sensiblement plus élevés : dans la première partie ils n'étaient « que » 13,6% dans une confusion totale, alors qu'ils sont ici :
 - 19,2% à faire référence à la chaleur pour parler de température (Cf. Tableau 13)
 - 18,1% à faire référence à la température pour parler de la chaleur (Cf. Tableau 14)
 - 22,0% à faire référence à la température pour parler de transfert thermique (Cf. Tableau 15)

Ceci montre très certainement un glissement vers l'idée de transfert de température, comme l'a suggéré Lafargue pour les élèves du secondaire. Ainsi, peut-on lire dans les copies des étudiants : « *c'est un échange de température* », « *c'est un transfert de température* ».

En outre, on retrouve la confusion asymétrique entre température et chaleur. Aussi, pour parler de Q , 30% (i.e. 18,1%+11,9% Cf. Tableau 14) des étudiants font référence à la température ou à l'agitation, qui est une notion plutôt réservée à la définition de la température (i.e. la température cinétique). Or, ils ne sont que 19,2% à introduire la notion de chaleur pour parler de la température (Cf. Tableau 13).

3. En ce qui concerne le lien avec l'énergie, il est important de distinguer l'énergie contenue dans le système et l'énergie transférée. Aussi, le terme transfert thermique permet de faire apparaître la grandeur Q , pour 70,6% des étudiants, comme une grandeur énergétique de transfert (35%+25,4%+10,2%, Cf. Tableau 15). Or, ils ne sont que 24,3% (13%+11,3%, Cf. Tableau 14) à considérer que c'est le cas pour la chaleur. En effet, pour 18,6% d'entre eux, la chaleur est une énergie contenue dans un système. On peut lire par exemple : « *la chaleur est une énergie thermique à l'intérieur du système dépendant de l'état du système* » alors que le transfert thermique est « *un échange de chaleur d'un système à un autre* ». Aussi, le terme de chaleur entretient la confusion entre Q et l'énergie interne. Néanmoins, on peut signaler que l'appellation transfert thermique favorise l'utilisation de l'expression « énergie thermique » chez certains étudiants. On peut lire par exemple : « *le transfert thermique, c'est l'énergie thermique transmise lors d'un échange.* » On retrouve ainsi la même conclusion que Lafargue avait faite pour les élèves de terminale. Les difficultés présentes au lycée persistent donc dans le supérieur.
4. En outre, 45,2% des étudiants (35%+10,2%, Cf. Tableau 15) font référence à la chaleur pour parler de transfert thermique, comme par exemple « *le transfert thermique est un échange de chaleur* ». Toutefois, il n'est pas certain que les deux notions soient intimement liées pour ces étudiants. En effet, la chaleur apparaît davantage comme une grandeur transférée alors que le transfert thermique comme le mode de transfert.
5. Enfin, alors qu'elle est absente pour le transfert thermique, la notion de chaleur est appréhendée pour près de 12% des étudiants à travers une description microscopique. Ainsi, on peut lire : « *la chaleur est une énergie fournie par l'agitation des atomes* », « *la chaleur est le ressenti macroscopique de l'agitation microscopique* » ou encore : « *la chaleur est l'énergie d'agitation des molécules, elle s'oppose au travail, elle est généralement dissipative.* » Cette référence à une description microscopique peut se justifier par le fait que, dans l'esprit des étudiants, la chaleur représente une entité physique particulière, un contenu énergétique. Alors que le transfert thermique apparaît davantage comme un phénomène de transport et donc plus difficilement interprétable à l'échelle microscopique, notamment.

En définitive, en ce qui concerne l'enseignement de la thermodynamique dans le secondaire et dans le supérieur, on peut constater que les confusions entre chaleur, température et énergie sont encore présentes chez les étudiants bien que l'introduction de l'expression « transfert thermique » choisie par les concepteurs des programmes, soit peut-être en train, du moins partiellement, de régler ces problèmes. La cause de ces difficultés réside probablement dans l'utilisation de ces concepts dans leur sens commun, les nombreux abus de langage encore présents dans les écrits scientifiques et de vulgarisation *etc.* La conclusion du rapport de l'agrégation interne de sciences physiques de 2005 montre que les difficultés de compréhension des concepts restent toujours présents chez les étudiants et les enseignants et que ces difficultés sont bien identifiées : « *La confusion entre température et chaleur subsiste et on lit assez souvent des phrases comme : « la température étant maintenue constante, il n'y a pas d'échange de chaleur »* »¹⁰⁰³.

Mais, comment peut-on leur reprocher de telles confusions, si le langage employé dans les enseignements, les programmes, les manuels et dans les épreuves de concours n'est pas scientifiquement irréprochable ?

Il faudra probablement plusieurs décennies pour voir disparaître le mot chaleur du langage employé en thermodynamique. Aujourd'hui, de plus en plus d'étudiants et *a fortiori* d'enseignants utilisent le mot *transfert thermique* pour désigner Q . Mais, le mot chaleur reste encore très présent, même si certains auteurs comme Pérez, l'utilisent avec une précaution particulière en l'associant à l'expression « *transfert d'énergie par chaleur.* »

Nous venons donc de voir que, bien que de nombreuses avancées ont été faites pour faciliter la compréhension du concept de chaleur, celui-ci n'est toujours pas clairement identifié et reste une réelle difficulté dans l'enseignement de la thermodynamique que ce soit dans le secondaire ou dans le supérieur.

Une autre difficulté majeure de la thermodynamique est celle que constitue la notion d'*entropie*, fortement liée au concept de chaleur. Nous avons vu qu'au cours des années 60 (Cf. Chapitre 4) l'énoncé du deuxième principe a été réécrit dans l'objectif de le présenter sous la forme d'une égalité. L'enseignement de la thermodynamique s'est donc progressivement dirigé vers une pédagogie basée sur les bilans : bilan énergétique et bilan entropique. Cette présentation a-t-elle permis de faciliter la compréhension du concept d'entropie ?

C'est notamment l'objet du prochain chapitre qui s'intéresse aux différentes significations de l'entropie et aux modes de présentation du deuxième principe de la thermodynamique proposés dans l'enseignement supérieur notamment.

¹⁰⁰³ (Jury Agrégation interne de sciences physiques, 2005) p.3

CHAPITRE 9

L'ENSEIGNEMENT DU DEUXIEME PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE A COMPTER DES ANNEES 1990

I. SENS DE L'ENTROPIE ET DU DEUXIEME PRINCIPE¹⁰⁰⁴

1. Le contenu de la réforme des CPGE de 1995

Le programme proposé en 1995 pour les CPGE scientifiques confirme le tournant amorcé par la réforme de 1974 concernant l'introduction du deuxième principe et de l'entropie (Cf. Chapitre 5). En effet, comme nous l'avons souligné précédemment, la thermodynamique s'organise sous forme de bilans. Aussi, après avoir développé les bilans énergétiques du premier principe de la thermodynamique, le programme suggère de réaliser les bilans entropiques.

L'entropie, fonction caractéristique du système, peut lors d'une transformation d'un système fermé, varier sous l'action de deux grandeurs : l'entropie échangée, liée aux transferts thermiques

¹⁰⁰⁴ Ce travail a notamment fait l'objet d'une communication lors du séminaire "Sciences, Histoires, Sociétés" : *"Sur la possibilité d'une séquence d'enseignement du 2ème principe de la thermodynamique basée sur une approche historique"* (Lille, 11 juin 2015)

notamment, et l'entropie créée (ou produite), qui est une mesure de l'irréversibilité de la transformation (Cf. Chapitre 4).

Le deuxième principe permet en outre, de donner une définition de la température thermodynamique et également de la pression thermodynamique.

Mais, une des particularités de ce programme est que les machines thermiques, autrefois introduites en premier lieu pour développer le deuxième principe, ne sont présentées que plus tardivement. Elles ne deviennent alors qu'une application du premier et du deuxième principes de la thermodynamique, dans le cas particulier de transformations cycliques. (Cf. Figure 71)

5. Bilans d'entropie.

Deuxième principe. Évolutions réversibles et irréversibles.

Entropie : entropie créée, entropie échangée.

Dans le cadre de la thermodynamique des fluides, la fonction d'état d'équilibre $S(U, V)$ sera présentée comme fonction caractéristique.

Pression et température thermodynamique.

La liaison sera faite avec les définitions cinétiques.

Aucune démonstration n'est exigible.

Entropie du gaz parfait.

Loi de Laplace.

Notions élémentaires sur l'interprétation statistique de l'entropie.

On se limitera à l'étude d'un système à deux niveaux.

Troisième principe de la thermodynamique.

Toute étude de la thermodynamique statistique est hors programme : l'objectif modeste est ici de faire en sorte que les étudiants associent l'entropie et le manque d'information.

6. Machines thermiques.

Application du premier et du deuxième principes.

Outre l'étude générale des machines dithermes cycliques (efficacité, théorème de Carnot), on s'attachera à présenter une machine réelle en insistant sur la modélisation des évolutions.

Figure 71 Extrait n°2 du programme de thermodynamique de CPGE à compter de 1995¹⁰⁰⁵

Enfin, la volonté d'interprétation par une approche microscopique, déjà présente pour ce qui est du système thermodynamique et de la chaleur (Cf. Chapitres 7 et 8), se retrouve également pour la notion d'entropie. En effet, la partie sur les bilans entropiques se termine en suggérant l'introduction de quelques notions élémentaires sur une interprétation statistique de l'entropie. Aussi, peut-on lire que le programme a pour objectif « *de faire en sorte que les étudiants associent l'entropie et le manque d'information.* » Nous reviendrons sur ce point un peu plus tard dans ce chapitre.

2. La place du deuxième principe en thermodynamique

a. Nécessité du deuxième principe

Pour introduire le deuxième principe de la thermodynamique dans le développement du cours, les enseignants reproduisent le plus souvent ce qui existe dans les manuels. C'est ainsi que,

¹⁰⁰⁵ (Union des Professeurs de Spéciales, 1995 PCSI) pp.4-5

la plupart d'entre eux montrent, à travers quelques exemples, la nécessité d'un deuxième principe pour décrire l'irréversibilité de certaines transformations. Parmi les exemples cités, on trouve généralement la détente de Joule et Gay-Lussac¹⁰⁰⁶ (détente d'un gaz dans le vide) et le phénomène de diffusion de deux gaz de nature différente¹⁰⁰⁷. Un autre exemple, très intéressant, est celui du contact thermique de deux solides de taille finie à des températures différentes.¹⁰⁰⁸ Malheureusement, une analyse bibliographique sur les ouvrages qui ont été étudiés au Chapitre 8, sur le concept de chaleur, montre que cet exemple n'est pas traité de manière satisfaisante. En effet, il est toujours admis de manière systématique que la *température finale* est la même pour les deux solides. Aussi, nous proposons une analyse plus précise permettant de mettre en valeur certaines conséquences importantes du deuxième principe. Nous allons, notamment, introduire la nécessaire complétude des bilans énergétique et entropique pour traiter un problème de thermodynamique, sans faire appel aux machines thermiques¹⁰⁰⁹.

Pour simplifier, considérons deux solides (1) et (2) absolument identiques¹⁰¹⁰ (même quantité de matière $n_1 = n_2 = n$, même nature de matériau), donc de même capacité thermique C_V , mais de températures initiales différentes, notées respectivement T_1 et T_2 . Ces deux solides sont mis en contact thermique. Le système global Σ , constitué de (1) et (2), est isolé thermiquement de l'extérieur par une paroi rigide athermane. En revanche, il peut exister un transfert thermique interne au système global, à travers la surface de contact. On suppose que les transformations sont isochores pour les deux solides¹⁰¹¹. On note par T'_1 et T'_2 les températures finales¹⁰¹². En appliquant le premier principe au système global Σ , qui ne fait intervenir que l'énergie interne U , on a :

$$\begin{aligned}\Delta U_{\Sigma} &= \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 \\ n C_V (T'_1 - T_1) + n C_V (T'_2 - T_2) &= 0\end{aligned}$$

On obtient donc une équation avec deux inconnues T'_1 et T'_2 . Le premier principe seul ne permet pas de montrer que $T'_1 = T'_2 = \dots$

De plus, si $T_1 < T_2$, la relation $T'_1 < T_1 < T_2 < T'_2$ n'est pas contradictoire avec le premier principe. Or, expérimentalement, il n'est jamais constaté que le résultat final correspond à un

¹⁰⁰⁶ Exemple dans (Pérez, 1997) p.104

¹⁰⁰⁷ Exemple dans (Pérez, 1997) p.105

¹⁰⁰⁸ Exemple dans (Pérez, 1997) p.106

¹⁰⁰⁹ Les machines thermiques étant désormais traitées en fin de programme de thermodynamique, soit après l'introduction du premier et du second principe.

¹⁰¹⁰ Cette simplification n'a aucune conséquence sur les conclusions et analyses que nous ferons de ce problème. Elle permet uniquement de ne pas surcharger les développements mathématiques des bilans.

¹⁰¹¹ Le coefficient de dilatation d'un solide peut être considéré comme très faible.

¹⁰¹² T'_1 et T'_2 sont les températures absolues (définies à partir de l'équation d'état des gaz parfaits $PV = nRT$). Cette définition est notamment présente dans les programmes du secondaire (en classe de seconde) lors des réformes des années 1990 (Cf. chapitre 6). Pour le moment, on n'identifie pas ces températures aux températures thermodynamiques définies à partir de l'entropie : $\frac{1}{\theta} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_{N,V}$.

état pour lequel le système à basse température voit sa température diminuer davantage et celui à haute température voit sa température augmenter.

Aussi, dans le cas d'une transformation, comment connaître le sens de l'évolution d'un système ? En outre, comment prédire si un système thermodynamique est à l'équilibre ou en évolution ?

En mécanique, un objet immobile est dans une position d'équilibre stable, s'il se trouve sur un minimum de son énergie potentielle (notée V). Dans le cas contraire, comme la force $\vec{F} = -\overrightarrow{\text{grad}}V$, son évolution se fait vers le minimum de potentiel. En résumé, le sens de l'évolution se fera pour $dV < 0$ et l'équilibre sera lorsque $dV = 0$. En thermodynamique, nous avons donc besoin d'une grandeur physique pour comprendre de façon similaire l'évolution et l'équilibre : c'est le concept d'entropie qui permet de répondre de manière très élégante à ces questions.

Les énoncés courants de la thermodynamique classique font apparaître les concepts d'entropie et d'entropie créée, comme suggérés par l'énoncé de Prigogine (Cf. Chapitre 4). On peut lire alors deux énoncés "modernes" distincts :

1. Pour un *système isolé*, l'entropie, grandeur extensive non conservative, varie telle que :

$$S^P = \Delta S$$

où S^P désigne l'entropie créée par la transformation à laquelle est soumise le système. Ainsi, $S^P > 0$ pour des transformations réelles et $S^P = 0$ pour des transformations effectuées par voie réversible.

2. Pour un *système fermé*, l'entropie, grandeur extensive non conservative, varie telle que :

$$\Delta S = S^e + S^P = \int \frac{\delta Q}{T_f} + S^P$$

où S^e et S^P désignent respectivement l'entropie échangée avec le milieu extérieur et l'entropie créée par la transformation à laquelle est soumise le système.

Cette écriture du deuxième principe (que ce soit pour un système fermé ou isolé) s'est généralisée globalement dans la majorité des ouvrages de thermodynamique destinés au supérieur¹⁰¹³.

Appliquons maintenant, le deuxième principe à l'exemple développé précédemment sur le contact thermique entre deux solides. D'après le premier principe, appliqué au système global Σ (système isolé), au cours d'un petit intervalle de temps, on a :

$$dU_\Sigma = dU_1 + dU_2 = 0$$

En appliquant le deuxième principe à Σ isolé, au cours du même intervalle de temps, on a :

$$dS_\Sigma \geq 0 \Leftrightarrow dS_1 + dS_2 \geq 0$$

Or, en utilisant, cette fois, la définition de la température thermodynamique, $\frac{1}{\theta} = \left(\frac{\partial S}{\partial U}\right)_{n,V}$ on trouve :

$$dS_1 = \left(\frac{\partial S_1}{\partial U_1}\right)_{V_1, n_1} dU_1 + \left(\frac{\partial S_1}{\partial V_1}\right)_{U_1, n_1} dV_1 = \frac{1}{\theta_1} dU_1 \quad \text{puisque } V_1 \text{ est constant.}$$

¹⁰¹³ Voir énoncés dans (Pérez, 1997) p.94 ou dans (Grécias, et al., 1999) p.691

De même,

$$dS_2 = \frac{1}{\theta_2} dU_2 = -\frac{1}{\theta_2} dU_1 \quad (\text{car } dU_2 = -dU_1).$$

Donc

$$dS_{\Sigma} = dU_1 \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) \geq 0$$

Ce résultat nous amène à plusieurs commentaires :

- Lorsque l'ensemble des deux solides évolue vers l'équilibre, l'entropie totale augmente : $dS_{\Sigma} > 0$. Si $\theta_1 < \theta_2$: $dS_{\Sigma} = dU_1 \left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) > 0 \Leftrightarrow dU_1 > 0$. Or $dU_1 = \delta W_1 + \delta Q_1 = \delta Q_1$ (volume constant). Donc $\delta Q_1 > 0$, ce qui signifie qu'il y a un transfert thermique d'énergie du solide (2) vers le solide (1). Autrement dit, l'énergie passe du système pour lequel θ est la plus élevée vers celui pour lequel θ est la plus faible. Insistons sur le fait que c'est la différence de température entre les deux corps, et non la différence entre leurs énergies, qui fixe le sens du transfert thermique ; ce n'est pas nécessairement le corps qui renferme le plus d'énergie qui en cède à l'autre, mais bien celui qui présente la température la plus élevée !
- Lorsque l'équilibre thermodynamique est établi, l'entropie a atteint son maximum. Puisque l'entropie, que nous pouvons considérer comme fonction de U_1 , est extremum, on a $\frac{dS_{\Sigma}}{dU_1} = 0$. Par conséquent : $\left(\frac{1}{\theta_1} - \frac{1}{\theta_2} \right) = 0$ soit $\theta_2 = \theta_1$, donc *deux corps en équilibre thermique ont la même température*.

Finalement, nous venons, d'une part, de montrer comment déterminer le sens de l'évolution d'une transformation et, d'autre part, de démontrer que la température thermodynamique a le même comportement que la température absolue. Ce dernier résultat est très important puisqu'il nous permet d'admettre l'équivalence entre les deux températures et d'écrire finalement $\theta = T$. La définition de la température thermodynamique par la relation $\frac{1}{\theta} = \left(\frac{\partial S}{\partial U} \right)_{N,V}$ introduite dans les programmes de CPGE de 1995, a un caractère extrêmement fondamental, dans la mesure où elle représente une propriété intrinsèque d'un corps quelconque, indépendamment de tout thermomètre particulier. D'après ce qui précède, cette définition nous fournit une justification du principe zéro de la thermodynamique, qu'il n'est plus nécessaire de poser *a priori*. Ce principe devient alors une simple conséquence de ce que les affirmations $T_A = T_C$ et $T_B = T_C$ entraînent l'affirmation $T_A = T_B$. Mais, insistons bien sur le fait que ce raisonnement n'est possible que parce que nous avons défini auparavant le concept d'équilibre thermique (voire même d'équilibre thermodynamique) qui postule l'existence d'une grandeur que l'on appelle *température* (en l'occurrence *température absolue*).

Aussi, l'introduction de l'entropie sous forme de bilan permet de montrer sa complétude vis à vis du premier principe et donne également une définition du concept de température distinct de la notion de chaleur directement utilisable par les étudiants.

b. Un constat sur le deuxième principe

Jamais, dans l'histoire des sciences, une loi physique n'a eu autant d'énoncés que le deuxième principe de la thermodynamique. Dans leur ouvrage de 2005, *Challenges to the second law of thermodynamics. Theory and experiment*¹⁰¹⁴, Capek et al. ont répertorié vingt et une possibilités d'énoncer le deuxième principe. Si cette multitude d'énoncés peut être considérée comme une richesse indiscutable, elle reste néanmoins une source de multiples difficultés. L'énoncé proposé par Prigogine en 1962 s'est progressivement imposé dans la littérature. D'ailleurs, les réformes des années 1974 et 1995 le choisissent comme la présentation « officielle » du deuxième principe. L'entropie apparaît alors comme une fonction d'état qui caractérise le système thermodynamique et dont les variations ΔS sont liées à deux grandeurs : l'entropie échangée et l'entropie créée. Ce dernier terme permettant alors de caractériser le degré de réversibilité d'une transformation réelle. La question que l'on peut se poser est de savoir si cette présentation a modifié la conception des étudiants et des enseignants sur la notion d'entropie ?

Dans la réédition de 1991, du livre *La dégradation de l'énergie* de Bernard Brunhes (1867-1910), Georges Lochak (1930,20..) souligne dans la préface : « ... les physiciens entretiennent avec le second principe de la thermodynamique des relations ambiguës Car s'il est vrai que le second principe représente une autorité suprême, il reste un mal-aimé. Sorte de statue du Commandeur, on le craint, on fait appel à lui (il le faut bien), mais, à l'irréversibilité qu'il représente et à la flèche du temps qu'il impose, tout le monde préfère les charmes de la stationnarité et de la symétrie. »¹⁰¹⁵

Cette préface fait écho à ce que Brunhes, exprimait déjà en 1909 « ... [Clausius] a introduit dans la science une notion "prodigieusement abstraite" : celle de **l'entropie**, très féconde à coup sûr, mais qui est, au moins en apparence, plus difficilement accessible à l'intelligence que celle de **l'énergie** »¹⁰¹⁶. Et Brunhes rajoute « C'est certainement là une des raisons pour lesquelles le second principe a eu tant de difficultés à pénétrer dans les esprits. »¹⁰¹⁷

Ce que soulève Brunhes reste aujourd'hui, une belle illustration du sentiment qu'ont les enseignants et les étudiants sur le deuxième principe : c'est un principe difficile à enseigner, à comprendre et à appliquer¹⁰¹⁸. Il n'en reste pas moins que les concepts d'énergie et de transfert d'énergie sont également comme nous l'avons vu dans les précédents chapitres, très délicats à introduire, même s'ils semblent *a priori* plus familiers (peut-être est-ce en cela que réside le problème sur le premier principe).

¹⁰¹⁴ (Cápek, et al., 2005)

¹⁰¹⁵ (Brunhes, 1991), préface

¹⁰¹⁶ (Brunhes, 1991) p.237

¹⁰¹⁷ (Brunhes, 1991) p.237

¹⁰¹⁸ Dans un article de 1994, *Entropy and the second law: A pedagogical alternative*, Baierlein déclare que pour l'enseignant et l'étudiant, l'introduction de l'entropie est une étape difficile (Baierlein, 1994)

En ce qui concerne le deuxième principe, de nombreux articles qui lui sont consacrés ont été publiés dans les années 1990 et 2000. Aussi, notre mode de recherche sur cette dernière partie n'est pas tout à fait identique à celui adopté dans les précédents chapitres. En effet, nous proposons ici de présenter et d'analyser les résultats de ces nombreux articles de recherches. Nous appuierons également notre analyse sur deux ouvrages qui serviront de référence pour les classes préparatoires et du supérieur que nous avons déjà présentés précédemment : *Thermodynamique fondements et applications* publié en 1997 par Pérez¹⁰¹⁹ et *Physique Sup. PCSI* publié en 1999 par Grécias et Migeon¹⁰²⁰. L'objectif est donc de réaliser un état des lieux de l'enseignement du deuxième principe et de la notion d'entropie et de chercher à mettre en évidence le type de difficultés que l'on peut rencontrer.

L'introduction des bilans pour présenter les premier et deuxième principes permet aux auteurs des manuels de physique de proposer une résolution systématique d'un problème de thermodynamique, basée sur le calcul des grandeurs d'état et des grandeurs d'échange. Pourtant, le deuxième principe n'est généralement pas pris en compte dans l'analyse thermodynamique. En effet, au cours du temps, les étudiants perdent facilement de vue le contexte d'ensemble, et une compréhension intellectuellement satisfaisante de ce que représente l'entropie demeure inatteignable. Cet état de fait est confirmé par une enquête, publiée en 2006 et menée auprès des étudiants, par Cochran et *al.* dans laquelle les questions consistaient à indiquer si certains processus pouvaient se produire¹⁰²¹. En effet, cette étude a montré que les réponses des étudiants révèlent plusieurs difficultés conceptuelles, y compris la difficulté de reconnaître la pertinence du deuxième principe de la thermodynamique, malgré l'instruction correcte et compétente qui a été mise en place. Généralement, les étudiants comptent uniquement sur le premier principe pour déterminer si les processus présentés peuvent se produire dans la Nature. Ce principe de conservation est tellement ancré dans les esprits des étudiants qu'une autre enquête menée en 2009 par Christensen et *al.* a permis de mettre en évidence que plus de la moitié des étudiants donnent, même après enseignement du deuxième principe, des réponses basées sur la conservation de l'entropie¹⁰²². Il s'avère que deux siècles après l'écriture du deuxième principe le vœu de Clausius reste toujours sans réponse :

« *Je crois pourtant qu'on trouvera le deuxième principe aussi simple et naturel que le premier, aussitôt qu'on aura acquis les connaissances nécessaires.* »¹⁰²³

¹⁰¹⁹ (Pérez, 1997)

¹⁰²⁰ (Grécias, et al., 1999)

¹⁰²¹ *Development and assessment of research-based tutorials on heat engines and the second law of thermodynamics*, in American Journal of physics (Cochran, et al., 2006)

¹⁰²² *Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course*, in American Journal of physics (Christensen, et al., 2009)

¹⁰²³ (Clausius, 1868a) p.153

Pour tenter de comprendre ces difficultés, nous proposons d'analyser deux points, intimement liés au deuxième principe de la thermodynamique. Le premier concerne l'intérêt du bilan entropique dans la qualification des voies de transformations en thermodynamique. En effet, le deuxième principe doit permettre de trancher si une transformation se fait par voie réversible ou par voie irréversible à travers le calcul de l'entropie créée. L'autre point concerne évidemment, les significations qui peuvent être données à l'entropie.

Qu'est-ce que l'entropie en thermodynamique ? L'introduction dans les programmes de PC, en 1995 de l'interprétation de l'entropie en terme de manque d'information est-elle une solution pour son enseignement et son appropriation par les étudiants ?

3. Les notions de réversibilité et d'irréversibilité

Un système thermodynamique à l'équilibre, peut évoluer si au moins une de ses variables d'état change de valeur à la suite d'une perturbation provenant, soit de la suppression de contraintes internes soit d'échanges avec le milieu extérieur sous forme de transfert d'énergie par travail, par transfert thermique ou sous forme de transfert de matière. On dit que le système subit une *transformation*. Cette définition fait référence à plusieurs concepts tels que le système, état d'équilibre, variables d'état, milieu extérieur, travail, transfert thermique (ou chaleur). Or, comme nous l'avons vu pour la notion de système (Cf. chapitre 7) et de chaleur (Cf. chapitre 8), les définitions proposées sont souvent imprécises et les concepts deviennent alors difficiles à utiliser et à appliquer de manière correcte.

S'ajoutent à ces ambiguïtés, celles, encore plus difficiles, qui sont liées à la façon dont se déroule la transformation, c'est-à-dire les ambiguïtés liées aux notions de réversibilité, irréversibilité et de quasistaticité.

a. Transformations par voies réversibles et par voies irréversibles

Les auteurs, comme nous l'avons vu, envisagent, grâce au deuxième principe, l'ensemble de toutes les transformations subies par un système en deux groupes : les transformations par voies réversibles et les transformations par voies irréversibles¹⁰²⁴. Or, la nature de la transformation nécessite l'introduction du concept d'entropie et son degré de réversibilité ne peut être déterminé clairement qu'en calculant la valeur de l'entropie produite : si la valeur de l'entropie créée est nulle alors la transformation est jugée réversible ; si la valeur est strictement positive la transformation est irréversible. Enfin, si la valeur de l'entropie créée est négative, la transformation est dite *impossible*.

¹⁰²⁴ On désignera par la suite ces transformations par les expressions : transformations réversibles ou transformations irréversibles.

Dans un article très détaillé qui traite de cette notion difficile, Méheut et *al.* ont montré en 2004, que de l'analyse des textes historiques se dégagent trois points de vue de la notion d'irréversibilité¹⁰²⁵ :

- Les transformations et transfert d'énergie en termes de dissipation et dégradation
- Un point de vue cinématique se rapportant à l'évolution des systèmes
- Une approche en termes de production d'entropie

Méheut et *al.* mettent en évidence que les étudiants rencontrent beaucoup de difficultés et ne disposent pas de critères efficaces leur permettant d'analyser les situations, mais surtout de conclure de façon sûre à la réversibilité ou non de la transformation. De plus, pour un certain nombre d'étudiants qui reconnaissent le caractère réversible ou irréversible, les arguments utilisés sont souvent incomplets et les conduisent dans certaines situations à des contradictions dans leur façon de raisonner. Les étudiants privilégient de manière prépondérante l'approche cinématique avec les critères suivants : possibilité du retour à l'état initial (cet argument est souvent lié à la confusion entre transformation réversible et cycle), renversabilité de la transformation, suite d'états d'équilibre, lenteur/rapidité de la transformation. Le fait que les étudiants privilégient l'approche cinématique s'explique par le fait que les programmes de CPGE (Cf. Chapitres 5 et 6) soulignent le critère de vitesse dans l'établissement des équilibres thermodynamiques. En outre, comme nous l'avons précédemment souligné l'approche en termes de dégradation d'énergie est désormais totalement absente des manuels (dans le secondaire et dans le supérieur). Enfin, l'approche en termes de production d'entropie reste difficile à mettre en œuvre, comme le montrent dans un article du BUP¹⁰²⁶ de 2007, Duprez et *al.*, à cause notamment de la difficulté dans l'approche calculatoire des bilans (détermination de la variation d'entropie, par utilisation des identités thermodynamiques, puis de l'entropie échangée par utilisation du premier principe).

Insistons sur le fait que, toutes les transformations réelles sont irréversibles et que les transformations réversibles n'existent pas. Malgré leur caractère idéal et irréel, et en raison même de leur propriété limite, les transformations réversibles jouent dans les raisonnements thermodynamiques un rôle capital. En effet, elles permettent non seulement de connaître les variations d'énergie et d'entropie au cours de transformations réelles qui sont nécessairement irréversibles mais elles imposent aussi des valeurs limites que certaines grandeurs physiques ne peuvent pas atteindre telles que le rendement optimal d'un moteur thermique, le travail maximal *etc.* En outre, elles peuvent être considérées comme des cas limites vers lesquels tendent les transformations réelles lorsque les effets dissipatifs sont rendus négligeables et lorsqu'elles deviennent infiniment lentes : c'est-à-dire en évolution quasistatique.

¹⁰²⁵ (Méheut, et al., 2004)

¹⁰²⁶ *A propos du concept de source thermique* par Chantal Duprez, et Martin Méheut, *in* (Duprez, et al., décembre 2007)

b. Transformations par voie quasistatique et réversibilité

La transformation par voie quasistatique¹⁰²⁷ fait son apparition dans les ouvrages du supérieur dans les années 70, comme nous avons pu le voir dans le chapitre 5. Expérimentalement, une transformation réversible ne peut être réalisée qu'approximativement, à travers l'introduction du concept de transformation quasistatique à condition que le système soit constamment à l'équilibre thermodynamique avec le milieu extérieur. Dans un article de 2007, intitulé *What is a reversible process?*, Samiullah explique que les définitions proposées dans les manuels pour l'opération réversible sont souvent confuses et que la distinction entre réversible et quasistatique n'est pas satisfaisante. Nous avons notamment montré que la définition proposée par Joyal ne permettait pas de distinguer clairement la notion de réversibilité et de quasistaticité (Cf. Chapitre 5). Samiullah propose la définition suivante pour un processus quasistatique :

*« Une transformation quasistatique est une modification de l'état d'un système qui se déroule de façon infiniment lente de telle sorte que , à chaque instant, le système est en équilibre thermodynamique avec son environnement et ses propriétés thermodynamiques, telles que le volume , la pression et la température, restent bien définis tout au long du processus. »*¹⁰²⁸

En introduisant le concept de processus quasistatique et en faisant appel à la définition de l'entropie, Samiullah définit un processus réversible tout en lui donnant un sens physique :

*« Les processus réversibles sont ceux dans lesquels l'entropie du système isolé reste constante, et qui peuvent donc avoir lieu dans le sens inverse. Un processus strictement réversible est, bien sûr , un cas limite idéal; les processus qui se produisent réellement dans la nature peuvent être réversibles compte tenu d'un certain degré d'approximation. »*¹⁰²⁹

Ainsi, bien que tous les processus quasistatiques ne soient pas réversibles, la réciproque que tous les processus réversibles sont quasistatiques peut être vraie. Comme l'entropie n'est pas constante dans les processus qui impliquent des discontinuités, alors un processus réversible doit être mené de façon quasistatique¹⁰³⁰. Par conséquent, même si certains auteurs donnent une définition d'une transformation quasistatique qui s'identifie avec celle d'une transformation

¹⁰²⁷ De même on emploiera le terme transformation quasistatique.

¹⁰²⁸ « *A quasi-static process is a change in the state of a system that is conducted infinitesimally slowly such that, at each instant, the system is in thermodynamic equilibrium with its environment, and its thermodynamic properties, such as volume, pressure, and temperature, remain well-defined throughout the process* » (Samiullah, 2007) p.206

¹⁰²⁹ « *Reversible processes are those in which the entropy of the closed system remains constant, and which can therefore take place in the reverse direction. A strictly reversible process is, of course, an ideal limiting case; processes actually occurring in Nature can be reversible only to within a certain degree of approximation.* » (Samiullah, 2007) p.206

¹⁰³⁰ Exemple dans (Gréacias, et al., 1999) pp.642-643

réversible, pour la plupart des auteurs¹⁰³¹ un processus quasistatique peut être réversible ou irréversible selon les conditions de la transformation. La détente de Joule-Gay-Lussac (détente d'un gaz dans le vide) est un très bon exemple de transformation qu'on peut rendre quasistatique, mais qui à l'évidence, ne peut jamais être réversible.

Du point de vue thermodynamique, seule la distinction réversible/irréversible importe vraiment. En effet, le deuxième principe permet une distinction nette entre ces deux types de transformations, alors qu'aucun énoncé fondamental ne se réfère aux transformations quasistatiques. En outre, comme nous l'avons signalé précédemment, la notion de transformation par voie quasistatique n'est pas explicitement présente dans le programme. Elle est introduite dans certains manuels pour permettre de calculer facilement les actions des forces de pression lors d'une transformation. Dans ce cadre, la pression extérieure à laquelle est soumise le système peut s'identifier à la pression du gaz subissant la transformation.

Ainsi, pour ces différentes raisons, une minorité d'auteurs ignorent cette notion et font le choix de ne pas en parler. Par exemple, Pérez dans un article de 1993 (Cf. Chapitre 6), propose d'abandonner ce terme¹⁰³². Ou encore, Riollet en 1992, dans son article *Thermodynamique appliquée. L'entropie et le second principe*, n'introduit pas la transformation quasistatique et n'énonce que la définition d'une transformation réversible : « Une transformation élémentaire est dite réversible si elle peut également s'effectuer en sens inverse sans que l'on ait à modifier ni la nature du système ni les actions imposées de l'extérieur et si tous les échanges de travail et de chaleur qui ont lieu, tant avec l'extérieur du système qu'à l'intérieur de celui-ci, restent, dans l'évolution inverse, individuellement égaux mais de signes contraire à ceux de l'évolution directe. »¹⁰³³

Cette définition permet de mettre en lumière un point essentiel. En effet, il n'apparaît nullement nécessaire, pour satisfaire à la réversibilité, que la vitesse d'évolution soit limitée, ni que les vitesses de déplacement des éléments matériels constituant le système soient nulles ou négligeables. Aussi, en associant systématiquement la notion de quasistaticité à la notion de réversibilité, il y a un risque de laisser se répandre l'idée selon laquelle la réversibilité réclamerait obligatoirement une infinie lenteur des évolutions. Cette condition est en fait inspirée par le fait que nombre de transformations réelles deviennent à la limite réversible lorsque les vitesses tendent vers zéro, et que sous cette condition les facteurs d'irréversibilités disparaissent. Mais, de façon générale, la notion de réversibilité à travers le deuxième principe n'interdit pas que des évolutions rapides puissent, sous certaines conditions, être réversibles.

Aussi, on revient à qualifier la réversibilité d'une transformation uniquement par la détermination de l'entropie créée. Néanmoins, dans cette approche relativement calculatoire, il sera nécessaire

¹⁰³¹ Par exemple dans (Grélias, et al., 1999) p.690

¹⁰³² Cf. Chapitre 5, (Pérez, et al., octobre 1993) p.31

¹⁰³³ (Riollet, 1992)

de donner une signification aux grandeurs introduites et notamment à l'entropie. C'est en l'occurrence l'objet du prochain paragraphe.

4. Les significations de l'entropie

Si les étudiants ont beaucoup de difficultés à comprendre ce que représente l'entropie, c'est aussi à cause de ses multiples significations que nous proposons d'exposer dans ce paragraphe.

a. La flèche du temps

L'énoncé moderne du deuxième principe de la thermodynamique est parfois clairement relié à la notion de temps. On peut ainsi lire, dans certains ouvrages de thermodynamique, que la positivité de l'entropie créée S^P est liée au fait que ΔS traduit la variation d'entropie pour un système évoluant d'un temps t_1 à un temps $t_2 > t_1$. Cette interprétation temporelle de S^P fait donc référence à un concept non présent en mécanique et dans le premier principe : le temps¹⁰³⁴. En effet, à partir de la connaissance à un instant quelconque des positions et vitesses des particules composant un système donné, la mécanique classique, du moins en principe, permet de déduire avec certitudes les positions et vitesses à tout instant passé ou futur. La mécanique classique décrit pareillement le mouvement des particules dans le sens temporel normal et dans le sens temporel inverse. Tous les processus y sont renversables : s'ils peuvent se produire suivant un certain ordre temporel, ils peuvent également se produire suivant l'ordre inverse. La mécanique classique dans le cadre d'étude de systèmes conservatifs (toutes les forces dérivent d'une énergie potentielle) ne distingue pas le passé du futur. Ce caractère figé du temps se manifeste dans l'existence des principes de conservation : l'énergie mécanique et la quantité de mouvement d'un système se conservent¹⁰³⁵. Par conséquent, aucune grandeur physique s'exprimant en fonction de celles-ci ne permet de différencier le passé, le présent et le futur.

Contrairement à la mécanique classique, la thermodynamique assigne, grâce à la croissance de l'entropie dans les systèmes isolés, une direction bien précise à l'écoulement du temps en distinguant les événements futurs des événements passés. A titre d'exemple, prenons le cas d'une tasse intacte sur une table et d'une tasse brisée sur le plancher. On peut placer aisément la tasse sur la table dans le passé à la tasse brisée sur le plancher dans le futur ; mais on ne fera jamais l'inverse ! L'augmentation de l'entropie avec le temps est un exemple de ce qui est appelée *la flèche du temps* indiquant le sens de son écoulement. Ainsi, comme l'énonce Prigogine, en juin 1993, dans la préface de l'ouvrage de Pérez, la thermodynamique a vocation universelle :

« [...] L'entropie est associée à la **flèche du temps**. Il n'est peut-être pas sans intérêt de rappeler que la citation de Clausius a été énoncée six ans après la parution de l'ouvrage célèbre de Darwin

¹⁰³⁴ (Pérez, 1997) p.97

¹⁰³⁵ A noter que cela n'en fait pas des grandeurs conservatives.

sur *l'origine des espèces*. Le deuxième principe de la thermodynamique est en quelque sorte la réponse de la physique à la biologie du vivant.»¹⁰³⁶

Dans son ouvrage de 1988, *A brief history of time. From the big bang to black holes*, Hawking déclare que les lois de la physique ne font pas de distinction entre les directions future et passée du temps et qu'il y a fondamentalement trois flèches du temps différentes qui permettent de faire cette distinction¹⁰³⁷. D'abord, il y a la flèche thermodynamique, qui stipule que le temps croît dans le sens de l'augmentation de l'entropie. Ensuite, il y a la flèche psychologique, au sens de Henri Bergson (1859-1941), c'est la direction selon laquelle nous sentons le temps passer, dans laquelle nous nous souvenons du passé mais ne savons rien du futur. Enfin, il y a la flèche cosmologique, proposée par Fred Hoyle (1915-2001), qui définit le sens positif du temps d'après l'expansion de l'Univers. Bien que Hawking arrive à montrer que les trois flèches pointent toutes dans la même direction du temps, la question d'une quelconque relation entre ces diverses flèches n'a rien d'évident ou même de démontré.

Dans tous les cas, les diverses considérations associées à ce problème, comportent toutes une forte connotation philosophique, fort intéressante certes, mais qui sortent du cadre de ce travail. Finalement, au cinquième siècle, Saint Augustin résume de manière peut-être assez magistrale la signification du temps dans ses *Confessions* : « *Qu'est-ce que le temps ?* » s'interroge-il. « *Si personne ne me le demande, je le sais bien ; mais si on me le demande, et que j'entreprene de l'expliquer, je trouve que je l'ignore.* »¹⁰³⁸

Aussi, il semble difficile d'associer à l'entropie une grandeur elle-même laborieuse à comprendre.

b. La signification statistique

La réforme de 1995 (Cf. Figure 71) souhaite introduire, dans la partie consacrée au deuxième principe, quelques « *notions élémentaires sur l'interprétation statistique de l'entropie.* » Cependant, cette interprétation comporte l'introduction d'un système de particules et de micro-états et utilise l'approche statistique de Boltzmann. (Cf. Chapitre 1) Ce dernier a établi que l'entropie est liée au nombre de micro-états, noté Ω , d'un système isolé constitué de plusieurs particules. Par la suite, Planck a postulé que l'entropie est donnée par la formule :

$$S = k_B \ln \Omega$$

Cette formule est fondée sur le postulat de l'équiprobabilité des micro-états et l'hypothèse ergodique qui consiste à identifier la moyenne d'une variable sur le temps (mesure macroscopique expérimentale) avec la moyenne sur tous les micro-états possibles prédits par la physique

¹⁰³⁶ (Pérez, 1997) Préface.

¹⁰³⁷ (Hawking, 1988)

¹⁰³⁸ Les confessions de Saint Augustin, Livre XI chapitre 14 in (Saint Augustin, 1840) p.185

statistique (moyenne de l'ensemble statistique). En conséquence, un système isolé tend vers le macro-état ayant le plus grand nombre de micro-états possibles et, par conséquent, tend vers l'entropie maximale. Cependant, cette signification statistique de l'entropie est valable uniquement pour un ensemble micro-canonique (système isolé). Gibbs en a donné une expression plus générale :

$$S = -k_B \sum_i p_i \ln p_i$$

Elle peut être appliquée également aux ensembles canonique (système fermé) et grand-canonique (système ouvert) où p_i est la probabilité que le système soit dans le micro-état i .

Dans l'expression statistique de l'entropie, la constante k_B a les dimensions d'une énergie par une température, elle s'exprime en J/K. Donc, le sens statistique de l'entropie est explicitement lié aux grandeurs d'énergie et de température lesquelles se réfèrent à la thermodynamique phénoménologique. Il est clair que cette façon de présenter n'est qu'une manière de faire valoir que la signification thermodynamique de l'entropie ne devrait pas être séparée de la signification statistique.

Mais, cette interprétation statistique est en dehors de notre étude. De même, les consignes de 1995 concernant les programmes, stipulent clairement que: « toute étude de thermodynamique statistique reste hors programme »¹⁰³⁹. Aussi, les manuels préfèrent orienter leur présentation de l'entropie à l'échelle microscopique à travers les notions qualitatives d'ordre et de désordre.

c. La notion d'ordre et de désordre

Le mot *entropie* a été également introduit dans d'autres domaines comme une métaphore du chaos général ou du désordre. Dans l'enseignement de la thermodynamique, le sens de désordre est souvent utilisé, comme nous l'avons vu au chapitre 5, pour distinguer les transferts par travail et par transfert thermique. Mais, l'idée de désordre est également utilisée pour décrire la notion d'entropie. Il n'est donc pas étonnant de trouver dans les manuels ou d'entendre parfois que l'entropie permet de mesurer le degré de désordre ou que ce dernier est désigné par une quantité appelée entropie. On peut ainsi lire dans le *Thermodynamique* de Pérez : « Aussi dit-on souvent que l'entropie mesure la perte de corrélation ou de cohérence dans une assemblée de particules, bref le désordre. »¹⁰⁴⁰ Ou encore, de l'ouvrage de Grécias et Migeon, de façon plus nuancée : « on a longtemps associé à l'entropie la notion de désordre. »¹⁰⁴¹

¹⁰³⁹ La rénovation des programmes des CPGE en 2014 amènera les concepteurs de programmes à faire évoluer ce point de vue, car désormais la thermodynamique statistique est introduite en deuxième année de CPGE.

¹⁰⁴⁰ (Pérez, 1997) p.279

¹⁰⁴¹ (Grécias, et al., 1999) p.712

Pour reprendre l'exemple de la tasse, la tasse intacte sur une table est en état élevé d'ordre, mais la tasse brisée sur le plancher est en désordre. Aussi, l'entropie maximum sera associée au second cas.

Cependant les mots ordre et désordre sont des mots familiers et purement qualitatifs. Nous avons déjà souligné l'insuffisance de ces adjectifs pour distinguer la notion de chaleur et de travail (Cf. chapitre 5). Afin de trouver un sens à ces mots, il faut les relier au nombre de micro-états ou multiplicité. Et comme nous l'avons déjà dit, en 1994, Baierlein montre que ce lien devient clair avec l'introduction de la notion de corrélation comme un intermédiaire conceptuel :

Ordre \leftrightarrow corrélations fortes \leftrightarrow multiplicité faible

Désordre \leftrightarrow absence de corrélations \leftrightarrow multiplicité grande

Il devient alors possible de se référer à l'entropie comme une mesure de désordre. Cependant, cette phrase est plutôt une source de difficultés. En effet Viard¹⁰⁴² a étudié les conceptions des étudiants de DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies, équivalent de l'actuel Master 2) sur l'entropie, en leur posant la question suivante : « *on considère un gaz isolé thermiquement qui se détend de façon réversible. Que devient l'entropie du gaz dans cette transformation ?* »

Or, bien que sept interviewés sur dix aient mentionné leur connaissance de la relation $dS = \delta Q/T$, déterminant la dépendance de la variation de l'entropie à l'égard de la quantité d'énergie échangée par transfert thermique (nulle dans le cas présent) ; ils déclarent tous que « *l'entropie c'est le désordre ou la mesure du désordre; si le volume augmente, le désordre augmente, donc l'entropie augmente* »¹⁰⁴³.

En 1992, Brosseau et al. ; montrent que l'erreur provient d'une centration de l'étudiant sur un seul aspect de l'entropie : « *le désordre spatial* » sans tenir compte de l'entropie cinétique. Dans leur article, Brosseau et al., présentent, l'entropie d'un système comme la somme de deux quantités : l'une fonction du volume, V, appelée *entropie spatiale*, l'autre de la température T, appelée *entropie cinétique* :

$$S = S(V, T) = S_{\text{spatiale}}(V) + S_{\text{cinétique}}(T)$$

Ces quantités peuvent varier indépendamment l'une de l'autre et leurs variations peuvent se compenser. La première quantité est liée à l'arrangement des molécules, il s'agit de la partie spatiale de l'entropie ($S_{\text{spatiale}}(V)$). La deuxième quantité, dépendante de la température, est déjà présente chez Clausius (Cf. Chapitre 1) chez qui elle garde un caractère beaucoup plus abstrait, voire obscur, à cause de son lien avec le transfert thermique. C'est Boltzmann qui lui donne un sens physique en estimant que la partie cinétique ($S_{\text{cinétique}}(T)$), s'intéresse à la distribution des vitesses des molécules conséquemment aux travaux de Maxwell sur le gaz parfait. L'entropie cinétique est donc reliée à l'arrangement des vitesses des molécules dans *l'espace des vitesses*, contrairement à l'entropie spatiale liée à l'arrangement des molécules dans *l'espace réel*.

¹⁰⁴² Etude menée en 1988 par Jean Viard, résultat publié in (Brosseau, et al., 1992) p.15

¹⁰⁴³ (Brosseau, et al., 1992) p.15

Brosseau et *al.* proposent alors une représentation schématique des différentes contributions des grandeurs externes ou internes au système sur chaque terme de l'entropie. (Cf. Figure 72)

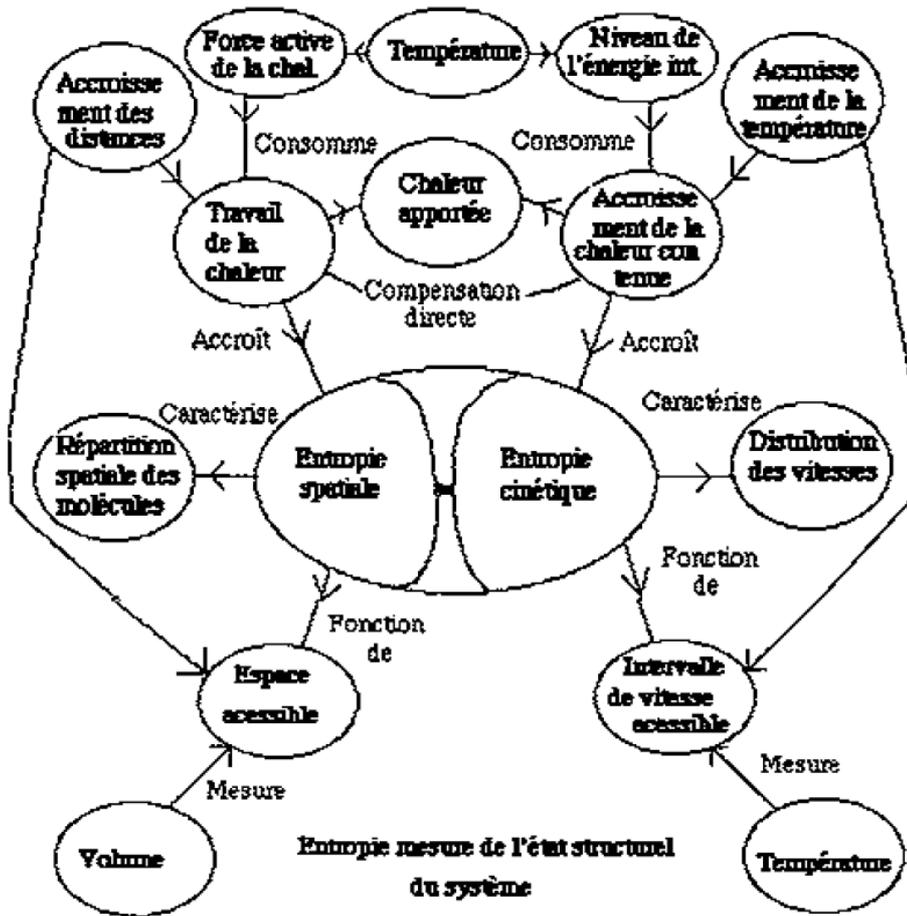


Figure 72 Représentation de l'entropie selon Brosseau et Viard¹⁰⁴⁴

Mais cette représentation est tronquée chez l'étudiant selon Brosseau et *al.* En effet, l'entropie cinétique est éliminée, mais l'espace accessible est maintenu au prix d'une réorganisation autour de la seule idée du désordre spatial, comme le montre la Figure 73.

¹⁰⁴⁴ (Brosseau, et al., 1992) p.14

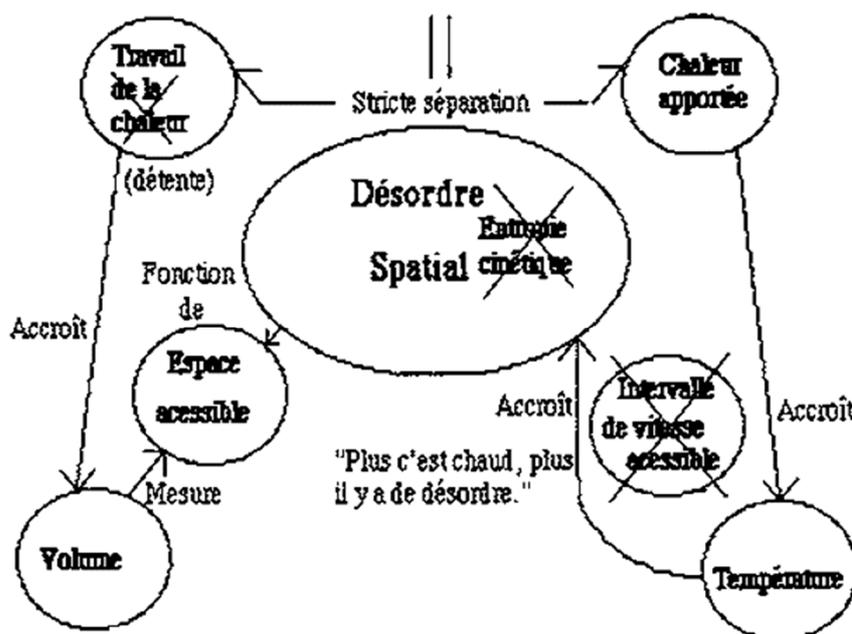


Figure 73 Représentation conceptuelle de l'entropie dans le sens commun¹⁰⁴⁵

Ce modèle de désordre spatial, utilisé par les étudiants et qui fonctionne de façon satisfaisante dans le cas d'une détente isotherme, est peut-être une indication évidente selon laquelle les étudiants ont beaucoup de difficultés à faire des raisonnements impliquant plusieurs variables. Aussi, l'interprétation via l'ordre et le désordre semble, malgré une simplicité évidente, relativement difficile à appliquer lors de transformations faisant appel à des fonctions de plusieurs variables.

Les recommandations du programme suggèrent donc d'orienter l'interprétation de l'entropie sur un autre aspect (Cf. Figure 71) : « faire en sorte que les étudiants associent l'entropie et le manque d'information. »

d. La perte de l'information

La théorie de l'information introduite par Claude Elwood Shannon (1916-2001) en 1948, a permis de retrouver la notion d'entropie sous un éclairage nouveau. L'entropie peut être vue comme une mesure de notre *ignorance* ou une *perte d'informations* vis-à-vis d'une situation donnée, comme le soulignent Grécias et Migeon dans leur ouvrage à destination des étudiants de CPGE :

¹⁰⁴⁵ (Brosseau, et al., 1992) p.14

« les théories plus récentes associent entropie et information manquante sur un système. »¹⁰⁴⁶

Le lien mathématique qui a été établi entre la théorie de l'information et la thermodynamique peut être perçu de la manière suivante : la croissance de l'entropie correspond toujours à une diminution de l'information. Pour illustrer cette phrase, reprenons l'exemple de la tasse intacte et de la tasse brisée. On peut, lorsque la tasse est parfaitement entière, situer chacune des parties qui la composent, comme les dessins décoratifs, le bord supérieur, l'anse, voire même, chacune des molécules de la céramique. Seulement, lorsque la tasse est brisée, on perd ces informations puisque l'ensemble est éparpillé sur le sol et il devient alors difficile de reconstituer l'ensemble de la tasse. Aussi, l'état de plus haute entropie est celui sur lequel on sait moins de chose. Cet exemple illustre bien la relation entre l'entropie et l'information : l'une croît quand l'autre décroît et vice versa. La simplicité de cette relation a enrichi à des degrés divers plusieurs disciplines différentes, voire indépendantes, comme l'informatique, la thermodynamique, la biologie, la psychologie, l'économie et la linguistique. Il n'est donc pas étonnant que les utilisations de la théorie de l'information par de nombreux chercheurs, conduisent à des excès et des exploitations abusives.

Des débats houleux ont surgi ici et là, donnant lieu à de petites phrases et des échanges de répliques cinglantes entre les antagonistes. L'un des premiers motifs de polémique se trouve dans le vocabulaire et tient surtout à l'utilisation d'une terminologie jugée inadéquate bien que séduisante : « information », « entropie », « bruit », « cybernétique » *etc.* Ainsi, estime-t-on que le mot entropie est sujet à caution car il amène inévitablement à des rapprochements avec la physique que certains jugent déplacés. Rappelons que la signification de l'entropie de l'information se rapporte à l'analyse, la création, le codage et le décodage d'un message ; alors que l'entropie thermodynamique est liée à l'énergie. A l'évidence, l'information n'est pas l'énergie et il peut sembler abusif de laisser croire qu'il est possible de les exprimer dans les mêmes termes. Léon Brillouin (1889-1969) a bien tenté un changement de terminologie, en proposant pour sa part, le mot « *néquentropie* »¹⁰⁴⁷ pour désigner l'entropie dont parle la théorie de l'information, le préfixe utilisé permettant de rendre compte de la différence de signe avec celle utilisée en thermodynamique. Mais, cette négation a surtout eu pour effet de rendre la compréhension des concepts délicate et de provoquer par voie de conséquence, de nombreux abus de langage. On peut penser que ces polémiques étaient prévisibles comme le soulignait John Von Neumann (1903-1957) en conseillant Shannon à adopter le mot entropie :

¹⁰⁴⁶ (Grélias, et al., 1999) p.712

¹⁰⁴⁷ Dans *Science et théorie de l'information*, Léon Brillouin, Paris, Masson 1959

« Vous devriez l'appeler entropie. Ce nom est déjà utilisé [en mécanique statistique]. Et comme, personne ne sait ce qu'est réellement l'entropie, vous aurez ainsi dans un débat, toujours l'avantage. »¹⁰⁴⁸

Aussi, une dernière interprétation peut être donnée à l'entropie en lien avec les significations statistiques, il s'agit de l'homogénéité des systèmes thermodynamiques. C'est l'objet du prochain paragraphe.

e. L'homogénéité

Il arrive également d'interpréter l'entropie comme étant une mesure du taux d'homogénéité d'un système. Cela découle du fait que dans l'interaction thermique de deux systèmes, le système global évoluera dans le sens où les différences de température (tout comme les différences de pression ou de concentration) tendent à disparaître et par voie de conséquence il se trouve alors dans un état d'homogénéité maximale¹⁰⁴⁹. Ainsi, l'entropie est maximale lorsque l'homogénéité est parfaite, lorsque tout est uniforme, lorsqu'il n'existe plus aucun gradient de quoi que ce soit. Cet état de fait n'est pas sans lien avec la théorie de l'information et la notion de l'ordre/désordre. En effet, cette propriété peut se formuler autrement en disant que l'absence d'homogénéité représente la quantité d'information contenue dans un système. Par exemple, le fait de reconnaître dans notre exemple, qu'il s'agisse d'une tasse, est lié à l'inhomogénéité de la distribution de la céramique dans l'espace. Si on casse la tasse, la céramique est alors réduite en infimes morceaux, tout semble homogène et il devient alors impossible de savoir quelle était la nature initiale de l'objet si l'on ne l'avait pas vu auparavant : l'information disparaît. Ainsi, selon le deuxième principe, l'ordre et l'information d'un système isolé tendent à disparaître, et ce système finit par atteindre un état d'homogénéité maximale dans lequel plus rien de notable ne se passe.

Cette interprétation de l'entropie en terme d'homogénéité peut conduire à des conclusions erronées dans certaines situations impliquant des phénomènes d'effusion. L'exemple de la thermodiffusion suffit à dissocier le deuxième principe de l'idée d'évolution vers le désordre ou l'homogénéité (ou uniformité). En effet, considérons deux enceintes reliées par un canal et remplies d'un mélange homogène de deux gaz. Initialement, les deux enceintes sont à la même température, à la même pression, et contiennent le même mélange homogène des deux gaz.

¹⁰⁴⁸ « Call it entropy. It is already in use under that name and besides, it will give you a great edge in debates because nobody knows what entropy is anyway. », citation extraite de (Haglund, et al., Mars 2010) p.502

¹⁰⁴⁹ Exemple de l'équilibre thermique de deux solides, présenté plus haut (Cf. §I de ce Chapitre 9) : la température finale est homogène dans les deux solides. Ou encore, dans l'exemple de la détente de Joule et Gay-Lussac, pour laquelle « dans l'état final, les N molécules sont réparties de manière homogène dans le volume... » (Grécias, et al., 1999) p.714

Etablissons maintenant une différence de température entre les deux enceintes : une des enceintes est chauffée en permanence et l'autre est refroidie. L'expérience montre que, couplé au processus de diffusion thermique, se produit un processus de séparation des deux gaz. Il est clair, que dans ce cas, l'activité productrice d'entropie ne peut être assimilée à un simple nivellement des différences. Certes, le flux thermique joue ce rôle, mais le processus de séparation des gaz mélangés qui se produit par couplage avec la diffusion est, lui, un processus de création de différence. Cet exemple simple, montre à quel point il est nécessaire de se libérer de l'idée que l'activité productrice d'entropie est synonyme de désordre et de la disparition des différences. L'ordre et le désordre se présentent ici non pas comme opposés l'un à l'autre, mais comme indissociables.

D'après l'analyse ci-dessus, il est clair que les significations de l'entropie en termes de *flèche de temps* et de *perte d'informations* ne sont pas très appropriées. Les exemples de la détente adiabatique réversible et de la thermo-diffusion montrent que les significations en termes de désordre et d'homogénéité peuvent conduire à des raisonnements erronés très regrettables. Cependant, cette multiplicité d'interprétations pourrait également être un enrichissement intellectuel intéressant pour les étudiants. Conseiller aux étudiants des lectures sur ces sujets suivies d'un débat de temps à autre, pendant les séances d'enseignement contribuerait à leur faire prendre conscience de la manière dont les concepts scientifiques évoluent. Enfin, la signification statistique de l'entropie, introduite en classe de CPGE des 1995, n'est pas simple pour des étudiants qui abordent pour la première fois l'enseignement de la thermodynamique.

Un sens de l'entropie n'a pas été abordée dans ce paragraphe : le sens thermodynamique. La mise en forme des programmes sous forme de bilans, déconnecte en effet l'entropie des machines thermiques (Cf. Chapitres 5 et 6). Or, cette signification, associée à l'approche pédagogique historique du deuxième principe, est basée sur les énoncés historiques de Clausius¹⁰⁵⁰, de Thomson - Planck¹⁰⁵¹, le théorème de Carnot¹⁰⁵² et l'inégalité de Clausius¹⁰⁵³.

¹⁰⁵⁰ Dont l'énoncé en termes actuels serait « *Le transfert thermique d'énergie se fait **spontanément** d'une source d'énergie vers une deuxième ayant une température plus faible que la première.* »

¹⁰⁵¹ Dont l'énoncé en termes actuels serait « *Un système thermodynamique en contact avec une seule source ne peut, au cours d'un cycle, que recevoir de l'énergie par travail et fournir de l'énergie par transfert thermique.* »

¹⁰⁵² Nous avons déjà discuté au Paragraphe I.1. du chapitre 3 de l'ambiguïté sur les énoncé et théorème ou principe de Carnot. Nous nous accorderons ici pour dire que, selon le théorème de Carnot, « *Une machine ditherme en fonctionnement réversible possède un rendement qui ne dépend que de la température de chacune des deux sources d'énergie.* »

¹⁰⁵³ « *Lorsqu'un système évolue en revenant à son état initial et que lors du cycle, il échange de l'énergie par transfert thermique avec N sources thermiques de températures T_1, T_2, \dots et T_N . Les échanges par transferts thermiques, définis par rapport au système, notés Q_1, Q_2, \dots et Q_N vérifient la relation suivante : $\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$ »*

5. Quelles places pour les énoncés historiques du deuxième principe ?

Tous les spécialistes de la thermodynamique continuent à réfléchir à de nouveaux outils didactiques et à de nouvelles stratégies pédagogiques à mettre en place dans le but d'aider les étudiants à percevoir la pertinence du deuxième principe. Malheureusement, en consultant les manuels existants, on se rend compte que les auteurs n'accordent que peu d'intérêt à l'approche historique. Les énoncés historiques apparaissent dans la plupart des cas, comme des applications de l'énoncé de Prigogine du deuxième principe sous forme de bilan¹⁰⁵⁴.

Notre but ici, est de montrer qu'une telle approche pourrait se révéler très féconde pour améliorer la compréhension du deuxième principe chez les étudiants. Mais, Bouasse rappelle en 1913 que cette approche n'est pas sans risque, car les abus de langage peuvent être là-encore sources d'erreurs et d'incompréhension : « *Puisque l'occasion s'en présente, faisons justice d'un énoncé absurde qui se trouve dans certains ouvrages à prétention et dont Clausius ne porte pas la responsabilité : « on ne peut, sans dépenser de travail, faire passer de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud. » M. Perrin, dans son ouvrage Les principes (p.157), dit que cet énoncé est, depuis Clausius, celui qu'on donne le plus généralement. Or tout le monde dit après Clausius : « on ne peut sans dépenser de travail OU SANS QU'IL INTERVIENNE UNE OPERATION EQUIVALENTE (par exemple le passage de la chaleur d'un corps chaud sur un corps froid) faire passer de la chaleur d'un corps froid sur un corps chaud. » Ne pas énoncer d'erreurs grossières vaudrait beaucoup mieux que de raffiner sur des manières de parler qui ne font de mal à personne. »*¹⁰⁵⁵ Aussi, l'on comprend dans cette critique de Bouasse, que le principe d'équivalence utilisé à mauvais escient peut engendrer de ce fait une grave confusion sur le deuxième principe de la thermodynamique présenté par un énoncé historique.

Notre vie actuelle est dominée par les évolutions technologiques et en particulier l'utilisation des machines, associée à l'enjeu de la préservation des ressources énergétiques mise en avant depuis la fin des années 1970 (Cf. chapitre 5). C'est donc sous cet angle, qu'il faudrait présenter le deuxième principe. Améliorer l'efficacité des machines que nous utilisons serait une bonne solution pour faire face à des futures crises énergétiques. Cependant, les améliorations technologiques pourraient-elles augmenter indéfiniment la performance des moteurs thermiques ? L'intérêt de cette approche réside dans le fait que, d'une part, elle coïncide parfaitement avec l'histoire de la naissance de la thermodynamique et d'autre part, elle présente l'avantage d'être très pratique. Cette présentation longtemps présente dans les ouvrages de thermodynamique du début du 20^{ème} siècle (Cf. Chapitres 2 et 3) a été progressivement délaissée au profit de l'énoncé

¹⁰⁵⁴ Exemple dans (Pérez, 1997) pp. 98-99

¹⁰⁵⁵ (Bouasse, 1913b) p.28

de Prigogine. Par exemple, appliqué à une machine thermique, l'énoncé historique de Clausius devient :

« *Il est impossible de concevoir une machine décrivant un cycle qui n'aurait d'autre effet que de transmettre de l'énergie par transfert thermique d'une source d'énergie vers une deuxième ayant une température plus grande que la première.* »

Par conséquent, si une machine transfère de l'énergie par transfert thermique d'une source d'énergie à faible température (« *froide* ») à une source d'énergie à plus forte température (« *chaude* »), alors elle le fait nécessairement au prix d'une consommation d'énergie transférée par travail : ce qui finalement correspond aux machines frigorifiques.

En outre, si l'énoncé historique de Thomson n'était pas vrai, il serait possible d'utiliser l'énorme quantité d'énergie interne de l'océan pour fournir de l'énergie à un navire qui naviguerait alors en rejetant de l'eau refroidie (voire sous forme de glaçon) sans avoir besoin d'un réservoir d'énergie à température plus basse. Cet énoncé interdit donc les moteurs à mouvement perpétuel de seconde espèce i.e. en fournissant de l'énergie par travail au milieu extérieur en puisant de l'énergie interne par transfert thermique à une seule source.

Ces deux énoncés s'appuient sur l'observation expérimentale (méthode inductive) et jusqu'à ce jour aucune expérience n'a donné lieu à la moindre contradiction. Ce qui est en outre remarquable, est que ces deux énoncés ne font référence à aucun système d'équation ou/et d'inéquation, ils sont donc purement qualitatifs. Par ailleurs, comme il s'agit de deux énoncés négatifs, leur utilisation est difficile et demande des raisonnements assez rigoureux. C'est pourquoi, il serait intéressant de montrer aux étudiants comment les appliquer en faisant la démonstration (méthode déductive) de l'équivalence des deux énoncés et de déduire le théorème de Carnot et l'inégalité de Clausius qui sont également considérés comme des énoncés du deuxième principe.

L'inégalité de Clausius est très importante puisqu'elle permet de traiter toutes les situations de machines thermiques, spécialement les cas d'une machine impliquant des échanges d'énergie avec plusieurs sources. Dans leur article de 2006, Cochran et *al.* présentent le résultat d'une expérience qu'ils ont menée auprès des étudiants¹⁰⁵⁶. Ils ont élaboré une question concernant une machine échangeant de l'énergie avec trois sources. Les étudiants doivent répondre, en la justifiant, si cette machine peut fonctionner ou non. Celle-ci consiste à recevoir de la part de deux sources aux températures 800 K et 600 K des quantités d'énergie respectivement de 800 J et 600 J, à céder à une source « *froide* » à 400 K une énergie de 400 J et à fournir au milieu extérieur une énergie par travail de 1000 J. En appliquant les deux principes sur cette transformation cyclique, on peut écrire que :

¹⁰⁵⁶ (Cochran, et al., 2006)

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 + Q_3 + W = 800 + 600 - 400 - 1000 = 0 \\ \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = \frac{800}{800} + \frac{600}{600} + \frac{-400}{400} = 1 \text{ JK}^{-1} \end{cases}$$

Aussi, on a bien la conservation de l'énergie, mais le deuxième principe de la thermodynamique n'est pas vérifié puisque l'inégalité de Clausius ne l'est pas : donc cette machine ne peut donc pas fonctionner.

Malheureusement, Cochran et *al.* montrent que seulement un tiers des étudiants répondent correctement à cette question, montrant une non maîtrise de deux principes appliqués à une transformation cyclique. Aussi, au-delà même de l'introduction du concept d'entropie, les énoncés des principes et leur complétude ne sont pas acquises par l'étudiant.

Il est en outre, possible de lier l'idée de la *dégradation de l'énergie*, autrefois présentée dans les programmes à travers l'entropie produite. Mais dans ce cas, il faudrait utiliser l'entropie comme une variable d'analyse au même titre que les autres grandeurs (température, pression, volume) pour décrire les transformations subies par un système thermodynamique. Dans un article datant de 1992, et intitulé *Entropy production and the second law of thermodynamics: An introduction to second law analysis*, Marcella indique que l'étude des machines thermiques est très adaptée pour élaborer une telle démarche analytique du deuxième principe¹⁰⁵⁷.

Appliquons alors ce modèle à l'exemple des machines thermiques qui échangent de l'énergie avec deux sources (une source à la température T_C et une seconde à la température $T_F < T_C$) ayant des capacités thermiques supposées infinies. La grandeur Q désignera la quantité d'énergie transférée par transfert thermique et la grandeur W la quantité d'énergie transférée par travail. Considérons alors un système isolé, comprenant {la machine thermique, les deux sources « chaude » et « froide » et le milieu extérieur}. Selon l'application du deuxième principe à ce système, l'inégalité : $\Delta S = S^p \geq 0$ est vérifiée. Or, cette variation d'entropie peut se décomposer en la variation d'entropie de chaque sous-système :

$$\Delta S = \Delta S_{\text{machine}} + \Delta S_{\text{source chaude}} + \Delta S_{\text{source froide}} + \Delta S_{\text{milieu extérieur}}$$

telles que :

$$\Delta S_{\text{machine}} = 0, \text{ sur un cycle de fonctionnement.}$$

$\Delta S_{\text{milieu extérieur}} = 0$, car le milieu extérieur n'échange que de l'énergie par travail avec le fluide de la machine. Aussi, en l'absence de frottements, toute source d'irréversibilité est négligée.

De ce fait, la variation d'entropie du système isolé se ramène à la variation d'entropie de chaque source :

$$\Delta S = \Delta S_{\text{source chaude}} + \Delta S_{\text{source froide}}$$

Ces sources ayant des capacités thermiques infinies, elles jouent le rôle de thermostat, et on peut donc écrire que la variation d'entropie du système global vaut :

¹⁰⁵⁷ (Marcella, 1992)

$$\Delta S = -\frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_F}{T_F}$$

en algébrisant, les grandeurs Q_C et Q_F relativement à la machine thermique, i.e. comptées positivement (négativement) si effectivement reçues (cédées) par le fluide.

Deux types de machines peuvent être traités :

1. *Cas du moteur thermique :*

La relation travail-entropie obtenue en terme d'augmentation de l'entropie totale s'écrit alors :

$$-W = -W_{rev} - T_F \Delta S$$

Avec $-W_{rev} = -W_{max} = +Q_C \frac{T_C - T_F}{T_C} \geq 0$ qui est l'énergie maximale transférée par travail au milieu extérieur, pour un moteur réversible. Cette simple expression a une importance capitale : elle permet de faire une analyse quantitative d'un moteur thermique d'un point de vue entropique. Cette relation travail-entropie montre clairement que le deuxième principe de la thermodynamique impose une limite à la quantité d'énergie transférée par travail, pour un moteur réel ($-W \leq -W_{rev}$). La quantité d'énergie qui aurait dû être transférée par travail $W_{lost} = T_F \Delta S$ s'est en réalité *dégradée* sous une forme inutilisable : elle finit en fin de compte dans le réservoir à basse température où elle devient inaccessible.

2. *Cas du réfrigérateur :*

Dans le cas du réfrigérateur, avec le même système défini précédemment, la relation travail-entropie devient :

$$W = W_{rev} + T_C \Delta S$$

avec $W_{rev} = W_{min} = Q_F \frac{T_C - T_F}{T_C}$ qui représente l'énergie minimale transférée par travail du milieu extérieur vers la machine, dans le cas d'un fonctionnement réversible du réfrigérateur. Manifestement, l'irréversibilité de la machine, c'est-à-dire la production d'entropie, augmente la quantité d'énergie à fournir par travail au fluide, pour assurer le fonctionnement du réfrigérateur. Cette quantité d'énergie supplémentaire est estimée par la grandeur : $W_{lost} = T_C \Delta S$.

Cette méthode peut être appliquée à un processus non cyclique impliquant un système en interaction avec son milieu extérieur. C'est en outre un très bon exemple, pour montrer aux étudiants l'intérêt de la définition du système en thermodynamique (Cf. Chapitre 7). Comme les étudiants éprouvent des difficultés à prendre en compte le deuxième principe dans une analyse thermodynamique, cette approche analytique peut apparaître comme pertinente puisqu'elle réinvestit la notion de *dégradation de l'énergie* dans la démarche. En effet, en prenant l'entropie comme une variable pour analyser les phénomènes physiques, elle définit le rôle de l'entropie en thermodynamique. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que l'entropie en question n'est pas une variable d'état : il s'agit de l'entropie créée S^P qui pour un système isolé s'identifie à la variation de l'entropie totale ΔS .

Aussi, à travers l'exemple des machines, l'approche du deuxième principe apparaît immédiat. Les programmes des CPGE imposant au deuxième principe une forme de bilan, ont engendré une perte dans la signification de l'entropie. Les exemples des machines et des transformations cycliques peuvent apparaître comme un outil pertinent pour l'introduction des principes et devraient alors permettre une application immédiate de ces derniers. C'est justement l'objet du prochain paragraphe.

II. LES DIAGRAMMES THERMODYNAMIQUES POSSEDANT UNE TRANSFORMATION « INFINITHERME »

1. Les diagrammes thermodynamiques

a. Importance des représentations graphiques

L'utilisation des supports graphiques a été souvent, et notamment depuis 1902, mise en avant dans les programmes pour associer une représentation visuelle aux grandeurs mathématiques exprimées. La thermodynamique s'appuie entre autre sur les diagrammes d'équilibre (P, V) mais aussi sur les diagrammes pression/enthalpie (P, H) ou encore température/entropie (T, S) , tous les trois introduits dans le nouveau programme de 1995 de première année. Selon Gibbs, le recours à ces diagrammes est essentiel pour la compréhension des phénomènes mais aussi des grandeurs thermodynamiques comme l'entropie :

*« Et s'il s'agit, au point de vue didactique, de familiariser l'étudiant avec la seconde loi de la thermodynamique, l'emploi du diagramme entropie-température sera certainement le meilleur moyen de vulgarisation. »*¹⁰⁵⁸

Dans le cas de l'étude des machines thermiques, les représentations graphiques sont tout autant appréciées. Nous avons déjà souligné qu'en 1926, Bruhat mettait en avant les représentations graphiques pour comparer rapidement et simplement, le rendement des machines réelles avec celui de la machine idéale de Carnot (Cf. Chapitre 3). Gibbs, en 1903, faisait une remarque similaire, *« Il est souvent très important de comparer une machine donnée à une machine idéale. Une telle comparaison sera évidemment facilitée par l'emploi d'une méthode où la machine parfaite est représentée par une figure simple. »*¹⁰⁵⁹

Enfin, la représentation dans le diagramme de Clapeyron (P, V) permet aisément d'associer *« le travail [...] comme l'opposé de l'aire algébrique sous la courbe $P=f(V)$: »*¹⁰⁶⁰

¹⁰⁵⁸ (Gibbs, 1903) p.30

¹⁰⁵⁹ (Gibbs, 1903) p.30

¹⁰⁶⁰ (Grécias, et al., 1999) p.651

$$W = - \int PdV = -\text{Aire}$$

C'est cette caractéristique que nous allons mettre en avant dans le paragraphe suivant.

b. Intérêt pédagogique des diagrammes thermodynamiques possédant une transformation « infinitherme »

L'introduction du lien entre l'aire sous la courbe dans le diagramme (P, V) et le travail des forces pressantes est souvent proposé à travers un diagramme « triangulaire » possédant une transformation de type $P = mV + b$ où m et b sont des constantes réelles. Ce type de transformation peut être qualifiée de *transformation infinitherme* dans la mesure où cette portion de droite correspond à une valeur de température différente en chacun des points qui la compose.

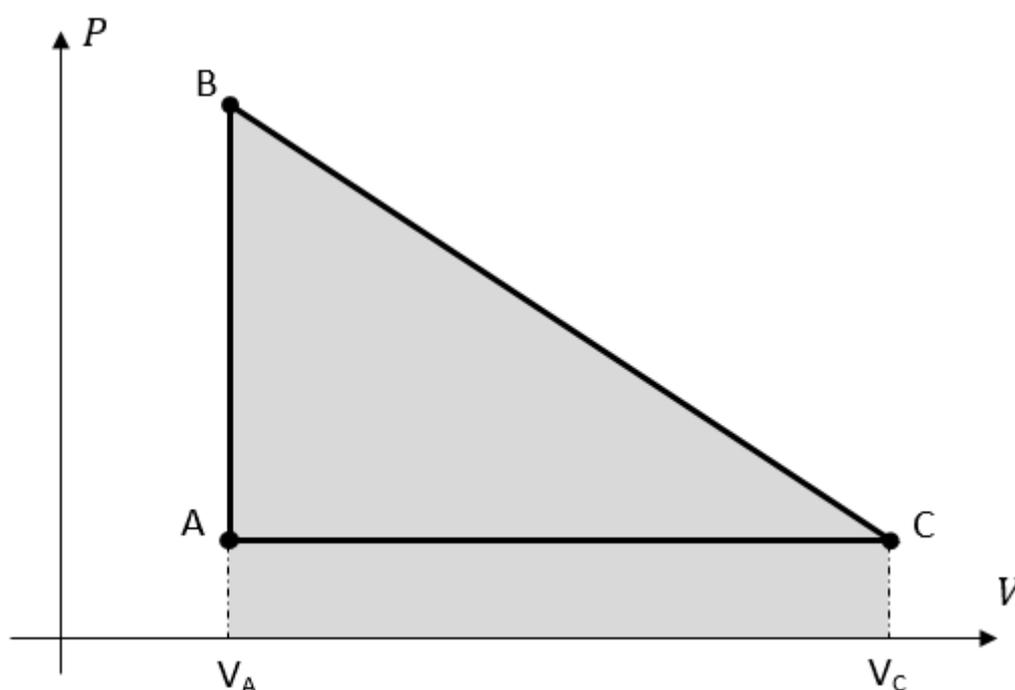


Figure 74 Visualisation graphique du travail des forces pressantes. Cas du cycle triangulaire¹⁰⁶¹

Leur présence en grand nombre dans les livres de thermodynamique et les documents disponibles sur internet est notamment due au fait que, sur un tel cycle, le calcul du travail total se ramène à un calcul de l'aire d'un triangle (ici ABC sur la Figure 74) et est donc facilement accessible. Pourtant, la portion affine présente sur le cycle, est un réel problème de thermodynamique notamment pour le calcul du rendement. Or, cette difficulté est très rarement soulignée dans les documents. On peut citer néanmoins, trois ouvrages qui y font référence : l'*Esprit physique* de

¹⁰⁶¹ Exemple in (Grécias, et al., 1999) p.651

Bernard, paru en 1998¹⁰⁶² (tome 1) et en 2001¹⁰⁶³ (tome 2), ou encore *1001 questions en Prépa* de Garing et Lhopital, publié en 2013¹⁰⁶⁴. Comme le problème est quasiment absent de tous les ouvrages de thermodynamique nous proposons à partir d'une analyse différente et très simple à comprendre, de réaliser le calcul du rendement de machines thermiques possédant une transformation « infinitherme ». Nous aurons par la même occasion, l'opportunité de souligner les difficultés rencontrées et les sources éventuelles de confusions.

c. Les différents cycles possédant une transformation « infinitherme »

Les cycles présentant une portion affine de type $P = mV + b$ sont régulièrement utilisés par les enseignants pour mettre en avant le calcul graphique du travail. On peut en répertorier six différents (Cf. Figure 75, Figure 76 et Figure 77) :

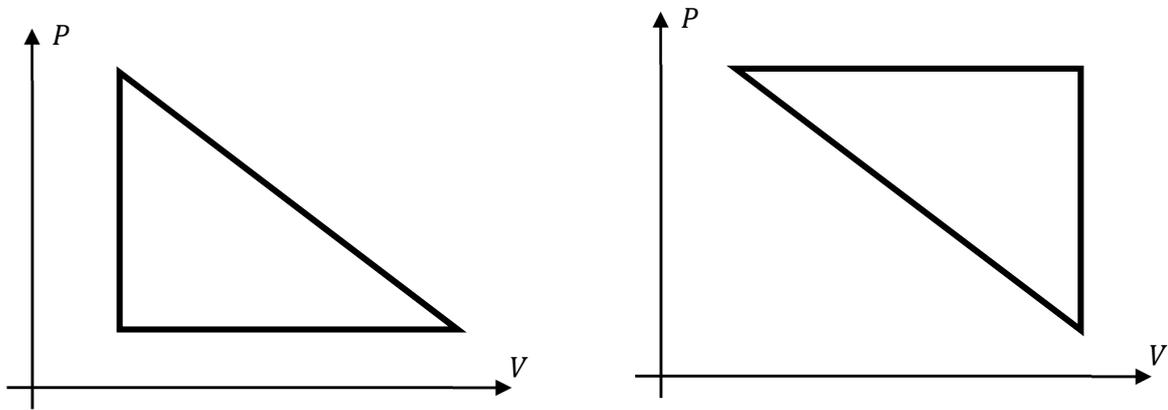


Figure 75 Cycles triangulaires à partie infinitherme à pente négative

¹⁰⁶² (Bernard, 1998) p.68

¹⁰⁶³ (Bernard, 2001) p. 275

¹⁰⁶⁴ (Garing, et al., 2013) p.490

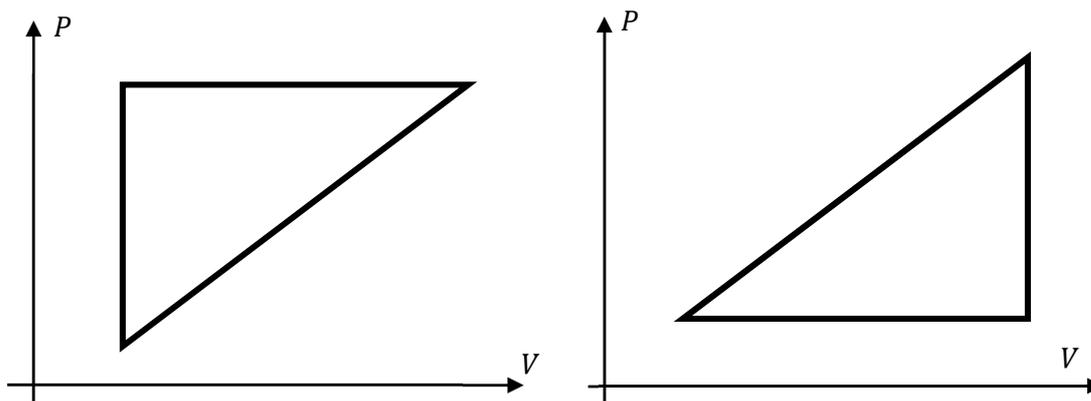


Figure 76 Cycles triangulaires à partie infinitherme à pente positive

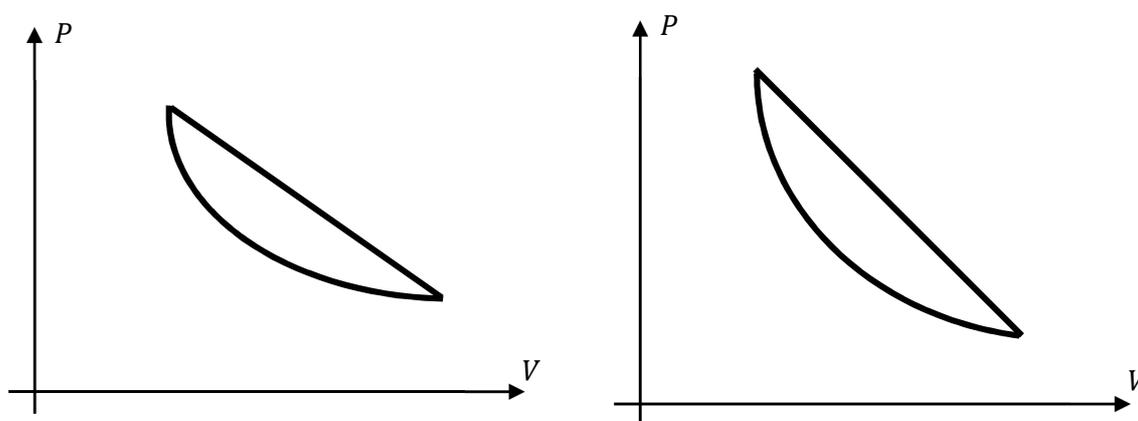


Figure 77 Cycles à partie infinitherme et isotherme (à gauche) et adiabatique réversible (à droite)

Notre étude ne va porter exclusivement que sur la Figure 75 (de gauche) et sur la Figure 77 (de droite) pour lesquelles les cycles sont parcourus dans le sens moteur. Le choix de ces exemples porte sur le fait qu'ils sont traités dans les ouvrages *Esprit Physique* tome 1 et 2 de Daniel Bernard. Or, les corrections proposées sont sujettes à de nombreux commentaires. Il apparait alors nécessaire de réaliser une étude détaillée et rigoureuse de ces cycles afin de pouvoir argumenter notre analyse des corrections proposées.

2. Premier cas : étude du diagramme triangulaire moteur

On se propose de réaliser une étude du diagramme du type de la Figure 75 (gauche) dans le cas général. On propose un diagramme de Clapeyron ci-dessous (Figure 78), où la portion affine du cycle passe par les points $(V_0; kP_0)$ et (qV_0, P_0) avec q et k des réels supérieurs à 1 ; afin que le cycle soit bien moteur.

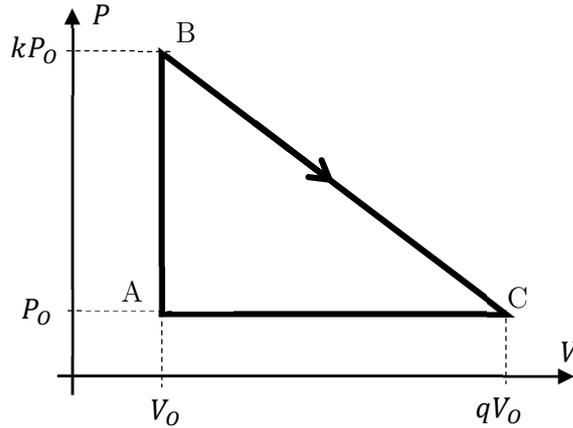


Figure 78 Cycle triangulaire étudié : cycle moteur

On considère n moles de fluide initialement dans les conditions $A: (V_0, P_0, T_0)$ subissant le cycle décrit ci-dessus. En considérant le fluide comme un gaz parfait, on peut écrire la relation liant ces conditions $P_0 V_0 = nRT_0$. En outre, on définit $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ le rapport des capacités thermiques à pression constante et à volume constant. Au niveau du point B, les n moles de gaz sont dans les conditions $B: (V_0, kP_0, T_B = kT_0)$. Enfin, en C les n moles de gaz vérifient $C: (qV_0, P_0, T_C = qT_0)$.

a. Première approche du problème

On peut calculer l'énergie cédée par travail sur l'ensemble du cycle par un calcul d'aire (Cf. Figure 79):

$$W_{tot} = -\frac{1}{2}(k-1)(q-1)nRT_0 < 0$$

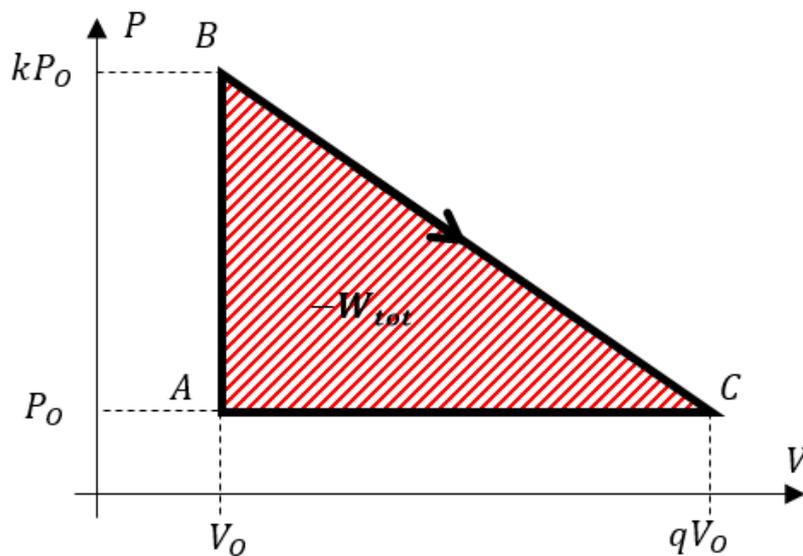


Figure 79 Premier calcul du travail

Le cycle étant moteur, il est évident d'aboutir à une énergie transférée par travail négative, c'est-à-dire cédée par le système {gaz} au milieu extérieur. Sur la portion AB, isochore, l'énergie échangée par transfert thermique avec l'extérieur se ramène à la variation d'énergie interne entre A et B :

$$Q_{AB} = \Delta U_{AB} = n c_V (T_B - T_0) = \frac{nRT_0}{\gamma - 1} (k - 1) > 0$$

Durant cette transformation, le gaz reçoit de l'énergie par transfert thermique du milieu extérieur. Sur la portion CA isobare, l'énergie échangée par transfert thermique avec l'extérieur, se ramène à la variation d'enthalpie entre C et A :

$$Q_{CA} = \Delta H_{CA} = n c_p (T_A - T_C) = \frac{n\gamma RT_0}{\gamma - 1} (1 - q) < 0$$

Durant cette transformation, le gaz cède de l'énergie par transfert thermique au milieu extérieur.

Il reste donc à évaluer la quantité d'énergie échangée par transfert thermique sur la portion BC et surtout déterminer son signe dans l'objectif de calculer le rendement moteur sur le cycle, rendement défini comme le rapport de l'opposé de l'énergie échangée par travail sur la seule quantité d'énergie reçue par transfert thermique par le système. Ainsi, le problème est donc de déterminer dans quelles conditions Q_{BC} peut être négative, positive, ou encore quelle portion de la transformation BC correspond à une énergie reçue de l'extérieur. Par les calculs précédents et avec le fait que $\Delta U_{cycle} = 0$, on peut écrire :

$$Q_{BC} = -(W_{tot} + Q_{AB} + Q_{CA}) = \frac{1}{2} (k - 1)(q - 1)nRT_0 + \frac{nRT_0}{\gamma - 1} (1 - k) + \frac{n\gamma RT_0}{\gamma - 1} (q - 1)$$

Soit :

$$Q_{BC} = \frac{nRT_0}{2(\gamma - 1)} ((k - 1)(q - 1)(\gamma - 1) + 2 - 2k + 2\gamma q - 2\gamma)$$

$$Q_{BC} = \frac{nRT_0}{2(\gamma - 1)} ((qk - k - q + 1)(\gamma - 1) + 2 - 2k + 2\gamma q - 2\gamma)$$

i.e. après mise en forme :

$$Q_{BC} = \frac{nRT_0}{2(\gamma - 1)} ((\gamma - 1)(qk - 1) + (\gamma + 1)(q - k))$$

Il apparait donc que le signe de Q_{BC} n'est pas immédiat et dépend des valeurs de k et de q .

- 1^{er} cas : si $q \geq k$:

Il s'agit d'un cas régulièrement traité, notamment lorsque $q = k$.

Dans ces conditions, il est évident que $Q_{BC} > 0$. Ainsi, l'expression du rendement moteur vaut :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{AB} + Q_{BC}} = \frac{W}{W + Q_{CA}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_{CA}}{W}} = \frac{1}{1 + \frac{2\gamma}{(\gamma - 1)(k - 1)}}$$

On trouve bien un rendement $\eta < 1$. Mais ce résultat fait apparaître une aberration car le rendement est indépendant de la valeur de q . Ainsi, on peut donner à q la valeur que l'on souhaite (du moment qu'il est plus grand que k) sans changer la valeur du rendement¹⁰⁶⁵ !

- **2^{ème} cas** : si $q < k$

Il s'agit d'un cas généralement non traité, mis à part dans l'*Esprit Physique* de Bernard. Cette condition sur q et k permet d'obtenir l'inégalité suivante : $Q_{BC} \leq 0$.

En effet :

$$\frac{nRT_0}{2(\gamma - 1)} ((\gamma - 1)(qk - 1) + (\gamma + 1)(q - k)) \leq 0$$

Soit

$$q \leq \frac{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right) k + 1}{k + \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right)} = k \frac{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right) + \frac{1}{k}}{k + \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\right)} < k$$

Ainsi, l'expression du rendement moteur vaut :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{AB}} = \frac{1}{2}(q - 1)(\gamma - 1)$$

Or, avec l'inégalité précédente, on retrouve que :

$$\eta \leq \left(\frac{k - 1}{k + 1}\right) < 1$$

Ainsi, *a priori* dans les deux situations, on retrouve un rendement qui reste bien inférieur à 1. Mais, en étant plus attentif aux résultats établis précédemment, on remarque une chose importante :

Pour le **1^{er} cas** : Si k devient très grand (tout en conservant $q \geq k$) alors $\frac{2\gamma}{(\gamma - 1)(k - 1)} \rightarrow 0$ et le rendement :

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2\gamma}{(\gamma - 1)(k - 1)}} \rightarrow 1$$

Pour le **2^{ème} cas** : Si k devient très grand alors $\eta \leq \left(\frac{k - 1}{k + 1}\right) \rightarrow 1$. L'égalité large pose donc problème.

Ainsi, les deux résultats proposés précédemment aboutissent à une aberration. Il y a donc clairement un problème dans le calcul du rendement. En effet, il ne s'agit pas en réalité d'identifier uniquement et simplement le signe de Q_{BC} car si elle est positive ou négative globalement sur la portion BC, elle peut être formée d'une somme d'énergies élémentaires positives ou négatives échangées par transfert thermique. Ainsi, lors du calcul du rendement, ce

¹⁰⁶⁵ Le rapport $\frac{Q_{CA}}{W}$ est indépendant de q car chacun des facteurs qui composent le rapport évolue de la même manière avec q .

n'est pas Q_{BC} qui doit intervenir mais uniquement la partie de l'énergie exclusivement positive de cette portion BC.

S'il s'avère que sur l'ensemble de la portion BC, toutes les quantités élémentaires sont positives (cas 1), ou négatives (cas 2), alors il doit exister une autre condition sur k et/ou sur q empêchant de faire tendre le rendement vers l'unité ; c'est ce que nous proposons de trouver en réalisant une analyse très détaillée.

b. Deuxième approche du problème

Les résultats précédemment établis ne permettent pas un calcul du rendement correct. Il est donc essentiel de s'intéresser au signe de δQ sur la portion BC. Pour une analyse rigoureuse, il faut d'abord s'intéresser à l'étude de l'évolution des paramètres d'état du gaz.

La pression est une fonction affine du volume. On relie alors les coordonnées des points B et C à la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite $P = mV + b$:

$$m = -\frac{k-1}{q-1} \frac{P_0}{V_0} < 0 \quad \text{et} \quad b = \frac{qk-1}{q-1} P_0$$

La température pour cette portion BC, est donnée par l'expression de la relation des gaz parfaits :

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{mV^2 + bV}{nR}$$

Cette fonction présente un maximum pour un volume $V_m = -\frac{b}{2m} = \frac{1}{2} \frac{qk-1}{k-1} V_0$. On peut donc faire le tracé de l'allure de $T(V)$, (Figure 80) :

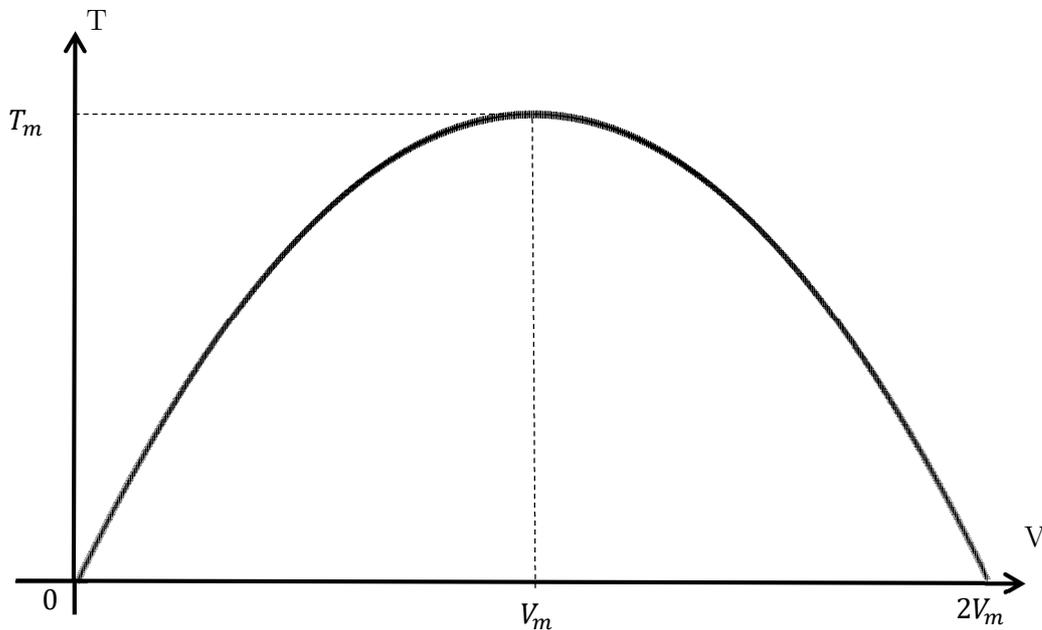


Figure 80 Evolution de la température avec le volume du système

Cette température maximale T_m s'exprime en fonction des paramètres k et q :

$$T_m = -\frac{b^2}{4nRm} = \frac{1}{4nR} \frac{(qk-1)^2}{(k-1)(q-1)} P_0 V_0$$

$$T_m = \frac{T_0}{4} \frac{(qk - 1)^2}{(k - 1)(q - 1)}$$

On remarque aussi, par symétrie de la fonction que la température vaut de nouveau zéro¹⁰⁶⁶ pour une valeur de volume de $2V_m = -\frac{b}{m} = \frac{qk-1}{k-1}V_0 > qV_0$ sachant que $q > 1$.

En revanche, les volumes aux points A, B et C ($V_A = V_B = V_0$ et $V_C = qV_0$) peuvent être inférieurs ou supérieurs au volume V_m . Il est donc nécessaire de faire une étude suivant les différents cas à retenir, qui sont au nombre de trois :

- Le cas où les volumes V_A et V_C sont à gauche de V_m sur la Figure 80 i.e. $V_0 < qV_0 < V_m$
- Le cas où les volumes V_A et V_C sont à droite de V_m sur la Figure 80 i.e. $V_m < V_0 < qV_0$
- Le cas où les volumes V_A et V_C sont de part et d'autre de V_m sur la Figure 80 i.e. $V_0 < V_m < qV_0$

- **1^{er} cas** : $V_0 < qV_0 < V_m$ obtenu pour : $k < 2 - \frac{1}{q}$ ou $q(2 - k) > 1$ ce qui impose $k < 2$

La courbe de température est limitée dans la partie gauche de la parabole, (Cf. Figure 81). Le système ne peut pas atteindre la température maximale : $T < T_m$.

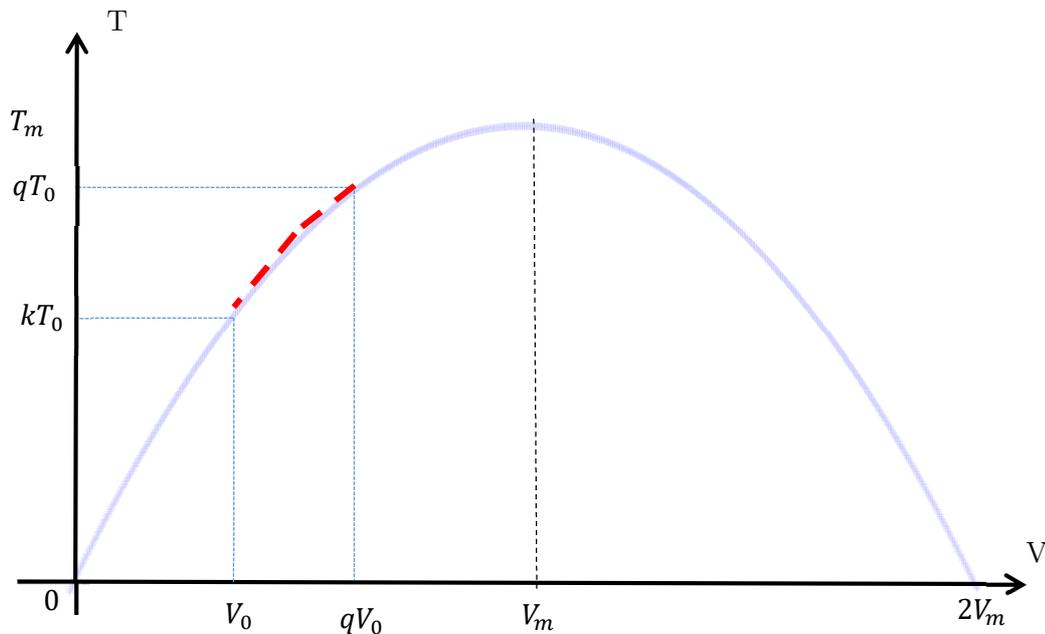


Figure 81 Valeur de la température suivant les états finaux et initiaux. cas n°1

- **2^{ème} cas** : $V_m < V_0 < qV_0$ obtenu pour : $2 - \frac{1}{k} > q$ ou $k(2 - q) > 1$ qui impose $q < 2$

La courbe de température est alors limitée dans la partie droite de la parabole, (Cf. Figure 82). Le système ne peut pas atteindre la température maximale : $T < T_m$.

¹⁰⁶⁶ Valeur non atteignable, mais qui est ici une limite de notre étude.

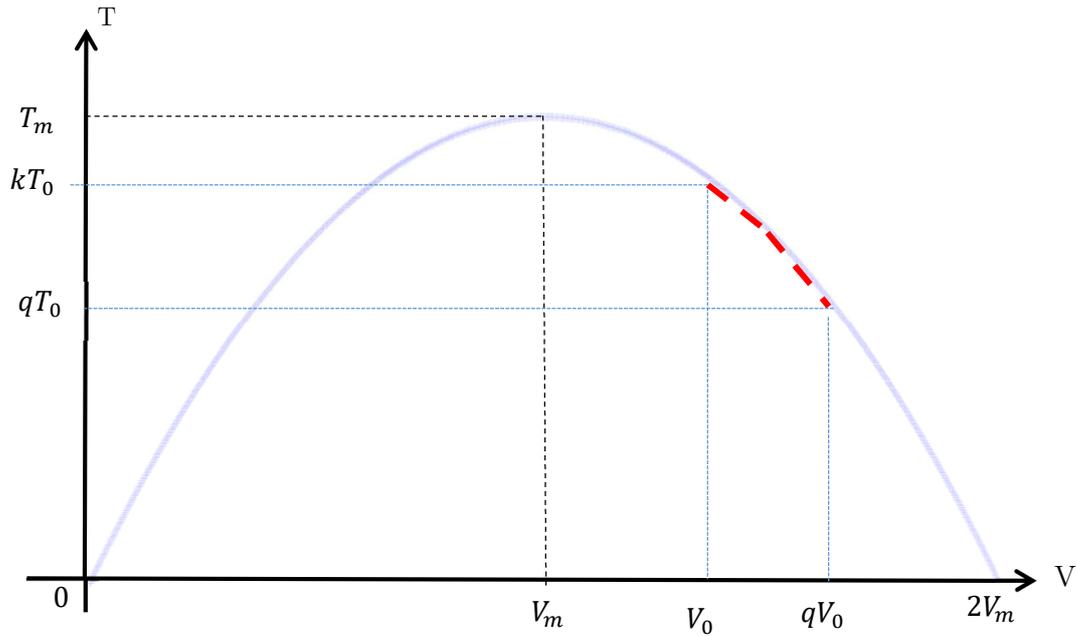


Figure 82 Valeur de la température suivant les états finaux et initiaux., cas n°2

- **3^{ème} cas** : si $V_0 < V_m < qV_0$ obtenu pour $1 < \frac{kq-1}{2(k-1)} < q$ soit $k > 2 - \frac{1}{q}$ et $q > 2 - \frac{1}{k}$

La température maximale est alors atteignable par le système (Cf. Figure 83). Suivant les valeurs des paramètres q et k , on peut observer trois comportements somme toute assez proches, mais pour lesquels les états finaux du système sont différents.

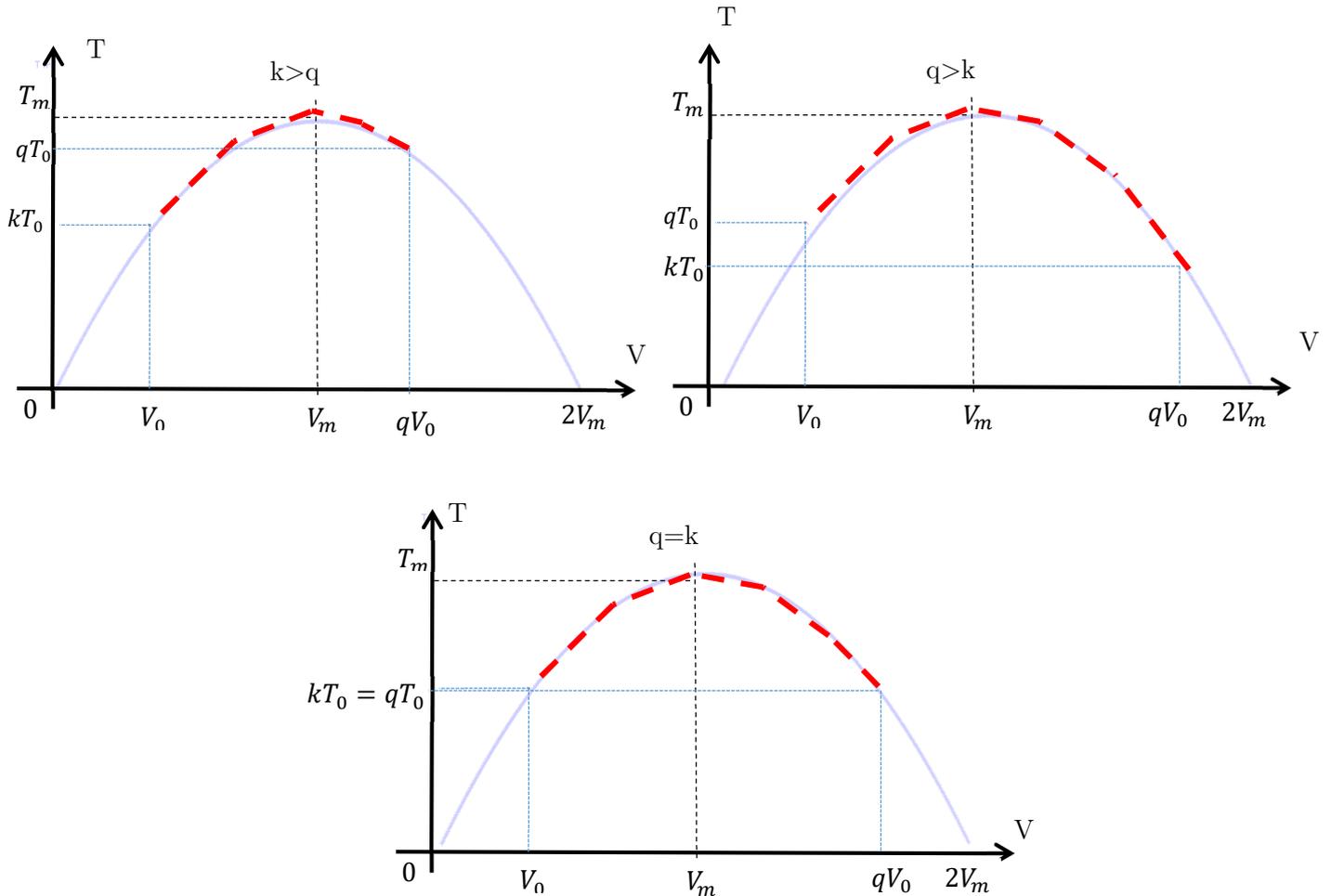


Figure 83 Les différents cas accessibles pour la valeur de la température suivant les états finaux et initiaux.

Compte tenu des différents cas exposés, il va falloir réaliser sur la portion BC, l'étude de l'évolution du signe de l'énergie échangée par transfert thermique au cours de cette transformation.

Soit une évolution élémentaire de n moles de gaz sur la portion BC du cycle triangulaire. L'application du premier principe donne :

$$dU = \frac{nR}{(\gamma - 1)} dT = \delta Q + \delta W = \delta Q - PdV$$

Soit :

$$\delta Q = \frac{nR}{(\gamma - 1)} dT + PdV = \frac{nR}{(\gamma - 1)} dT + (mV + b)dV$$

La différentielle de l'équation d'état des gaz parfaits permet alors d'écrire :

$$\delta Q = \frac{1}{(\gamma - 1)} ((mV + b)dV + mVdV) + (mV + b)dV$$

$$\delta Q = \left(\frac{mV}{(\gamma - 1)} + (mV + b) \frac{\gamma}{(\gamma - 1)} \right) dV$$

$$\boxed{\delta Q = \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} mV + \frac{\gamma}{\gamma - 1} b \right) dV}$$

Or, sur BC la variation $dV > 0$, le signe de δQ est donc identique à celui de la droite :

$$f_Q(V) = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} mV + \frac{\gamma}{\gamma - 1} b$$

Avec

$$m = -\frac{k-1}{q-1} \frac{P_0}{V_0} < 0 \quad \text{et} \quad b = \frac{qk-1}{q-1} P_0 > 0$$

L'étude du signe de $f_Q(V)$ dépend évidemment des valeurs de k et de q . La fonction $f_Q(V)$ est positive sur l'intervalle $[0, V_N]$ tel que V_N soit défini par :

$$f_Q(V_N) = 0 \quad \text{i.e.} \quad V_N = \frac{qk-1}{k-1} \frac{\gamma}{\gamma+1} V_0 = -\frac{b}{m} \frac{\gamma}{\gamma+1} = 2 \frac{\gamma}{\gamma+1} V_m$$

On remarque donc clairement que : $V_m < V_N < 2V_m$ et on accède au tracé de la fonction $f_Q(V)$ (Cf. Figure 84) :

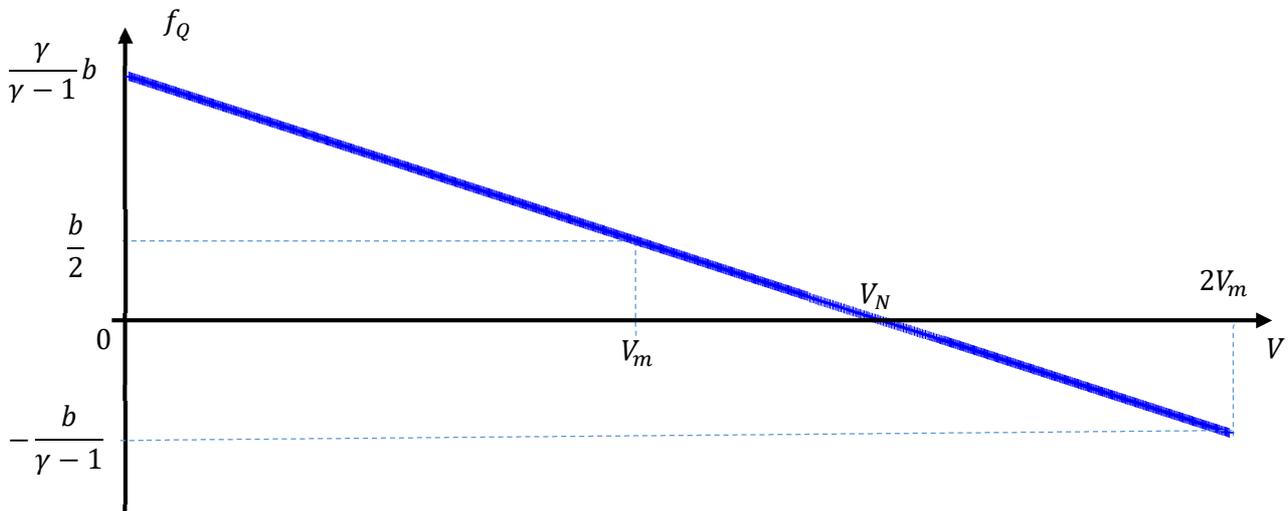


Figure 84 Evolution de la fonction $f_Q(V)$ représentative de la quantité d'énergie élémentaire échangée par transfert thermique sur la portion BC

Ainsi, le changement de signe de la quantité δQ n'a pas lieu au même volume que le maximum de température. Le système peut continuer à recevoir de l'énergie par transfert thermique de la part du milieu extérieur alors que sa température diminue (sur l'intervalle $[V_m, V_N]$). Cette approche permet ainsi de distinguer clairement la notion de température et de transfert thermique. (Cf. Chapitre 8)

c. Calcul du rendement

Le calcul du rendement est désormais conditionné par la recherche de la partie de la transformation BC possédant les quantités $\delta Q > 0$. A nouveau, il est nécessaire de distinguer trois cas :

- **1^{er} cas** : $qV_0 \leq V_N$

Sur cet intervalle, le système reçoit sans cesse de l'énergie par transfert thermique sur l'ensemble de la transformation BC : $Q_{BC} > 0$. Ceci n'est uniquement possible que pour des valeurs bien déterminées de q et de k . En effet $qV_0 < V_N$ revient à considérer :

$$q(k - \gamma - 1) < -\gamma$$

Ainsi l'expression du rendement moteur vaut :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{AB} + Q_{BC}} = \frac{W}{W + Q_{CA}} = \frac{1}{1 + \frac{Q_{CA}}{W}} = \frac{1}{1 + \frac{2\gamma}{(\gamma - 1)(k - 1)}}$$

Cette expression est similaire à celle obtenue dans la première approche. Cependant, la critique de l'expression n'est plus la même. En effet, bien que le rendement soit *a priori* indépendant de la valeur de q , on ne peut pas choisir q au hasard. Ce calcul n'est possible uniquement que pour des valeurs bien déterminées de q et de k . Aussi, $qV_0 \leq V_N$ revient à considérer :

$$k \leq \gamma + 1 - \frac{\gamma}{q} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{q} \geq 1 + \frac{1}{\gamma} - \frac{k}{\gamma}$$

De ce fait k ne peut plus tendre vers l'infini et le rendement ne peut donc plus tendre vers 1 ! Dans les conditions les plus favorables, (pour $\gamma = 5/3$) le rendement attendu est inférieur à 25%.

- **2^{ème} cas** : $V_0 \geq V_N$

Sur cet intervalle, le système cède sans cesse de l'énergie par transfert thermique sur l'ensemble de la transformation BC : $Q_{BC} < 0$. Ainsi, l'expression du rendement moteur vaut :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{AB}} = \frac{1}{2}(q - 1)(\gamma - 1)$$

Cette expression est similaire à celle obtenue dans la première approche. Cependant, là encore, la critique de l'expression n'est plus la même. En effet, ce calcul n'est possible que si : $V_0 > V_N$ i.e.

$$\gamma + 1 - q\gamma \geq \frac{1}{k} \quad \text{ou} \quad q \leq 1 + \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{k\gamma}$$

Ainsi, le rendement est majoré par :

$$\eta < \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) < 1$$

Dans les conditions les plus favorables, (pour $\gamma = 5/3$) le rendement attendu est inférieur à 20%.

- **3^{ème} cas** : $V_0 < V_N < qV_0$

Dans ce dernier cas, le signe de δQ est positif sur l'intervalle $[V_0, V_N]$. Ce cas traite dans le même temps, de la possibilité d'un Q_{BC} nul, c'est-à-dire que le système durant la transformation BC cède autant d'énergie par transfert thermique, qu'il en reçoit. Il est important de noter que

pour une transformation finie, un transfert thermique nul ne signifie pas que la transformation est adiabatique¹⁰⁶⁷.

Le volume V_N désignant le volume du point N, correspond à la pression $P_N = mV_N + b = \frac{b}{\gamma+1}$ et à une température (Cf. Figure 85):

$$T_N = \frac{P_N V_N}{nR} = \frac{4\gamma}{(\gamma+1)^2} T_m < T_m$$

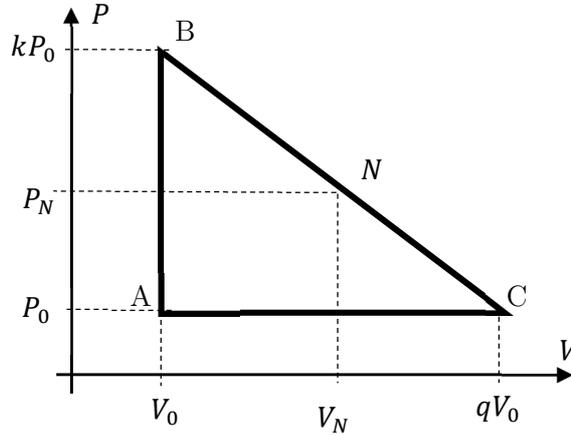


Figure 85 Cycle triangulaire faisant apparaître le changement de signe sur la portion infinithérme : $\delta Q > 0$ entre B et N et $\delta Q < 0$ entre N et C

On peut calculer que pour un gaz parfait diatomique, la température $T_N = 0,972T_m$, c'est-à-dire que la température pour laquelle δQ change de signe correspond pratiquement à la température maximale ! Néanmoins, cette température T_N est obtenue pour un volume $V_N > V_m$ ce qui signifie que le système est bien passé par un état à la température T_m avant de voir sa température diminuer.

Il est donc nécessaire de calculer la quantité d'énergie effectivement reçue par transfert thermique par le système. On a donc :

$$Q_{BN} = \int_B^N \delta Q = \int_{V_B=V_0}^{V_N} f_Q(V) dV = \int_{V_0}^{V_N} f_Q(V) dV = \int_{V_0}^{V_N} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} mV + \frac{\gamma}{\gamma-1} b \right) dV$$

$$Q_{BN} = \frac{\gamma}{\gamma-1} b \int_{V_B}^{V_N} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma b} mV + 1 \right) dV$$

Or, on peut remarquer que $\frac{\gamma+1}{\gamma b} m = -\frac{\gamma+1}{2\gamma V_m} = -\frac{1}{V_N}$, ainsi :

¹⁰⁶⁷ Pour avoir une transformation adiabatique il faudrait que $\delta Q = 0$ sur l'ensemble de la portion BC.

$$Q_{BN} = \frac{\gamma}{\gamma-1} b \int_{V_0}^{V_N} \left(1 - \frac{V}{V_N}\right) dV = \frac{V_N}{2} \frac{b\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \frac{V_0}{V_N}\right)^2$$

Soit avec $Q_{AB} = \frac{P_0 V_0}{\gamma-1} (k-1)$:

$$Q_{BN} = \frac{Q_{AB}}{2(q-1)(\gamma+1)} \left(\frac{\gamma(qk-1)}{(k-1)} - (\gamma+1) \right)^2$$

Ainsi, l'expression du rendement moteur vaut :

$$\eta = - \frac{W}{Q_{AB} + Q_{BN}}$$

Or, on a calculé précédemment (au paragraphe II.2.a) que :

$$W = - \frac{1}{2} (k-1)(q-1) P_0 V_0$$

Soit une expression du rendement :

$$\boxed{\eta = \frac{(\gamma^2 - 1)}{\frac{2(\gamma+1)}{(q-1)} + \left(\frac{\gamma k}{(k-1)} - \frac{1}{(q-1)} \right)^2}}$$

On aboutit donc à une relation donnant le rendement moteur en fonction des deux paramètres q et k correspondant aux états d'équilibre initial et final sur la transformation BC. On peut calculer la limite du rendement obtenu pour des valeurs infinies de q et de k :

$$\eta \rightarrow 1 - \frac{1}{\gamma^2} < 1$$

Dans les conditions les plus favorables (pour $\gamma = 5/3$), le rendement attendu est inférieur à 64%. Cette valeur de rendement limite inférieur à 1, permet de respecter le deuxième principe de la thermodynamique limitant la conversion d'énergie par transfert thermique en travail.

d. Application au cas particulier où $q=2$ et $k = \frac{11}{4}$

Après avoir réalisé un développement précis pour calculer le rendement, nous allons appliquer ces résultats au cas d'une mole de gaz parfait diatomique parcourant le cycle de la Figure 86, dans le cas où $q = 2$. L'expression de l'énergie échangée par transfert thermique sur BC donne, dans les conditions précédemment proposées :

$$Q_{BC} = \frac{P_0 V_0}{2} (11 - 4k)$$

Ainsi, la valeur de $k = \frac{11}{4}$ correspond à une valeur particulière pour laquelle $Q_{BC} = 0$ sans pour autant que la transformation BC soit adiabatique.

Ce couple de valeur ($q = 2 ; k = \frac{11}{4}$) correspond au 3^{ème} cas de la deuxième approche qui a été réalisée précédemment.

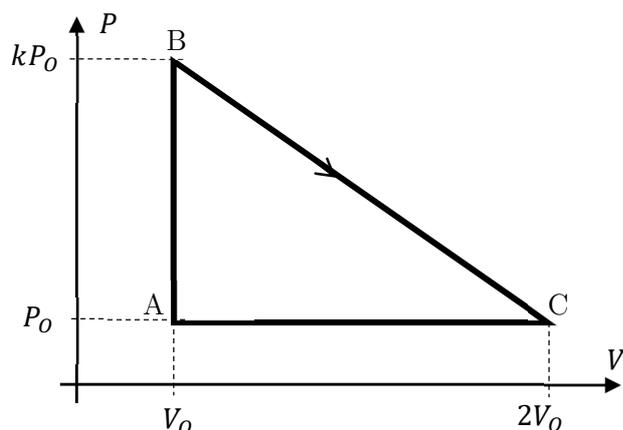


Figure 86 Cycle triangulaire dans le cas où $q=2$

En outre, il s'agit des valeurs proposées dans l'exercice de l'*Esprit physique* de Daniel Bernard¹⁰⁶⁸. Aussi, comprend-on pourquoi l'auteur a fait ce choix pour proposer son problème.

Si on représente la fonction $f_Q(V)$ image de δQ sur la portion BC, on remarque que l'aire sous la courbe est similaire de part et d'autre de l'axe des abscisses. Ainsi, le système cède autant qu'il reçoit ! (Cf. Figure 87)

Le volume pour lequel δQ_{BC} change de signe est $V_N = 1,5V_0$. Cette valeur de volume se retrouve également pour l'expression de V_N donnée plus haut¹⁰⁶⁹ avec $q = 2$ et $k = \frac{11}{4}$:

$$V_N = \frac{qk - 1}{k - 1} \frac{\gamma}{\gamma + 1} V_0 = \frac{\frac{11}{2} - 1}{\frac{11}{4} - 1} \frac{\frac{7}{5}}{\frac{7}{5} + 1} = 1,5V_0$$

¹⁰⁶⁸ (Bernard, 1998) p.68

¹⁰⁶⁹ On vérifie bien que : $V_0 < V_N < qV_0$

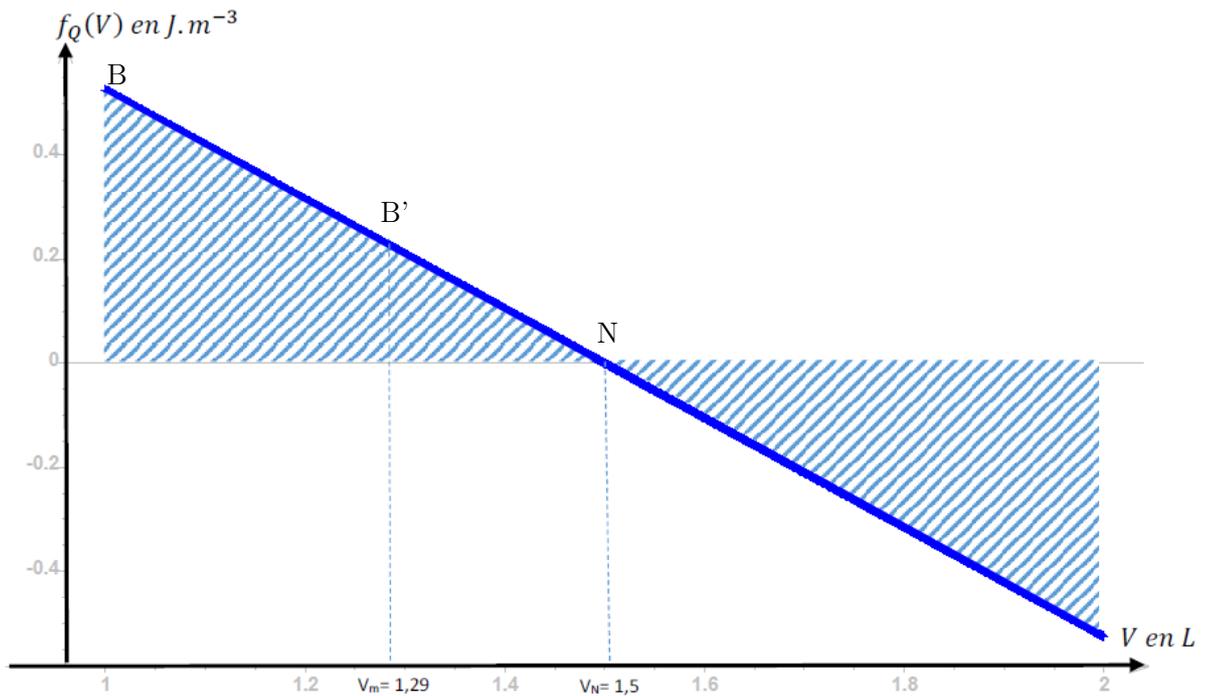


Figure 87 Représentation graphique de Q_{BC} dans le cas où $k=11/4$ pour un gaz diatomique évoluant sur l'intervalle de volume $[1L ; 2L]$. L'aire entre la courbe (somme algébrique des parties hachurées) et l'axe des abscisses est nulle sur l'intervalle de volume considéré ¹⁰⁷⁰

Si, on représente maintenant la courbe de température en fonction du volume sur le même intervalle, on constate que la température passe par un maximum pour un volume $V_m = 1,29L$. (Cf. Figure 88) Cette valeur de volume se retrouve également pour l'expression de V_m donnée plus haut avec $q = 2$ et $k = \frac{11}{4}$:

$$V_m = \frac{1}{2} \frac{qk - 1}{k - 1} V_0 = \frac{1}{2} \frac{\frac{11}{2} - 1}{\frac{11}{4} - 1} = \frac{9}{7} V_0 \approx 1,29V_0$$

Ainsi, il est important de constater que la température pour laquelle δQ_{BC} change de signe est inférieure à la température maximale atteinte par le système (ce dernier étant passé par cette température maximale auparavant). On retrouve par ailleurs que le rapport entre la température maximale T_m et la température T_N pour laquelle δQ_{BC} change de signe vaut :

$$\frac{T_N}{T_m} = 0,972$$

¹⁰⁷⁰ Les valeurs initiales caractérisant l'état d'équilibre du gaz au point A pour réaliser la représentation du graphique sont : $V_0 = 1L, P_0 = 1bar, T_0 = 298K$ et $n = 40,36 \text{ mmol}$

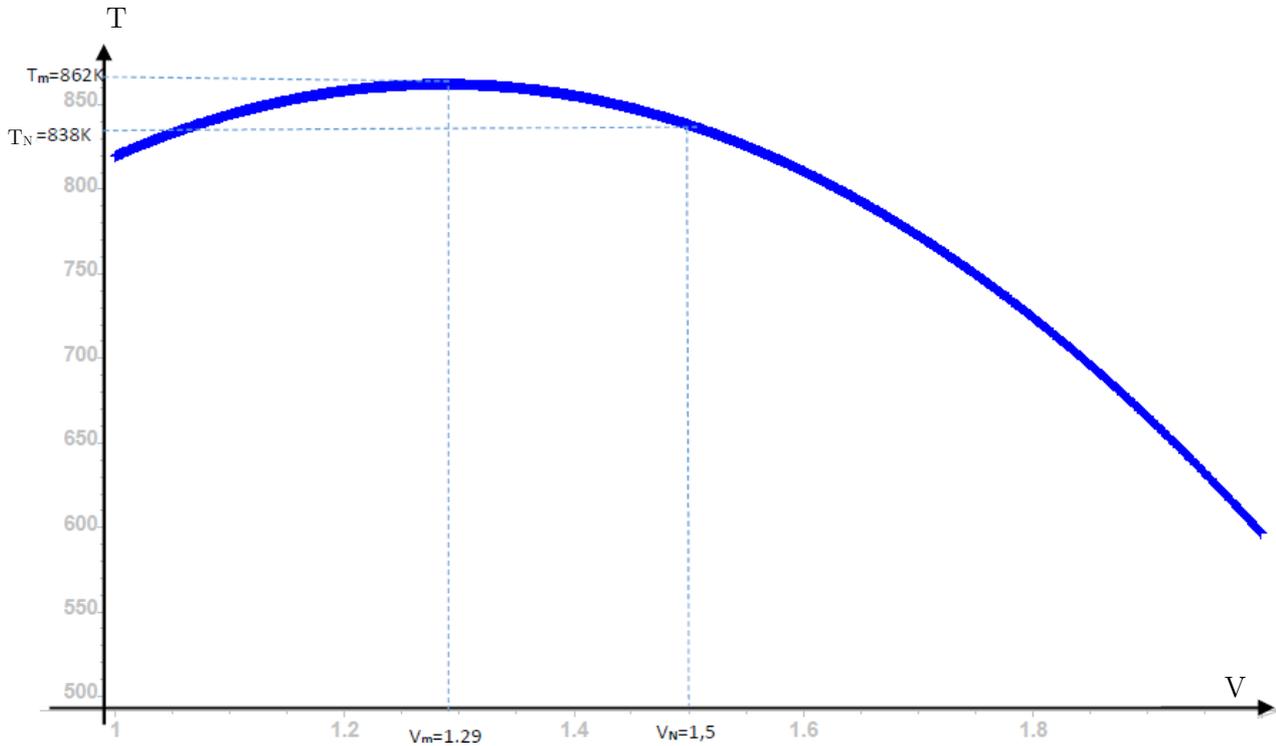


Figure 88 Représentation graphique de la température T dans le cas où $k=11/4$ pour un gaz diatomique évoluant sur l'intervalle de volume $[1L ; 2L]$. Les volumes correspondant à la température maximum et au changement de signe de δQ_{BC} sont clairement distincts

Le calcul du rendement pour une telle transformation se ramène donc au calcul précédemment présenté pour le 3^{ème} cas :

$$\eta = \frac{(\gamma^2 - 1)}{\frac{2(\gamma + 1)}{(q - 1)} + \left(\frac{\gamma k}{(k - 1)} - \frac{1}{(q - 1)} \right)^2} = \frac{2}{13} \approx 15,38\%$$

Dans sa correction, lors de la discussion sur la courbe de température, Bernard conclut : « la courbe représentative de T en fonction du volume est une parabole présentant un maximum pour $T = T_{max} = \frac{81}{28}T_0$ pour $V = \frac{9}{7}V_0$ ($T_B = \frac{11}{4}T_0, T_C = 2T_0$). Ainsi de B à B' le gaz reçoit de la chaleur qu'il restitue de B' à C .

Les variables thermodynamiques en B' sont $T_{B'} = \frac{81}{28}T_0, V_{B'} = \frac{9}{7}V_0, P_{B'} = \frac{9}{4}P_0$. »¹⁰⁷¹

Or, si on reprend le graphique de la Figure 87 on remarque que de B à B' le gaz reçoit de l'énergie par transfert thermique de l'extérieur mais continue d'en recevoir au-delà !

¹⁰⁷¹ (Bernard, 1998) p.73

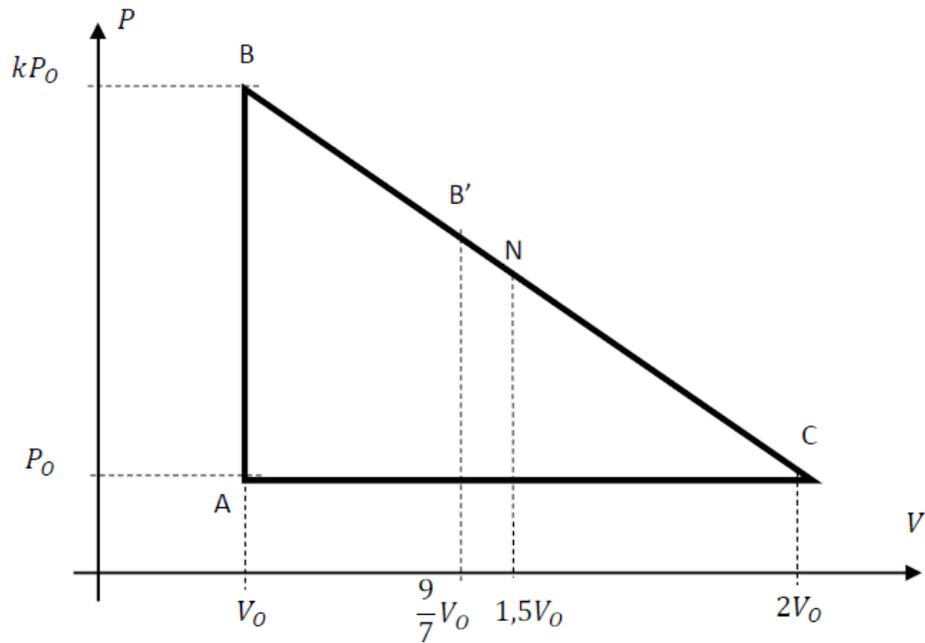


Figure 89 Distinction entre le point B' correspondant à une température maximale atteinte par le système et le point N correspondant à un changement de signe de δQ

Ainsi, lors du calcul du rendement proposé par Bernard la portion B'N (Cf. Figure 89) n'est pas prise en compte. De ce fait, une partie de l'énergie effectivement reçue par le système est omise.

Bernard énonce « la chaleur effectivement reçue sur le cycle est $Q_{AB'} = \frac{305}{56} RT_0$. »¹⁰⁷²

Alors que l'on peut établir grâce au développement de la partie précédente, que le transfert thermique effectivement reçue sur le cycle est (pour $k = \frac{11}{4}$, $q = 2$ et $\gamma = \frac{7}{5}$):

$$Q_{AN} = Q_{AB} + Q_{BN} = \left(\frac{(k-1)}{\gamma-1} + \frac{(\gamma(qk-1) - (k-1)(\gamma+1))^2}{2(k-1)(q-1)(\gamma+1)(\gamma-1)} \right) RT_0$$

Soit :

$$Q_{AN} = \frac{91}{16} RT_0 > Q_{AB'}$$

Le calcul du rendement proposé par la correction compte tenu de la sous-évaluation de l'énergie reçue par transfert thermique est donc plus grand que celui attendu réellement ! « Le travail reçu est de $W = -\frac{7}{8} RT_0$. Le rendement est : $R = -\frac{W}{Q_{AB'}} = \frac{49}{305} = 0,16$ Le rendement est très faible. »¹⁰⁷³

Aussi, peut-on voir dans la démarche de Bernard, une association immédiate entre *maximum de température* et *sens du transfert d'énergie par transfert thermique*. Cette proposition maladroite

¹⁰⁷² (Bernard, 1998) p 73.

¹⁰⁷³ (Bernard, 1998) p 73.

mais probablement intuitive, est liée au fait que le transfert thermique et la température restent malheureusement des grandeurs indissociables (Cf. Chapitre 8). Pourtant, ce lien vient d'être mis en défaut par les développements que nous venons de faire. En effet, un système peut voir sa température augmenter puis diminuer tout en continuant de recevoir un transfert thermique. Cet exemple est donc une illustration supplémentaire montrant la distinction nette entre les concepts de transfert thermique (ou de « chaleur ») et de température.

3. Deuxième cas : étude du diagramme possédant une transformation « infinitherme » et adiabatique réversible

On se propose de faire l'étude des diagrammes cycliques présentant seulement deux transformations : une transformation de type $P = mV + b$ sur la portion BC et une transformation adiabatique réversible sur la portion CB. Dans cette partie, de nombreux résultats précédemment établis vont pouvoir être réinvestis et notamment les calculs des échanges énergétiques sur la portion BC.

a. Conditions sur k et q pour la réalisation du cycle

La portion affine BC devant être raccordée à une transformation adiabatique réversible, les paramètres k et q relatifs respectivement à la pression en B et au volume en C sont nécessairement reliés. En effet, la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait permet l'utilisation des lois de Laplace :

$$P_B V_B^\gamma = P_C V_C^\gamma \quad \text{i. e.} \quad k P_0 V_0^\gamma = P_0 q^\gamma V_0^\gamma$$

Ceci entraîne alors un lien entre les paramètres k et q i.e $k = q^\gamma$

Ainsi, le diagramme étudié est représenté en Figure 90 :

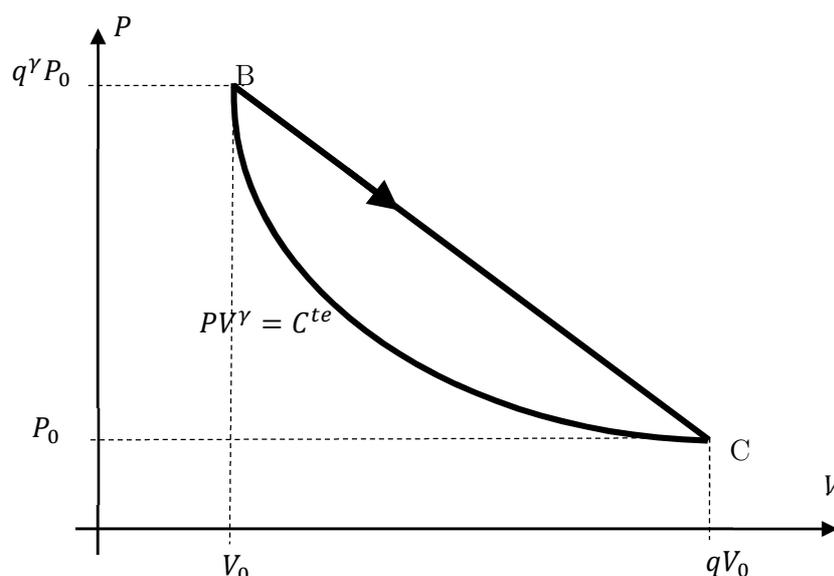


Figure 90 Diagramme à transformations adiabatique réversible et infinitherme

b. Calcul du rendement sur le cycle dans une première approche

Cet exercice est intéressant par la problématique qu'il pose si on ne prend pas garde à la transformation. Sur la portion CB, l'énergie échangée par transfert thermique par le système est nulle $Q_{CB} = 0$. Ainsi l'application du premier principe au cycle donne :

$$\underbrace{Q_{CB}}_0 + Q_{BC} + \underbrace{W_{CB} + W_{BC}}_W = 0$$

Soit $Q_{BC} = -W$

Or, le travail sur la portion CB et sur la portion BC vaut :

$$W_{C \rightarrow B} = \Delta U_{CB} = \frac{nR}{\gamma - 1} (T_B - T_C) = \frac{nRT_B}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{q}{k}\right) = \frac{kP_0V_0}{\gamma - 1} \left(1 - \frac{q}{k}\right) = \frac{P_0V_0}{\gamma - 1} (k - q)$$

$$W_{B \rightarrow C} = - \left(P_0V_0(q - 1) + \frac{P_0V_0}{2} (q - 1)(k - 1) \right) = - \frac{P_0V_0}{2} (q - 1)(k + 1)$$

Ainsi, le travail total est négatif et s'écrit :

$$W = P_0V_0 \left(\frac{(q + 1)(k - 1) - \gamma(q - 1)(k + 1)}{2(\gamma - 1)} \right)$$

On peut donc en déduire que : $Q_{BC} = -W > 0$. Le calcul immédiat du rendement conduit donc à dire que :

$$\eta = - \frac{W}{Q_{BC}} = 1$$

Ce résultat est incompatible avec le deuxième principe de la thermodynamique, d'où le nom qu'en propose Bernard dans son ouvrage de 2001 : « *Le cycle de Saddy Carnot* »¹⁰⁷⁴. L'étude rapide que nous venons de faire est due à l'erreur classique de considérer que l'énergie effectivement reçue par le système est celle de la portion BC. Or, comme nous l'avons déjà rencontré plus haut, il est nécessaire d'envisager que la valeur de l'énergie reçue par transfert thermique est supérieure à Q_{BC} . De manière similaire, au paragraphe précédent, il s'agit d'évaluer Q_{BN} pour déterminer l'expression du rendement.

c. Calcul du rendement sur le cycle dans une seconde approche

Il s'agit désormais, dans les conditions où $k = q^\gamma$, de déterminer la valeur de l'énergie effectivement reçue par le système. A nouveau, il est nécessaire de discuter trois cas, comme précédemment :

- 1^{er} cas : $V_0 < qV_0 < V_N$

¹⁰⁷⁴ (Bernard, 2001) p.175. Le jeu de mot sur le nom de Sady Carnot, pourrait se traduire par « tristement impossible ».

A noter que la condition $qV_0 < V_N$ correspond, à un échange d'énergie par transfert thermique toujours positif, pour le système. Or, cette condition aboutit au fait que : $q < \frac{qk-1}{k-1} \frac{\gamma}{\gamma+1}$. Or $k = q^\gamma$, soit :

$$(q^{\gamma+1} - q)(\gamma + 1) < \gamma q^{\gamma+1} - \gamma$$

$$q^{\gamma+1} - q(\gamma + 1) + \gamma < 0$$

L'étude de la fonction $f_q = q^{\gamma+1} - q(\gamma + 1) + \gamma$ conduit à une fonction croissante¹⁰⁷⁵ pour $q \in [1; +\infty[$. De plus, $f_q(q = 1) = 0$. Ainsi $f_q > 0$ et la condition $qV_0 < V_N$ ne peut jamais être réalisée, rendant ce premier cas impossible.

La première approche développée plus haut est donc clairement à exclure et le rendement ne pourra jamais être égal à l'unité !

- 2^{ème} cas : $V_N \leq V_0 < qV_0$

Ce cas est impossible, car la condition $k = q^\gamma$ impose que $V_0 < V_m$ (Cf. Figure 83). Or, $V_m < V_N$ d'après ce que nous avons montré précédemment (Cf. Figure 84) ; aussi nécessairement $V_0 < V_N$.

- 3^{ème} cas : $V_0 < V_N < qV_0$

Dans ce dernier cas, le signe de δQ est positif sur l'intervalle $[V_0, V_N]$ ¹⁰⁷⁶. L'énergie effectivement reçue par transfert thermique sur la portion BC est celle sur la portion BN (donnée par la relation établie plus haut, telle que dans le cas où $k = q^\gamma$:

$$Q_{BN} = \frac{P_0 V_0 (\gamma(q^{\gamma+1} - 1) - (q^\gamma - 1)(\gamma + 1))^2}{2 (q^\gamma - 1)(q - 1)(\gamma + 1)(\gamma - 1)}$$

Ainsi, le rendement du moteur thermique associé à ce cycle vaut¹⁰⁷⁷ :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{BN}} = -(q^\gamma - 1)(q - 1)(\gamma + 1) \frac{(q + 1)(q^\gamma - 1) - \gamma(q - 1)(q^\gamma + 1)}{(\gamma(q^{\gamma+1} - 1) - (q^\gamma - 1)(\gamma + 1))^2}$$

Soit, un rendement représenté en Figure 91 et d'expression :

$$\eta = (\gamma + 1) \frac{\frac{\gamma(q^\gamma + 1)}{q^\gamma - 1} - \frac{q + 1}{q - 1}}{\left(\frac{\gamma q^\gamma}{q^\gamma - 1} - \frac{1}{q - 1}\right)^2}$$

¹⁰⁷⁵ Dans un calcul non présenté ici on montre que la dérivée $f'_q = (\gamma + 1)q^\gamma - (\gamma + 1)$ est positive sur cet intervalle.

¹⁰⁷⁶ Ce cas traite dans le même temps la possibilité d'un Q_{BC} nul, c'est-à-dire que le système durant la transformation BC cède autant d'énergie par transfert thermique, qu'il en reçoit.

¹⁰⁷⁷ Dans le cas d'un gaz parfait diatomique et pour $k=2$, le rendement moteur vaut : $\eta = 6,7\%$

On peut calculer la limite du rendement obtenu pour des valeurs infinies de q :

$$\eta \rightarrow 1 - \frac{1}{\gamma^2} < 1$$

Cette valeur de rendement limite inférieure à 1 permet là encore de respecter le deuxième principe de la thermodynamique limitant la conversion d'énergie transférée par transfert thermique en travail.

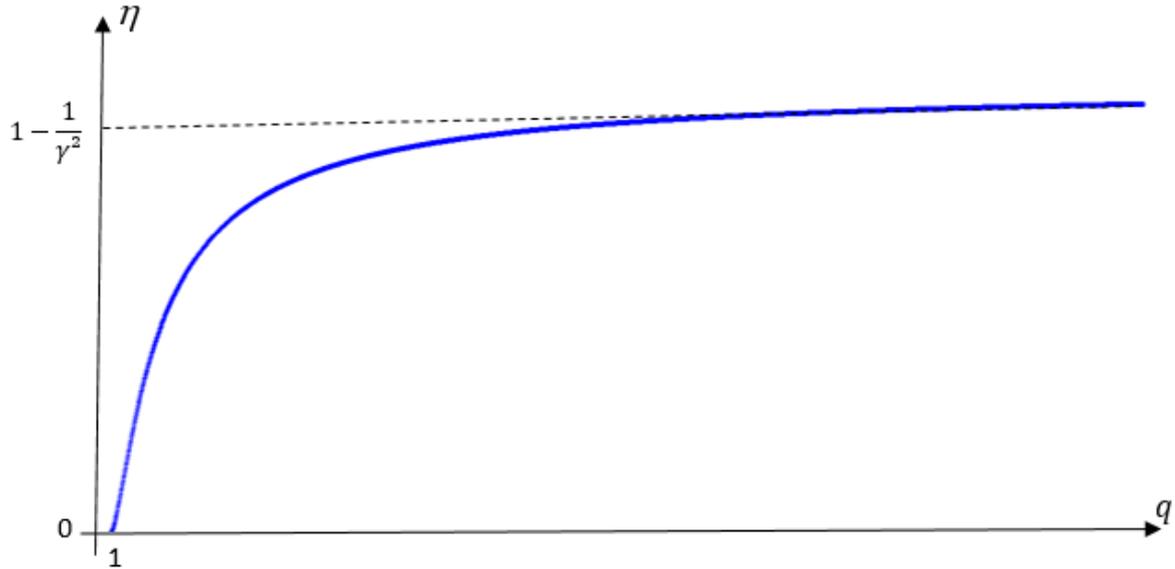


Figure 91 Représentation du rendement moteur pour un cycle à portion adiabatique, en fonction du paramètre q de la transformation

d. Application au cas où $q = 2$ pour un gaz parfait monoatomique

Dans cette partie, on se propose de réaliser une application de ce cycle (dans le cas où $q=2$) à un gaz parfait monoatomique ($\gamma = \frac{5}{3}$). Ce choix d'application permet de discuter des résultats obtenus avec la correction proposée dans l'*Esprit physique*, tome II de Bernard. Pour réaliser une comparaison totale, on exprimera les résultats en fonction de V_0 et de $P_1 = q^\gamma P_0$. Les calculs des grandeurs réalisés plus haut donnent :

$$W_{CB} = \frac{P_0 V_0}{\gamma - 1} (q^\gamma - q) = \frac{1 - q^{1-\gamma}}{\gamma - 1} q^\gamma P_0 V_0 = 0,555 P_1 V_0$$

$$W_{BC} = -\frac{P_0 V_0}{2} (q - 1)(q^\gamma + 1) = -\frac{1}{2} (q - 1)(q^{-\gamma} + 1) q^\gamma P_0 V_0 = -0,657 P_1 V_0$$

Le travail total vaut alors :

$$W = -0,102 P_1 V_0$$

On a également :

$$Q_{BN} = \frac{1}{2} \frac{(\gamma(q^{\gamma+1} - 1) - (q^\gamma - 1)(\gamma + 1))^2}{q^\gamma (q^\gamma - 1)(q - 1)(\gamma + 1)(\gamma - 1)} q^\gamma P_0 V_0 = 0,396 P_1 V_0$$

Ainsi, le rendement du moteur thermique associé à ce cycle vaut¹⁰⁷⁸ :

$$\eta = -\frac{W}{Q_{BN}} = 0,258$$

Le raisonnement proposé dans l'*Esprit physique* pour cet exercice est très différent¹⁰⁷⁹. Pourtant, on retrouve des conclusions similaires à celles que nous venons de développer : « *Ainsi pour $v_m < v < v_c$ ¹⁰⁸⁰ la température décroît, [...] mais le gaz reçoit une quantité de chaleur positive. Pour $v_c < v < v_f$ ¹⁰⁸¹ le gaz fournit de la chaleur, sa température diminue.* »^{1082,1083}

Une correction a donc été faite par Bernard par rapport au premier tome, où la confusion entre température et transfert thermique (« chaleur ») semblait manifeste. L'exemple du cycle triangulaire est d'ailleurs repris par l'auteur à la suite de cet exemple, avec cette fois une distinction nette entre les deux concepts.¹⁰⁸⁴

III. CONCLUSION

Selon les idées que nous avons développées, il est clair que pour les enseignants et les étudiants, l'enseignement du deuxième principe est une étape difficile. Les difficultés sont nombreuses et variées. Ces types de difficultés sont d'ordre sémantique mais aussi épistémologique. Les discussions sur les concepts de réversibilité et de transformation quasistatique engendrent des difficultés de compréhension et de représentation de la part de l'étudiant. Le problème ne semble pas, d'autre part, sur le point d'être résolu, car on voit apparaître ou réapparaître dans les ouvrages récents de thermodynamique (puisque l'expression était déjà présente dans l'article de 1962 de Gamper¹⁰⁸⁵) la notion de transformation

¹⁰⁷⁸ Dans le cas d'un gaz parfait diatomique et pour $k=2$, le rendement moteur vaut : $\eta = 6,7\%$

¹⁰⁷⁹ Bernard propose un développement basé sur des calculs de dérivées partielles des grandeurs énergétiques notamment.

¹⁰⁸⁰ Ce qui correspond dans nos notations à $V_m < V < V_N$

¹⁰⁸¹ Ce qui correspond dans nos notations à $V_N < V < qV_o$

¹⁰⁸² (Bernard, 2001) p.281

¹⁰⁸³ A noter néanmoins que l'auteur propose des applications numériques qui ne correspondent pas aux calculs présentés. Nous ne ferons que relever ce point sans contester le développement mathématique, car il s'agit probablement d'une simple erreur de calcul.

¹⁰⁸⁴ L'auteur propose également en fin d'exercice un cycle circulaire, tangent à deux isentropiques. (Bernard, 2001) p. 277

¹⁰⁸⁵ « *La transformation mécaniquement réversible est infiniment lente au point de vue mécanique et se fait par une succession d'états infiniment voisins de l'équilibre mécanique. Elle a toutes les propriétés de la transformation quasistatique avec en plus le fait que les états d'équilibre qui la constituent résultent de l'opposition de forces actives seulement alors que la transformation quasistatique peut comporter des frottements et des déformations permanentes.* » (Gamper, janvier février 1962) p.365

mécaniquement réversible, pour désigner une transformation dont seuls les paramètres mécaniques (comme la pression) sont définis au cours de la transformation...

D'autres difficultés sont dues à une compréhension insuffisante des concepts qui sont étroitement liés au deuxième principe, comme la température, le transfert thermique (ou la « chaleur »), l'énergie interne, le système, *etc.*

Enfin, même si les différentes significations de l'entropie sont une richesse intellectuelle incontestable, ils restent néanmoins une source de difficultés majeures. Nous avons montré que les interprétations en termes de *flèche du temps*, de *désordre*, d'*homogénéité* ou de *perte d'informations* peuvent conduire à des erreurs de raisonnement et d'incompréhension chez les étudiants. Aussi, ces multiples approches ne représentent pas un avantage mais comme le souligne Anakkar en 2014 : « [elles sont] peut être une source potentielle de troubles dans l'apprentissage. »¹⁰⁸⁶

Voilà pourquoi nous devons continuer à créer des outils pédagogiques et des stratégies d'enseignement qui peuvent aider les élèves à améliorer leur compréhension des concepts liés au deuxième principe. Malheureusement, presque tous les livres existants offrent des méthodes basées sur l'utilisation du concept de l'entropie et privilégient la forme bilan du deuxième principe, ne donnant que peu d'intérêt à l'approche historique. Cependant, nous avons montré qu'une telle approche pourrait être très efficace pour améliorer la compréhension du deuxième principe avant d'aborder le concept plus difficile qu'est l'entropie. Il serait alors nécessaire de traiter le problème des machines thermiques avant celui de l'entropie et revenir à ce qui était présenté au début du 20^{ème} siècle : la notion de *dégradation de l'énergie*.

En outre, introduire d'abord les machines thermiques permettrait de mettre en avant l'intérêt des diagrammes thermodynamiques. Mais, là encore, il est nécessaire d'être prudent lors de l'utilisation de ces diagrammes et ne pas céder aux raccourcis. En effet, la présentation des diagrammes (P, V) possédant une transformation « *infinithermie* » pour déterminer simplement l'expression du travail des forces pressantes par le calcul de l'aire d'un triangle, peut soulever de nombreuses difficultés. En effet, si le problème est traité avec légèreté il y a un risque d'engendrer un amalgame entre les notions de transfert thermique (ou de « chaleur ») et de température. Mais dans le même temps, si le problème est correctement abordé, ces difficultés pourraient être mises à profit pour aider l'étudiant à appréhender la notion de transfert thermique. Premièrement, le transfert thermique apparaît clairement comme un échange particulier d'énergie autre que le travail. Deuxièmement, le fait d'obtenir un transfert thermique nul pour une transformation donnée n'implique pas nécessairement que cette transformation soit celle d'un système en évolution adiabatique (l'énergie pouvant être à la fois cédée et reçue par transfert thermique au cours de la transformation, pour finalement aboutir à $Q = 0$). Enfin, cet exemple

¹⁰⁸⁶ « *It may be a potential source of learning disabilities* » (Anakkar, 2014) p.446

pourrait aider les élèves à distinguer les notions de transfert thermique et de température. En effet, couramment, lorsqu'un système thermodynamique donné reçoit de l'extérieur de l'énergie par transfert thermique ($Q > 0$), on se ramène à deux situations. La première, la plus immédiate est que la température du système augmente ($\Delta T > 0$). C'est une des raisons pour lesquelles température et transfert thermique sont confondus, car la relation $Q = c\Delta T$ reste généralement très présente dans les esprits. Le second cas, déjà plus difficile à concevoir, est que la température du système reste constante ($\Delta T = 0$). C'est notamment lors des changements d'état du corps pur que ce phénomène se produit (fusion, vaporisation, sublimation). Mais, dans l'exemple des transformations *infinithermes*, on montre que lors d'un apport à un système donné, d'énergie par transfert thermique ($Q > 0$), la température de celui-ci peut diminuer ($\Delta T < 0$) !

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail que nous venons de réaliser sur l'enseignement de certains concepts de la thermodynamique comme la *température*, le *transfert thermique* ou « *chaleur* », l'*énergie*, le *système thermodynamique* et l'*entropie* s'étale sur plus d'un siècle. Toutefois, si nous avons commencé notre analyse à partir de 1902, il s'est avéré nécessaire de revenir sur l'émergence et la diffusion de ces notions lors de l'élaboration de la thermodynamique. Car, si les sensations de chaud et de froid ont fait l'objet de discussions dès l'Antiquité et que les premiers thermoscopes ont été élaborés à cette époque, ce n'est réellement qu'au 18^{ème} siècle que les notions de *température* et de « *chaleur* » ont vu le jour avec le travail fondateur de Black. Ce dernier développe l'hypothèse du *calorique* qui sera notamment reprise par Lavoisier et Laplace et utilisée par Carnot pour présenter ses théories sur les machines thermiques. Mais, l'hypothèse du calorique répand l'idée d'une substantialisation et d'une conservation de la « *chaleur* ». Pourtant, très tôt, certains physiciens comme Rumford, montrent l'incompatibilité de ces principes avec certaines observations. L'hypothèse du calorique sera remise en cause à nouveau quelques années plus tard avec notamment la formalisation du premier principe et l'équivalence mécanique de la « *chaleur* » vers les années 1850. Pourtant, on retrouve la trace du calorique dans de nombreux ouvrages de thermodynamique au cours des années suivantes (voire des siècles !). Comme l'a rappelé Brun en 1936, les idées fausses ont parfois une emprise très importante dans les esprits : « [...] *les idées fausses les plus dangereuses ne sont pas celles que l'on énonce formellement et où il est facile de découvrir l'erreur clairement formulée, mais bien celles que l'on suggère sans le vouloir ou qu'on laisse s'installer par omission. L'une des plus graves, à propos de la chaleur est l'indestructibilité de « la chaleur », le « calorique » d'autre fois, fantôme qu'il est difficile de tuer quand on l'a laissé pénétrer dans l'enseignement.* »¹⁰⁸⁷

Aussi, si la thermodynamique des principes semble achevée à la fin du 19^{ème} siècle, les concepts qui lui sont liés ne semblent pas être clairement définis et l'histoire de leur développement nous a montré que cela peut avoir de lourdes conséquences dans l'enseignement. En débutant notre étude au moment de la réforme Leygues des *humanités scientifiques* en 1902, nous avons retracé l'évolution des programmes de thermodynamique dans le secondaire et dans le supérieur. Notre étude a permis de mettre en évidence plusieurs périodes clés. Tout d'abord, on a noté la présence dès le début du 20^{ème} siècle, d'un enseignement de thermodynamique dans le secondaire, bien que le terme ne soit pas explicitement employé. On retrouve en classe de seconde le concept de température notamment présenté via les sensations de *chaud* et de *froid* et la calorimétrie. Cette présentation pouvait, comme nous l'avons vu, engendrer de réelles

¹⁰⁸⁷ (Brun, et al., 1936), Fabry dans la préface p.8

confusions et l'appel à nos sensations apparaissait également comme insuffisant voire trompeur. En revanche, le principe de conservation de l'énergie présent dans les programmes de terminale, apparaissait comme un principe fondateur faisant appel à l'idée d'énergie qui englobait alors tous les domaines de la physique et de la chimie. Néanmoins, dans les programmes du supérieur, on a constaté que la thermodynamique était quasi inexistante, alors que la mécanique puis l'électricité occupaient presque l'ensemble du volume horaire consacré à la matière.

De plus, nous avons montré que les réformes successives qui ont eu lieu au cours du siècle, avaient des causes multiples mais une motivation commune : la *promotion des sciences*. En ce qui concerne la thermodynamique, si les programmes restaient globalement très proches de ceux décidés en 1902, une prise de conscience de rénovation du langage employé se faisait déjà ressentir dès les années 30. En effet, l'histoire de l'émergence des concepts de la thermodynamique avait laissé une empreinte importante dans les ouvrages d'enseignement et avait ajouté de la confusion dans la signification des notions, comme l'ont signalé Médard et Tachoire en 1994 : « *Non seulement le vocabulaire mais aussi le style des auteurs anciens peut être une source de difficultés [...], beaucoup de savants des siècles passés se sont exprimés de façon confuse ou ambiguë.* »¹⁰⁸⁸ Ainsi, nous avons mis en évidence qu'il devenait nécessaire d'éclaircir le vocabulaire de la thermodynamique. Le concept de « *chaleur* » était alors apparu comme une des notions les plus délicates à appréhender. En effet, liée à un grand nombre de significations et de dénominations, la « *chaleur* » était tantôt présentée comme une *énergie calorifique*, tantôt comme une *énergie thermique*, ou encore comme une grandeur de transfert selon qu'elle soit liée à l'énergie interne en l'absence de travail, liée à la température ou encore obtenue à travers le premier principe de la thermodynamique.

Au cours des années 1950, la description microscopique de la matière a alors permis aux auteurs de présenter la température comme une mesure de l'agitation thermique, c'est-à-dire une mesure de l'énergie cinétique microscopique. Nous avons montré qu'il s'agissait d'un point essentiel dans l'enseignement de la thermodynamique car cette description est apparue comme la première distinction entre le concept de température et celui de « *chaleur* ». C'est aussi au cours de cette période que la thermodynamique a occupé une place de plus en plus importante dans les programmes des classes préparatoires aux grandes écoles. En outre, nous avons mis en évidence que c'est également à partir de cette époque, que la formalisation du deuxième principe sous forme d'une égalité, à l'image du premier principe, apparaissait de plus en plus fréquemment dans la littérature scientifique.

D'autres réformes majeures de l'enseignement ont vu le jour à la fin des années 1970. Elles ont été notamment le fruit des travaux des colloques de Caen de 1956 et 1966 en faveur de la promotion des sciences. C'est ainsi que la commission Lagarrigue fut chargée de réformer le

¹⁰⁸⁸ (Médard, et al., 1994) p.34

système et le contenu des programmes concernant l'enseignement des sciences. Au cours de ces rénovations, la présentation des concepts de thermodynamique a connu quelques bouleversements dans les documents officiels. Mais en réalité, ceux-ci n'ont fait que reprendre ce que proposaient déjà quelques années auparavant, certains manuels : une description microscopique de la matière et un premier principe sous forme d'un bilan (principe de l'état initial et de l'état final). Pourtant, Michel Hulin regretta, comme nous l'avons vu, que la thermodynamique soit finalement que trop peu développée, en soulignant notamment l'absence des machines thermiques. Néanmoins, l'énergie apparaissait encore une fois, comme un élément majeur de l'enseignement secondaire. Qui plus est, ce thème, à cette époque, s'inscrivait dans un contexte de prise de conscience des besoins énergétiques mondiaux. Au niveau des pratiques pédagogiques, la réalisation des bilans avait permis de mettre en avant un concept clé : celui de *système thermodynamique*. Ce concept était également apparu dans l'enseignement supérieur comme incontournable et certains auteurs lui avaient alors consacré le premier chapitre de leur cours de thermodynamique. En outre, nous avons également constaté que dans les années 80, la présentation de la thermodynamique pouvait se faire sous deux aspects comme l'ont rappelé Bertin et al. en 1976 : « *La thermodynamique, en tant que science de synthèse, peut être abordée de deux points de vue assez différents.*

A la base d'une première conception se trouvent deux postulats (on dit plutôt principes en Physique) extrêmement généraux réglemant les diverses transformations d'un système. Le premier principe, énonce la conservation de l'énergie, tandis que le second principe, plus subtil, introduit des restrictions sur l'évolution d'un système isolé [...]

Une méthode complètement différente consiste à étudier directement les propriétés d'une assemblée de très nombreuses particules : c'est la physique statistique. L'avantage est de faire apparaître des grandeurs telles que l'énergie, l'entropie, la température, etc... de manière beaucoup plus concrète. L'inconvénient, au niveau de ce cours, est de soulever certaines difficultés mathématiques. »¹⁰⁸⁹ Ces deux descriptions apparaissent ainsi conjointement dans les ouvrages. L'énergie interne et la température étaient présentées à l'aide d'une interprétation microscopique alors que les grandeurs de transfert comme le travail ou la chaleur, mais aussi la grandeur d'état « entropie » étaient déduites des principes.

La thermodynamique connaît une rénovation majeure au début des années 90. Elle est clairement devenue une science des bilans pour le premier principe mais également pour le deuxième principe. Toutefois, alors que la résolution des problèmes apparaissait comme systématique, les significations réelles des principes semblaient avoir disparu, comme l'ont souligné en 1976, Bertin et al. « *On peut ainsi développer toute une **Thermodynamique abstraite** fondée seulement sur les principes, et trouver, par une méthode déductive, toutes sortes d'équations satisfaites par les fonctions énergie interne et entropie. Mais il ne faut pas espérer trouver dans ces équations plus que ce que contiennent les grandes beautés formelles, elle*

¹⁰⁸⁹ (Bertin, et al., 1976) p.35

décrit les phénomènes avec élégance, mais sans les expliquer. On peut même, dans son optique, ignorer jusqu'à la structure atomique de la matière ! »¹⁰⁹⁰ La conservation de l'énergie s'étendit dans l'esprit des étudiants à la conservation de l'entropie. En outre, l'idée de la *dégradation de l'énergie*, disparue des programmes depuis de nombreuses années, ne se retrouvait plus dans l'enseignement de la thermodynamique.

Nous avons en outre, montré que la réforme des années 90 a également soulevé un problème majeur de la thermodynamique : celui du langage. En effet, l'appellation « chaleur », source de trop nombreuses confusions, fut officiellement abandonnée pour le terme *transfert thermique*. Pourtant, nous avons montré que les incohérences apparaissaient dans les programmes et que le changement de dénomination ne résolvait pas entièrement les problèmes de compréhension. Pour étayer notre propos, nous avons proposé une étude d'un grand nombre d'ouvrages de thermodynamique pour chercher les causes de ces difficultés. Nous avons également élargi notre champ de recherche en étudiant les concepts de *système thermodynamique*, de « chaleur » et d'*entropie* qui, comme nous l'avons vu, sont intimement liés.

Comme l'a souligné Williams en 1999, « tous les manuels scolaires présentent des problèmes linguistiques. »¹⁰⁹¹ Ces problèmes peuvent avoir différentes causes, comme nous avons pu le voir : « 1/ Un mot commun est utilisé avec une définition spécifique qui diffère de celle de son utilisation quotidienne »¹⁰⁹² : c'est le cas notamment de la notion de « chaleur », qui dans son sens commun est régulièrement confondue avec la notion de température.

« 2/ un mot ou une expression technique défini différemment d'un auteur à un autre, ou dans des contextes différents »¹⁰⁹³ : encore une fois nous avons montré que le mot « chaleur » était présenté à la fois comme une énergie ou un transfert d'énergie. Aussi, l'introduction de la notion de *transfert thermique* au cours des années 1995 (supérieur) et 2001 (secondaire) a permis comme nous l'avons montré, d'associer ce concept à une grandeur de transfert et non plus à une grandeur transférée. Le système thermodynamique est également apparu comme un élément essentiel pour appréhender et distinguer les grandeurs de transfert comme le transfert thermique qui prend son sens à l'interface d'un système, des grandeurs énergétiques caractéristiques du contenu du système. Mais là encore, il est clairement apparu qu'une mauvaise définition de ce concept pouvait engendrer des interprétations très différentes d'un problème de thermodynamique.

¹⁰⁹⁰ (Bertin, et al., 1976) p.35

¹⁰⁹¹ « ...the majority of our textbooks exhibit many of the linguistic problems » (Williams, 1999) p.672

¹⁰⁹² « ~1/ a common word used with a specific definition which differs from that of its everyday use; ~2/ a technical word or phrase defined differently from author to author, or in different contexts; or ~3/ a principle or important notion which is defined imprecisely » (Williams, 1999) p.674

¹⁰⁹³ « ~1/ a common word used with a specific definition which differs from that of its everyday use; ~2/ a technical word or phrase defined differently from author to author, or in different contexts; or ~3/ a principle or important notion which is defined imprecisely » (Williams, 1999) p.674

« 3/ une notion importante ou un principe est défini de manière imprécise »¹⁰⁹⁴ : nous avons notamment montré que les deux principes de la thermodynamique ont été énoncés de plusieurs façons. L'énergie interne est longtemps restée comme une grandeur énergétique non identifiable, telle une réserve d'énergie au sein d'un corps dont on ne connaît pas la véritable nature. Quant au deuxième principe, nous avons notamment montré que l'existence de nombreux énoncés et la multiplicité des significations de l'entropie pouvaient engendrer de lourdes incompréhensions et confusions. Comme nous l'avons vu, le recours à la thermodynamique statistique (dès les années 1995 en CPGE) pour appréhender la notion d'entropie ne pouvait être une solution satisfaisante si l'énoncé du deuxième principe n'était pas suffisamment compris. Aussi, l'idée d'introduire le deuxième principe via les énoncés historiques et notamment au travers des machines thermiques, est alors apparue comme une solution possible et pertinente pour aborder les limitations imposées par le deuxième principe. Mais, nous avons également montré, dans l'exemple des machines à transformations *infinitesimales*, notamment présentées dans les ouvrages pour le calcul graphique du travail, qu'elles pouvaient être également une source de difficultés importantes. Toutefois, il est apparu qu'une analyse relativement simple de ce type de transformations était un outil supplémentaire pour distinguer les concepts de température et de transfert thermique.

Perspectives

Le travail que nous venons de présenter ne soulève que quelques difficultés dans l'enseignement de la thermodynamique. Régulièrement, les enseignants pointent du doigt les problèmes de définitions qui apparaissent au cours de leur enseignement ou dans la résolution des exercices. On peut notamment citer les exemples des définitions des transformations isotherme, isentropique *etc.* Aussi, une question récurrente dans le cas d'une transformation isotherme revient : la transformation doit-elle être nécessairement réalisée par voie réversible ou quasistatique ? En outre, dans les concours nationaux, comme les concours d'entrée en école d'ingénieurs, plusieurs rapporteurs signalent les ambiguïtés dans les sujets, notamment dues à des problèmes sémantiques. On peut notamment signaler un exemple récent sur le concours ENAC de 2015 relatif à la définition du rendement des machines. On lit très souvent que le rapport (énergie utile)/(énergie dépensée) est appelé rendement pour les moteurs et est inférieur à 1, tandis que pour les pompes à chaleur et les machines frigorifiques, il est appelé efficacité et est supérieure à 1. Pourtant dans cette épreuve, on parle de rendement et d'efficacité tant pour les moteurs que pour les machines frigorifiques. Il faut alors comprendre que le rendement est défini comme le rapport (efficacité machine réelle)/(efficacité maximale), l'efficacité maximale

¹⁰⁹⁴ « ~1/ a common word used with a specific definition which differs from that of its everyday use; ~2/ a technical word or phrase defined differently from author to author, or in different contexts; or ~3/ a principle or important notion which is defined imprecisely » (Williams, 1999) p.674

correspondant bien entendu à un fonctionnement réversible. Cette définition se retrouve en réalité, dans les ouvrages de thermodynamique industrielle, avec lesquels les étudiants de classes préparatoires ne sont guère familiarisés. Un travail d'harmonisation du vocabulaire doit donc être fait. Ce travail est peut-être en train de voir le jour par la création de listes de définitions publiées au BOEN en 2015 par le ministère de l'éducation nationale¹⁰⁹⁵. Dans ces documents, établies par la *Commission d'enrichissement de la langue française* créée en 1996, on retrouve notamment des définitions relatives à la thermodynamique. Les travaux de cette commission seront peut-être l'occasion de mettre en accord les différentes branches de la thermodynamique que l'on peut retrouver en physique, en chimie, en génie industriel ou encore en biologie.

Enfin, la réforme Chatel de 2010 dans le secondaire s'est poursuivie dans les classes préparatoires aux grandes écoles aux cours des années 2014 et 2015. La thermodynamique a été fortement touchée par cette rénovation. On note ainsi la disparition du formalisme mathématique de la thermodynamique, comme on peut le lire dans le Bulletin officiel spécial n° 3 du 30 mai 2013 : « *l'expression de la fonction d'état entropie sera systématiquement donnée [...] excluant ainsi toute thermodynamique différentielle.* »¹⁰⁹⁶ Il sera intéressant de poursuivre le travail ainsi proposé en analysant les conséquences d'une telle recommandation sur l'enseignement de la thermodynamique.

Mais quoiqu'il en soit, ce qu'affirmait Karl Popper (1902-1994) en 1960, était, est et restera plus que jamais vrai en thermodynamique : « *Si nous succombons à la tentation et usons du langage avec légèreté, c'est nous qui sommes cause des difficultés qui en résultent.* »¹⁰⁹⁷

¹⁰⁹⁵ Documents consultables sur le site du ministère de l'éducation nationale : http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?cid_bo=95176 pour la chimie et sur http://www.education.gouv.fr/pid285/bulletin_officiel.html?cid_bo=95347 pour la biologie.

¹⁰⁹⁶ (BO, 30 mai 2013) p.27

¹⁰⁹⁷ Retranscription du texte lu le 20 Janvier 1960 à l'invitation de la British Academy, dans le cadre de sa « *Conférence Philosophique* » annuelle. (Popper, 1998) p.92

ANNEXES

I. ANNEXE N°1 : LES DEFINITIONS DE « SYSTEME » EN THERMODYNAMIQUE

L'ensemble des définitions sont classées par date de parution de l'ouvrage.

1. Ouvrages de Physique

1976 :

« Nous appellerons système l'ensemble des corps contenus à l'intérieur d'une surface fermée, et milieu extérieur l'ensemble des corps extérieurs à cette surface, autrement dit tout le reste de l'Univers. On peut imaginer un système comme « une boîte noire » : un expérimentateur (qui appartient au milieu extérieur) cherche à connaître le contenu de cette boîte en modifiant certains de ses paramètres... »¹⁰⁹⁸

1990 :

« Système ; milieu extérieur ; univers

** système : ensemble matériel limité par une surface fermée, matérielle ou immatérielle.*

** milieu extérieur : tout ce qui n'est pas le système.*

** univers : système + milieu extérieur.*

Remarque : il faut entendre ici le terme univers au sens restrictif : il se réduit en fait au système et à tout ce qui interagit avec lui.

Phase d'un système

** phase : partie homogène d'un système*

** système monophasé : système ne comportant qu'une phase*

** système polyphasé : système comportant plusieurs phases.»¹⁰⁹⁹*

1991 :

« Système : C'est l'ensemble des corps contenus à l'intérieur d'une surface qui définit le système considéré.

Milieu extérieur : C'est l'ensemble des corps situés à l'extérieur de la surface ; ce peut être un autre système (si le premier est contenu dans un autre système) ou le reste de l'univers s'il est en relation avec tout l'univers.

¹⁰⁹⁸ (Bertin, et al., 1976) p.34

¹⁰⁹⁹ (Gendreau, 1990) p.6

Notion de paroi : c'est le milieu qui sépare le système étudié du ou des autres systèmes avec lesquels le système considéré est en contact.

On appelle phase toute partie homogène d'un système en équilibre »¹¹⁰⁰

1992 :

« ... La thermodynamique est l'étude des systèmes matériels lorsqu'on les considère comme formés d'un grand nombre de particules élémentaires.

***Phases :** Les paramètres intensifs varient de façon continue ou non d'un point à un autre du système. On appelle **phase** d'un système toute partie (occupant un certain volume) telle que **les paramètres intensifs aient même valeur en tous ses points**. En particulier une phase est **homogène** et **isotherme** (c'est-à-dire de même composition et de même température en tous ses points). En toute rigueur l'existence d'une phase exclut la possibilité d'un champ de force agissant sur le système, tel que le champ de pesanteur. Celui-ci ferait varier, dans une phase fluide, la pression et la masse volumique d'un point à un autre. Mais, dans la plupart des cas, le champ de pesanteur n'a qu'un effet négligeable sur les paramètres intensifs et, sauf indication contraire, nous supposons qu'il en est ainsi dans la suite de l'ouvrage.*

*Dans le cas d'un **système polyphasé**, les paramètres extensifs sont des fonctions homogènes du premier degré des masses des différentes phases.*

Un système non homogène peut être découpé en petits éléments de matière qui servent à définir les paramètres intensifs. Dans la mesure où cette définition est possible, ces petits éléments doivent être considérés comme des phases. En thermodynamique macroscopique tout système est formé d'un ensemble de phases, éventuellement élémentaires et en nombre alors extrêmement grand, de telle sorte qu'on peut considérer que les paramètres d'état varient continûment. Si cette approximation est insuffisante, le problème dépasse la Thermodynamique macroscopique.
»¹¹⁰¹

1993 :

« Plusieurs définitions ont été proposées, citons par exemple celle employée par Francis Fer : un système thermodynamique est une "collection d'objet sur laquelle on porte son attention". Cette définition, qui est trop générale, peut-être remplacée par la suivante : un système thermodynamique est une partie de l'univers limitée par une surface fermée et comprenant un grand nombre de particules microscopiques. Il y a donc toujours un choix à effectuer pour définir un système thermodynamique et ce choix est important, car il conditionne souvent la possibilité ou l'impossibilité de résoudre un problème. La surface de séparation est une surface mathématique dont il est essentiel de définir avec précision sa position par rapport aux surfaces

¹¹⁰⁰ (Bachelier, et al., 1991) p.4

¹¹⁰¹ (Suardet, 1992) p.16

matérielles. Cette surface étant définie, on introduit alors un milieu extérieur ainsi qu'une normale externe unitaire.

Système homogène : Un système est homogène si sa nature chimique et physique est continue en tout point. Un gaz contenant des particules solides constitue donc un système hétérogène.

Système simple : Un système simple est un système :

- matériel à trois dimensions, homogène et isotrope,
- sans effet de champ, sans effet interne de surface (tension superficielle par exemple)
- constitué d'une seule espèce chimique,

il peut donc être soit fermé, soit ouvert. »¹¹⁰²

« Définition d'un système simple

Un système thermodynamique est dit simple s'il :

- comporte une seule espèce sous une seule phase,
- est sans effet électromagnétique.

Le système est défini par sa pression, son volume et sa température. A l'équilibre, ces variables sont reliées par une loi d'état. $F(P, V, T) = 0$

Le système est donc divariant, seulement deux variables sont indépendantes.]

Système composite : Un système composite est un ensemble de sous-systèmes simples entre lesquels des échanges de masse et d'énergie sont possibles. »¹¹⁰³

« 1.4.3. Equilibre d'un système composite

Un système composite est dans un état d'équilibre lorsque chaque sous-système est à l'équilibre et que les sous-systèmes sont en équilibre mutuel. Les sous-systèmes sont dits en équilibre mutuel lorsqu'aucun échange n'existe entre eux.

[...]

D'une façon générale, on peut dire qu'un système thermodynamique est à l'équilibre lorsque tous les flux et toutes les productions sont nuls. (Il s'agit d'une extension de la deuxième définition de l'équilibre donnée pour les systèmes simples). »¹¹⁰⁴

« Tout corps (ou ensemble de corps) matériel, de taille macroscopique, constitue un système thermodynamique. Tout ce qui l'entoure est appelé milieu extérieur. L'ensemble de ces deux parties, le système et le milieu extérieur, représente l'univers. »¹¹⁰⁵

1994 :

¹¹⁰² (Dudeck, 1993) p.11

¹¹⁰³ (Dudeck, 1993) p.16

¹¹⁰⁴ (Dudeck, 1993) p.45

¹¹⁰⁵ (Berrada, et al., 1993) p.69

« ... la thermodynamique traite de systèmes **macroscopiques** (du grec makros qui veut dire grand) c'est-à-dire de systèmes contenant un nombre extrêmement élevé de particules ... »¹¹⁰⁶

« Un système thermodynamique est un ensemble formée d'un grand nombre de particules- nous parlerons donc en terme de moles- que l'on distingue de son environnement, celui-ci constituant le milieu extérieur. Le système étudié doit toujours être défini avec précision. [...] la séparation entre le système thermodynamique et le milieu extérieur peut être effective en raison de la présence matérielle d'une paroi ou conceptuelle, l'observateur isolant par la pensée un ensemble d'objets par rapport aux autres. Un système simple est constitué de N moles d'un corps pur fluide occupant un volume V pour lequel on ignore les effets de surface, les effets de pesanteur, des champs électriques et magnétiques. Un système composite est obtenu par la réunion de plusieurs systèmes simples de sorte qu'ils puissent échanger de l'énergie et éventuellement des molécules. »¹¹⁰⁷

1995 :

« L'étude des systèmes matériels et leur évolution relève de la thermodynamique lorsque la température est une donnée significative. Elle se distingue en cela de la mécanique et de l'électromagnétisme.

En thermodynamique, la matière est considérée à l'échelle macroscopique, c'est-à-dire sans référence à sa structure moléculaire. La description macroscopique, c'est-à-dire à notre échelle d'un système de 10^{23} particules, ne nécessite qu'un petit nombre de paramètres, dont la température.

Les grandeurs purement thermodynamiques, comme la température, peuvent recevoir une interprétation mécanique si on se place au niveau microscopique, c'est-à-dire à celui des particules.

Nous pouvons considérer un système matériel comme un ensemble de particules en interaction (le terme de particule désigne ici tout constituant élémentaire : atome, ion ou molécule). Remarque importante sur la nécessité d'un grand nombre de particules pour qualifier de thermodynamique le système considéré»¹¹⁰⁸

« Nous appellerons **phase** toute partie d'un système thermodynamique, dont les paramètres d'états intensifs sont continus. Ainsi, un volume quelconque d'eau liquide constitue une phase, de même qu'un volume quelconque d'un mélange eau liquide-éthanol liquide ; la notion de phase n'est donc pas spécifique d'un corps pur. [...]

¹¹⁰⁶ (Rous, et al., 1994) p.1

¹¹⁰⁷ (Hulin, et al., 1994) p.1

¹¹⁰⁸ (Brébec, et al., 1995) p.14

Il est important de définir de manière très précise le système étudié ; ainsi lorsqu'on considère un gaz enfermé dans un récipient, il faut bien préciser si le système étudié est le gaz seul (le récipient fait alors partie du milieu extérieur) ou s'il est constitué du gaz et du récipient.»¹¹⁰⁹

1996 :

« Les systèmes étudiés en thermodynamique sont caractérisés par le nombre élevé de leurs constituants élémentaires »¹¹¹⁰

« Un système thermodynamique est défini par le contenu matériel d'une surface fermée S.»¹¹¹¹

1997 :

« En thermodynamique, l'objet d'étude est appelé système et son environnement le milieu extérieur. Le système est un volume déterminé de l'espace contenant de la matière, gazeuse, liquide ou solide. Tout le reste de l'espace est le milieu extérieur. Le système interagit avec l'extérieur à travers sa paroi qui est la surface qui le sépare de l'extérieur, par l'intermédiaire de courants (courant de matière, courant de chaleur, ou de flux).

Si une variable intensive prend la même valeur en tout point du système (elle est donc indépendante des variables d'espace), elle est dite uniforme. Un système où toutes les variables intensives sont uniformes est dit homogène.

On parle de phase (phase liquide, solide, gazeuse), lorsque toutes les grandeurs intensives d'un système, ou d'une partie (macroscopique) d'un système sont des fonctions continues des variables d'espace.

** Dans certaines conditions, un système hors d'équilibre thermodynamique peut être considéré comme étant constitué de sous-systèmes dans chacun desquels toutes les variables intensives sont uniformes (mais de valeurs différentes d'un sous-système à un autre). On dit alors que chaque sous-système est à l'équilibre local (voir la troisième partie du manuel)»¹¹¹²*

« Un système thermodynamique est défini par le contenu matériel d'une surface fermée Les systèmes physiques considérés en thermodynamique contiennent généralement un très grand nombre de particules (atomes, molécules etc.) de l'ordre du nombre d'Avogadro. »¹¹¹³

¹¹⁰⁹ (Brébec, et al., 1995) p.102

¹¹¹⁰ (Gié, et al., 1996) p.11. Il s'agit en fait d'une simple remarque. Aucune définition à proprement parlé n'est proposé dans l'ouvrage.

¹¹¹¹ (Laffont, et al., 1996) p.27

¹¹¹² (Boutin, et al., 1997) p.20

¹¹¹³ (Pérez, 1997) pp.8-9

1999 :

« On appelle système l'objet d'étude. Ce peut être aussi bien l'atmosphère d'une planète qu'une molécule d'eau, bien que dans ce dernier cas il soit nécessaire d'être vigilant avec la définition des variables macroscopiques. Le terme de système n'a donc aucune implication du point de vue des dimensions. Tout ce qui n'est pas le système est appelé milieu ; c'est le reste de l'univers. Système et milieu sont en communication par leur surface limite commune et peuvent procéder à des échanges à travers celle-ci. Le système est ouvert quand il peut échanger de la matière et de l'énergie avec le milieu. Il est fermé quand il ne peut échanger que de l'énergie. Il est isolé quand il ne peut échanger ni matière ni énergie.

On considère qu'un système est continu chaque fois qu'il est inutile de prendre en compte la nature discrète de la matière.»¹¹¹⁴

« Un système est composé d'un corps ou d'un ensemble de corps, séparé du reste de l'univers (appelé milieu extérieur) par une surface (figure) cette surface peut être réelle (gaz dans une enceinte) ou fictive (liquide dans un tube à essai ouvert à l'air libre).

A travers cette surface se produisent des transferts d'énergie (travail mécanique, énergie thermique...) ou de matière au cours de la transformation thermodynamique.

Système ouvert : transfert de matière (avec ou sans transfert d'énergie)

Système fermé ; pas de transfert de matière

Système isolé : pas de transfert de matière ni d'énergie »¹¹¹⁵

« Système thermodynamique : collection arbitraire d'objets dont les propriétés peuvent être décrites d'une manière unique et complète par des variables d'état (volume, énergie, nombre de particules, entropie, etc.).

En général, le système est confiné dans une enceinte dont les parois assurent une séparation avec le milieu extérieur ; les parois, très diverses, peuvent même être immatérielles, comme c'est le cas de confinement d'un plasma chaud par un champ magnétique.

Système homogène : système dont les propriétés sont les mêmes en tout point.

Système hétérogène : système dont les propriétés changent d'une manière discontinue en traversant des surfaces séparatrices. (une enceinte contenant de l'eau, de la vapeur d'eau et de l'air sec est un système hétérogène).

Phase : partie homogène d'un système hétérogène.

Interface de phase : surface séparatrice entre deux phases.

Dans une bouilloire fermée contenant de l'eau, de la vapeur d'eau et de l'air, la surface de l'eau est l'interface. Il y a une phase gazeuse (la vapeur et l'air) et une phase liquide (l'eau).

¹¹¹⁴ (Frère, et al., 1999) p.35

¹¹¹⁵ (Grécias, et al., 1999) p.549

Le plus souvent, les propriétés macroscopiques du système dépendent des dimensions (et de la forme) des interfaces de phase.

La bouilloire d'eau, de vapeur d'eau et d'air. Les propriétés macroscopiques sont différentes selon que l'eau est accumulée dans le fond ou constituée de gouttelettes (brouillard). »¹¹¹⁶

« Un **équilibre global** impose que les variables thermodynamiques ne varient pas au cours du temps pour toutes les phases du système.

Équilibre thermique local : système qui n'est pas en équilibre global, mais dont les volumes partiels se comportent comme des systèmes équilibrés.

- Dans ce cas, les variables intensives sont seulement définies localement.

Grandeur thermodynamique : Quantité physique, donc mesurable, qui définit précisément une propriété macroscopique du système. Les grandeurs thermodynamiques ne peuvent être définies et mesurées qu'à l'équilibre.

Système hétérogène : les variables extensives du système total s'obtiennent par addition des variables correspondantes des phases individuelles.

Système homogène : système dont les propriétés restent identiques en tout point.

Système hétérogène : système dont les propriétés peuvent changer brusquement au passage d'une interface.

Phase : partie homogène d'un système hétérogène.

Limite de phase : interface de séparation entre deux phases.

Système hétérogène : système dont les propriétés changent d'une manière discontinue aux limites de phase. »¹¹¹⁷

2002 :

« Un système thermodynamique est un système contenant un très grand nombre de particules élémentaires. Ce peut être un fluide (gaz ou liquide) ou un solide, ou encore l'ensemble d'électrons libres dans un métal... »¹¹¹⁸

« **Homogène** : signifie que les variables d'état et en particulier la masse volumique sont les mêmes en tout point.

Isotrope : signifie que les propriétés sont les mêmes quelle que soit la direction.

Dans le cas de l'atmosphère, il y a une direction particulière qui est la verticale et la masse volumique dépend de l'altitude. Donc l'atmosphère n'est ni homogène, ni isotrope. »¹¹¹⁹

¹¹¹⁶ (Stöker, et al., 1999) p.621

¹¹¹⁷ (Stöker, et al., 1999) p.739

¹¹¹⁸ (Sanz, et al., 2002) p.771

¹¹¹⁹ (Sanz, et al., 2002) p.829

« **Délimitation du système** : Il faut que les échanges de travail et de transfert thermique du système considéré soient bien définis et donc que les limites du système soient parfaitement connues. »¹¹²⁰

« Une **phase** est un **système homogène** ou sous-système d'un système homogène. Dans une phase, **les paramètres intensifs sont uniformes**. Les corps purs peuvent exister sous trois phases : solide, liquide, vapeur. On utilise parfois le mot **état** à la place de **phase**. »¹¹²¹

« [...] En thermodynamique, comme dans tout problème physique, il faut avant tout définir le système étudié »¹¹²²

« On désigne [par système] l'objet d'étude. Il s'agit en général d'un système matériel, une "portion" d'Univers". Le système est défini par séparation avec le reste de l'Univers, appelé le milieu externe. Il faut noter ce que possède d'arbitraire une telle définition ; la séparation peut être physique, décrite spatialement par une surface frontière correspondant à une discontinuité dans la répartition de matière, mais ce peut être aussi une séparation "par la pensée". En fait, une grande souplesse existe dans la définition du système ; l'essentiel est de bien l'expliciter et de s'y tenir dans la suite de l'étude.

Un système "thermodynamique" diffère d'un système "mécanique" ; un système mécanique peut être entièrement décrit, après modélisation, par le choix d'un certain jeu de paramètres "géométriques" de position, d'orientation des divers éléments constituant le système. Un système thermodynamique est plus riche en ce sens qu'une telle géométrisation est insuffisante pour en décrire les propriétés. Nous verrons que sa description nécessite l'introduction de deux grandeurs fondamentales, spécifiques, la température et l'entropie. »¹¹²³

« On peut être amené à subdiviser un système en sous-systèmes dont les études individuelles donneront accès à une information plus complète, ou encore à englober un système avec une partie de son extérieur pour constituer un système plus vaste certes, mais dont les propriétés globales peuvent être mieux définies et contrôlées. »¹¹²⁴

« Si le système est identique en tout point, c'est-à-dire si les paramètres le décrivant ont la même valeur partout, le système est dit homogène. Dans le cas contraire, il est inhomogène. Ces expressions ont trait à la structure interne du système.

Equilibre local : propriétés locales du milieu sont suffisamment bien décrites par les mêmes paramètres qu'un état d'équilibre»¹¹²⁵

¹¹²⁰ (Sanz, et al., 2002) p.1385

¹¹²¹ (Sanz, et al., 2002) p.906

¹¹²² (Sanz, et al., 2002) encadré, p.830

¹¹²³ (Faroux, et al., 2002) p.2

¹¹²⁴ (Faroux, et al., 2002) p.4

¹¹²⁵ (Faroux, et al., 2002) p.11

« The substance or substances involved in physical and/or chemical is defined as the system. The system may be complex or it may be very simple and may consist only of a homogeneous piece of matter, such as a certain volume of air. What is included in a system is a matter of convenience that depends on the question at issue. Boundaries of system may be real or they may be imaginary. Physical boundaries may be part of the system and their properties may or may not be important; they may be movable or fixed. A system may be open, closed, thermally isolated or mechanically isolated. »¹¹²⁶

2004 :

« Qu'est-ce que l'Univers sinon l'ensemble de tous les systèmes physiques ! Cet Univers peut toujours être partagé en deux parties : le système étudié et le système que constitue son milieu extérieur. Tout comme en mécanique, il est indispensable de parfaitement définir préalablement le système sur lequel porte l'étude. Sans cela, tout n'est que litigieux et surtout ratés.

Le système et le milieu extérieur sont séparés par une paroi qui peut être fictive et incluse ou non dans le système.

Quand le champ des masses volumiques d'un système est uniforme, le système est dit homogène – sous-entendu, en matière.

Toute partie homogène d'un système constitue une phase de ce système.

A titre d'exemple, chaque état physique d'un corps –solide, liquide, gazeux- constitue en soi une phase. Un mélange homogène sous un seul état physique constitue également une phase. En revanche, lors d'un changement d'état physique, un corps pur est simultanément sous deux, voire trois phases.

Tout équilibre thermodynamique partiel est par définition caractérisé par le fait que la variable intensive correspondante est stationnaire et uniforme dans le système.

Il faut donc préciser si la surface fermée fait partie du système ou du milieu extérieur. »¹¹²⁷

« Un système thermodynamique est l'ensemble des corps contenus à l'intérieur d'une surface fermée. Le milieu extérieur est l'ensemble des corps extérieurs à cette surface, autrement dit tout le reste de l'univers.

Un système est isolé quand il n'échange rien avec le milieu extérieur (ni énergie, ni matière)

Un système est fermé s'il n'échange pas de matière avec le milieu extérieur (sa masse est donc constante). On dit qu'il est ouvert dans le cas contraire.

Un système thermodynamique peut en général échanger du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur. Une source de chaleur (ou encore thermostat) est un système qui n'échange que de la

¹¹²⁶ (Roy, 2002) p.3

¹¹²⁷ (Jech, 2004) p.344

chaleur et dont la température reste constante, quelles que soient les quantités de chaleur mises en jeu »¹¹²⁸

2005 :

« La thermodynamique étudie les échanges de matière et d'énergie qui ont lieu entre un milieu appelé système et son environnement appelé extérieur. Il n'est pas possible de résoudre un problème de thermodynamique tant que l'on n'a pas défini avec précision ces deux entités. La thermodynamique classique s'intéresse à des systèmes macroscopiques dont la définition est donnée ci-dessous.

Définition : Un système macroscopique est la portion d'espace, limitée par une surface réelle ou fictive, contenant la matière étudiée. Il est constitué d'un grand nombre de particules (atomes ou molécules), assimilées à des points matériels.

On appelle extérieur tout ce qui n'appartient pas au système. L'ensemble "système plus extérieur" constitue **l'univers**, terme qu'il ne faut toutefois pas confondre avec celui utilisé par les astronomes car l'univers thermodynamique a bien souvent des dimensions très limitées (la portion de cet univers en interaction avec le système).

Il faut toujours définir avec précision la nature et la frontière du système. La frontière d'un système n'est pas toujours aussi nette ; elle peut parfois être fictive sans que cela ne porte à conséquence, l'essentiel étant de bien définir le système. »¹¹²⁹

« Homogénéité et hétérogénéité d'un système :

Les systèmes thermodynamiques se divisent tous en deux groupes : les systèmes homogènes et les systèmes hétérogènes. Cette classification s'appuie sur la notion de phase dont voici la définition :

Définition : Une **phase** est une région de l'espace dans laquelle toutes les grandeurs intensives sont des fonctions continues des coordonnées de l'espace.

Cette définition implique donc qu'une grandeur intensive peut ne pas avoir la même valeur en tout point d'une phase. ... Un cas particulier très fréquent est celui où les valeurs de toutes les variables intensives sont indépendantes des coordonnées de l'espace. On parle alors de **phase physiquement uniforme**. Dans ce cas, les propriétés physiques (pression, température, composition chimique, etc.) sont les mêmes en tout point de la phase.

Un système est dit **homogène** quand la matière dont il est constitué se présente sous la forme d'une phase unique. Si la phase en question est physiquement uniforme on parle de **système physiquement homogène**. Un tel système peut être formé d'un seul constituant (corps pur dans un état donné) ou de plusieurs constituants (solution aqueuse de sucre non saturée, mélange de gaz, etc.). Un **système hétérogène** est un système constitué de plusieurs phases. Une phase d'un système hétérogène peut très bien se présenter sous forme dispersée. Par exemple la

¹¹²⁸ (Billy, et al., 2004) p.637

¹¹²⁹ (Foussard, et al., 2005) p.3

« vinaigrette » est une émulsion de vinaigre dans l'huile. Le vinaigre constitue la phase dispersée tandis que l'huile est la phase continue.

Remarque : La notion d'hétérogénéité d'un système est une notion subjective car elle est liée à la précision des appareils d'observation et au but recherché. C'est ainsi que la « mayonnaise » apparaît homogène à l'œil nu et hétérogène au microscope. Définir un système, c'est avant tout se fixer des hypothèses de travail en tenant compte des réalités expérimentales. »¹¹³⁰

2006 :

« Thermodynamic system is a set of macroscopic entities (including possibly radiation fields) that can exchange energy among them even if they don't interact either by some ordered (macroscopic) way or by mass exchange.

This definition needs some supplementary explanations. First, by macroscopic entity we mean a region of space that contains a very large number (of the order of the Avogadro's number: $N_A = 6.0221 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) of identical microscopic units.

“The exterior (or environment) of a thermodynamic system is the rest of bodies not included in the system (and with which it is supposed to interact). The reunion between the system and its exterior represents the thermodynamic universe.”

Therefore, a thermodynamic system may be defined as a collection of macroscopic entities which are able to exchange energy through thermal interaction.

Very often the necessity dividing the studied thermodynamic system into two or more parts occurs. This operation is called thermodynamic decomposition. Since the thermal interaction is supposed to exist in the initial system, all the other parts resulted from the division should have the same property and have to be considered automatically as thermodynamic systems. As opposed to the thermodynamic decomposition, one may also consider the thermodynamic reunion of two or several thermodynamic systems. However, the thermodynamic reunion is possible uniquely if the initial systems are able to interact thermally with one another. Otherwise, the obtained system will not be thermodynamic »¹¹³¹

2007 :

« Le système est la partie de l'univers étudiée. Le reste de l'univers est appelé extérieur. Un système est caractérisé à la fois par le domaine géométrique qu'il occupe et par son contenu. Son domaine est une (ou plusieurs, le nombre de région n'étant pas forcément constant) région tridimensionnelle de l'espace limitée par une (ou plusieurs) surface géométrique fermée, fixe ou mobile par rapport à un observateur donné, appelée frontière.

¹¹³⁰ (Foussard, et al., 2005) p.8

¹¹³¹ (Valeru, 2006) pp.10-11

Le choix du système et donc de l'intérieur, de l'extérieur et de la frontière peut-être les deux, est primordial puisqu'il définit l'objet étudié et ses éventuelles interactions avec le reste de l'univers »¹¹³²

« Nous qualifierons de « thermodynamiques » les systèmes qui comportent un nombre N de constituants microscopiques suffisamment grand pour que soient négligeables les effets de leur mouvement aléatoire, y compris les fluctuations qu'il engendre »¹¹³³

2009 :

*« On appelle **système** un corps ou un ensemble de corps séparé du **milieu extérieur** par une frontière (fictive ou matérielle). La réunion du système et de son milieu extérieur constitue **I'Univers**. Si le système est constitué d'un trop grand nombre de particules pour qu'une description individuelle de celles-ci soit envisageable, il est qualifié de **thermodynamique**.*

En fonction de la nature des échanges entre le système et le milieu extérieur, on distingue :

- Les systèmes **isolés** qui n'échangent ni matière ni énergie avec le milieu extérieur
- Les systèmes **fermés** qui échangent de l'énergie mais pas de la matière avec le milieu extérieur
- Les systèmes **ouverts** qui échangent matière et énergie avec le milieu extérieur.

[...] Ne pas écrire le premier principe avant d'avoir défini clairement à quel système on l'applique, et entre quels états (ou quels instants) »¹¹³⁴

*« Un **système thermodynamique** est défini comme une quantité de matière ou une région de l'espace faisant l'objet d'une étude.*

*Le système est circonscrit par des **frontières** qui le séparent du milieu extérieur ou environnant. D'un point de vue mathématique, les frontières d'un système thermodynamique n'ont aucune épaisseur. Donc, elles ne peuvent ni contenir une masse ni occuper un volume.*

*Un système thermodynamique est dit fermé si aucune masse (ou aucun écoulement) ne traverse ses frontières. La masse contenue dans le système demeure donc fixe. L'énergie peut toutefois traverser ses frontières sous forme de chaleur ou de travail. De plus, les frontières d'un système fermé peuvent être déformables. Un système thermodynamique est dit **isolé** lorsque ni masse (ou ni écoulement) ni énergie ne peuvent traverser ses frontières. Un système isolé ne subit aucune influence de la part du milieu extérieur.*

*Il arrive souvent que l'analyse thermodynamique porte sur un appareil dans lequel il y a écoulement entrant ou sortant. Un tel système est dit **ouvert**, et on le représente par un **volume***

¹¹³² (Watzky, 2007) p.2

¹¹³³ (Diu, et al., 2007) p.3

¹¹³⁴ (Finot, et al., 2009) p.556

de contrôle. La surface de ce volume est appelée une « **surface de contrôle** ». De la masse, de la chaleur, du travail et de la quantité de mouvement peuvent traverser la surface de contrôle.

Durant l'analyse le volume et la forme du volume de contrôle peuvent demeurer inchangés. [...] il n'existe pas de règles précises pour définir [un volume de contrôle]. Néanmoins, un volume de contrôle choisi de manière astucieuse peut simplifier considérablement l'analyse. » ¹¹³⁵

2010 :

« On appelle système thermodynamique, l'objet auquel on s'intéresse, il peut s'agir d'une quantité de matière donnée ou d'un volume contenant une quantité variable de matière. On ignore le fait qu'il soit constitué d'un grand nombre de constituants microscopiques, et on le caractérise par certaines grandeurs physiques [...] dont l'ensemble définit l'état du système [...] Tout ce qui n'appartient pas au système est appelé extérieur. Certains raisonnements demandent de considérer l'ensemble système+extérieur, qu'on appelle souvent l'Univers. » ¹¹³⁶

2011 :

« Un système thermodynamique est défini par le contenu matériel qui se trouve à l'intérieur d'une surface fermée. Il est dit fermé s'il n'échange pas de matière avec le milieu extérieur à la surface. Un tel système est donc constitué de particules matérielles identifiées » ¹¹³⁷

2013 :

« Un système est un ensemble de corps contenus à l'intérieur d'une surface fermée (réelle ou imaginaire) qui peut subir **une transformation** par suite d'interactions avec le milieu extérieur

Un système ouvert échange de la matière avec le milieu extérieur (un système fermé non). Un système isolé n'échange ni matière ni énergie avec le milieu extérieur

Un système est dans un état d'équilibre thermodynamique interne si ses variables d'état (pression P , volume V , température T dans le cadre de notre étude) sont parfaitement connues » ¹¹³⁸

« On appelle système thermodynamique tout système constitué d'un très grand nombre de particules microscopiques

¹¹³⁵ (Cengel, et al., 2009) pp.6-7

¹¹³⁶ (Taillet, 2010) p.11

¹¹³⁷ (Lagoutte, et al., 2011) p.683

¹¹³⁸ (Mauduit, 2013) p.50

Un échantillon de matière de taille macroscopique est un système thermodynamique. Un échantillon de matière de dimensions mésoscopiques est aussi un système thermodynamique. Choisir un système revient à partager le monde en deux : le système choisi et le reste de l'univers que l'on nomme extérieur.»¹¹³⁹

2. Ouvrages de Chimie

1991 :

« Système thermodynamique pour la réaction chimique : Nous définissons le système chimique, comme un ensemble de substances pouvant évoluer par des transformations appelées : réactions chimiques. »¹¹⁴⁰

1995 :

« Lors de tout raisonnement thermodynamique, on envisage le partage de l'espace en deux régions : le système et l'extérieur.

La frontière entre le système et l'extérieur peut être réelle ou fictive. Le choix du système est arbitraire, mais ce choix pourra rendre simple, compliqué ou même impossible, un calcul thermodynamique »¹¹⁴¹

1996 :

*« On appelle **système** un ensemble de corps délimité dans l'espace par une **surface fermée**. Ce qui n'est pas le système constitue le milieu extérieur. Il faut donc préciser si la surface fermée fait partie du système ou du milieu extérieur. Système et milieu extérieur forment ce que l'on appelle **l'Univers**.*

Une phase est une région de l'espace où toutes les grandeurs intensives sont des fonctions continues des coordonnées de l'espace.

Une grandeur intensive dont la valeur est indépendante du point considéré est dite uniforme ; ainsi, une phase où toutes les grandeurs intensives sont uniformes est une phase uniforme.

Un système qui n'est constitué que d'une seule phase est monophasé.

Un système monophasé dont toutes les grandeurs intensives sont uniformes est dit homogène. Un système monophasé dont une grandeur intensive au moins n'est pas uniforme est dit inhomogène.

Une phase est donc homogène ou inhomogène. Un système polyphasé est dit hétérogène.

¹¹³⁹ (Salamito, et al., 2013) p.812

¹¹⁴⁰ (Trouilhet, 1991) p.15

¹¹⁴¹ (Tuech, et al., 1995) p.10

On appelle *constituant*, *constituant chimique*, *espèce chimique* ou *corps*, une entité représentée par une formule chimique (atome, molécule, ion) ou un symbole chimique (électron, particule α , lacune dans un cristal, ...).

Un **constituant physico-chimique**, ou une **espèce physico-chimique**, est une espèce chimique donnée dans une phase donnée et, pour un solide ayant une structure cristalline donnée, sur un site cristallographique donné.

Un **système physico-chimique** est défini par la donnée des constituants physico-chimiques le composant. »¹¹⁴²

1997 :

« La thermodynamique s'applique à un ensemble matériel, le « **système** » éventuellement composé de parties distinctes, les « sous-systèmes ». Le système n'est défini que si l'on en précise les limites matérielles, les « **frontières** » et la nature des échanges qu'il peut entretenir avec le reste de l'univers (« l'extérieur ») il sera dit « fermé » ou « ouvert » selon que des échanges de matière sont, ou non possibles. Ses frontières peuvent s'opposer à des transformations.

Les contraintes, analogues à des frontières doivent également être précisées pour que soit décrit un « système » et les évolutions que l'on doit envisager ou exclure. »¹¹⁴³

1998 :

« Les raisonnements de la thermodynamique exigent souvent que l'on divise l'espace en deux parties : le système, généralement désigné par la lettre *S* et le milieu extérieur. Ceci suppose que l'on puisse définir une frontière ce qui est rarement aussi évident que l'on pourrait le penser à première vue.

On distingue essentiellement trois types de systèmes :

1. Les systèmes ouverts : ils peuvent échanger avec l'extérieur de la matière et de l'énergie (travail et chaleur)
2. Les systèmes fermés : ils ne peuvent échanger avec l'extérieur que de l'énergie mais ils ne reçoivent ni ne cèdent de la matière
3. Les systèmes isolés : ils ne peuvent rien échanger avec le milieu extérieur, ni matière ni énergie.

On distinguera également :

- les systèmes homogènes pour lesquels toutes les variables dites intensives (comme la température ou la pression) ou extensives réduites (comme la masse volumique) prennent la même valeur en tous points du système. Ceci implique que l'équilibre macroscopique est réalisé dans tout le volume

¹¹⁴² (Durupthy, et al., 1996) p.9

¹¹⁴³ (Vidal, 1997) pp.1-2

- les systèmes hétérogènes dans lesquels certaines variables prennent les valeurs différentes selon la portion d'espace considérée (par exemple l'air dans lequel on distingue les volutes de fumée de cigarette). Lorsque ces variations se produisent de manière brutale en tous points d'une même surface, celle-ci définit une frontière entre différentes parties du système que l'on pourra appeler sous-système.

Lorsqu'un système hétérogène peut être composé en un ensemble de plusieurs sous-systèmes, tous homogènes, on leur donne le nom de phases. Ainsi un système composé d'eau liquide et d'air en équilibre comporte deux phases : une phase liquide et une phase gazeuse (par extension, un système homogène ne comporte qu'une seule phase) »¹¹⁴⁴

« Un système est une partie bien définie de l'Univers, séparé de son environnement ou milieu extérieur par une paroi, matérialisée ou non. »¹¹⁴⁵

2000 :

« Nous entendons par système cette partie du monde que nous étudions et par milieu extérieur, tout le reste. »¹¹⁴⁶

2004 :

« Le système correspond à tout corps ou ensemble de corps inclus dans un domaine de l'espace délimité. Tout ce qui n'est pas le système est le milieu extérieur. Le système physico-chimique correspond à un ensemble de corps susceptibles d'évoluer au cours de réactions physiques ou chimiques. Dans un système physico-chimique **isolé**, il n'y a ni échange de matière, ni échange d'énergie avec le milieu extérieur. Dans un système physico-chimique **fermé**, il se produit une réorganisation de la matière, mais sans échange de matière avec le milieu extérieur. Par contre, il y a transfert d'énergie avec le milieu extérieur. Pour un système physico-chimique **ouvert**, il se produit à la fois des échanges de matière et des échanges d'énergie avec le milieu extérieur »¹¹⁴⁷

2011 :

« La thermodynamique s'applique aux objets macroscopiques, qui sont formés d'un grand nombre d'individus microscopiques appelés molécules.

Un système thermodynamique est une portion de l'univers limitée par des parois abstraites à définir avec précision. Ces parois ne s'opposent pas forcément à certains échanges avec

¹¹⁴⁴ (Gaboriaux, 1998) p.14

¹¹⁴⁵ (Perrot, 1998) p.18

¹¹⁴⁶ (McQuarrie, et al., 2000) p.811

¹¹⁴⁷ (Bach, et al., 2004) p.89

l'extérieur (appelé aussi environnement ou entourage). L'ensemble système + entourage est considéré comme formant un "super-système" isolé.

Un processus thermodynamique fait passer un système d'un état thermodynamique initial (1) à un état thermodynamique final (2). Les états intermédiaires ne sont pas forcément des états thermodynamiques. Si le processus fait revenir le système au point de départ c'est un cycle.

Lorsque les variables de tension responsables du transfert ont la même valeur pour le système et pour l'entourage, le système est en équilibre avec l'entourage. Lorsqu'un déséquilibre des variables de tension ne provoque aucun échange le système est en équilibre figé.

Le système peut être en équilibre figé avec l'extérieur pour certaines variables de tension (pression), et en équilibre véritable pour d'autres (température par exemple). Ces considérations s'appliquent aussi aux différentes parties d'un même système.

Par définition, les états thermodynamiques sont les états d'équilibre vrai ou d'équilibre figé. »¹¹⁴⁸

3. Ouvrages de Biologie

1991 :

« On appelle système, ou milieu intérieur, la portion de l'espace limitée par une surface réelle ou fictive, où se situe la matière étudiée. Le reste de l'univers est le milieu extérieur. La distinction entre système et milieu extérieur est largement arbitraire : le système est ce que l'observateur a choisi d'étudier.

[...] Un système thermodynamique, stricto sensu, est un système macroscopique, c'est-à-dire un système pour lequel le détail des caractéristiques microscopiques est inaccessible, et où l'on ne peut atteindre que des caractéristiques statistiques.

Remarque sur le milieu extérieur : Nous venons de voir que, pour que l'on puisse traiter d'un système, il fallait pouvoir y faire la mesure des valeurs prises par les variables thermodynamiques. Or nous avons défini le milieu extérieur d'un système comme étant le reste de l'univers, ce qui implique que ce milieu extérieur s'étende à l'infini. Comme on ne peut pas procéder à la mesure de l'ensemble des variables intensives à des distances infiniment lointaines, il s'ensuit qu'en toute rigueur le milieu extérieur n'est pas un système sur lequel on a le droit de raisonner ! On se tire de cette difficulté en admettant que, pour ce qui concerne les échanges d'un système avec l'extérieur, le milieu extérieur se comporte comme un réservoir limité au proche environnement du système. Mais la difficulté n'en est pas moins réelle. En particulier, lorsque nous en arriverons à étudier l'évolution des systèmes il faudra ne considérer que des systèmes finis. »¹¹⁴⁹

¹¹⁴⁸ (Chabanel, et al., 2011) p.15

¹¹⁴⁹ (Thellier, et al., 1991) p.12

2006 :

« Un **système thermodynamique** est une portion d'espace, une portion de l'univers, qui contient la matière que l'on veut étudier. Ce qui est extérieur au système constitue son environnement. Le système est séparé de son environnement par une surface limitée réelle ou fictive. On voit que la définition du système est tout à fait arbitraire et qu'un organisme, une cellule vivante ou même un ensemble de réactifs ou produits, peut constituer un système thermodynamique.

Tout système est composé d'un grand nombre d'éléments (atomes, molécules) présentant des caractéristiques microscopiques (nombre, position, vitesse, etc...) auxquelles il est souvent difficile ou impossible d'accéder et possède des caractéristiques macroscopiques qui correspondent au comportement statistique de ses éléments constitutifs.

L'approche thermodynamique est une approche macroscopique, ce qui lui confère une grande puissance puisqu'elle permet d'étudier des systèmes en ignorant leurs caractéristiques microscopiques. Par exemple il est possible de mesurer la température d'un organisme (caractère macroscopique) qui dépend de l'agitation moléculaire sans connaître la vitesse de chacune des molécules qui le constituent.

Les transformations qui s'effectuent dans un système peuvent ou non donner lieu à des échanges avec l'environnement et on distingue les **systèmes isolés** qui ont une limite empêchant tout échange avec l'environnement, les **systèmes fermés** qui échangent de l'énergie mais non de la matière avec l'environnement et les **systèmes ouverts**, qui peuvent réaliser à la fois des échanges de matière et d'énergie.

Les systèmes biologiques qui nous intéressent ici sont des systèmes ouverts. C'est important car un système isolé ou fermé évolue spontanément vers un état d'équilibre dans lequel aucune transformation ne peut avoir lieu. **Les systèmes biologiques, systèmes ouverts qui échangent avec leur environnement de l'énergie et de la matière peuvent évoluer et se maintenir loin de l'état d'équilibre.**

En effet si les échanges avec l'environnement permettent de renouveler les composés qui disparaissent d'un système et d'exporter les composés qui y apparaissent, le système restera dans un état stationnaire maintenu loin de l'état d'équilibre, on dira qu'il est dans un état stationnaire de non équilibre. »¹¹⁵⁰

¹¹⁵⁰ (Bernard, et al., 2006) p.144

2009 :

« Un système thermodynamique désigne la partie de l'univers que l'on étudie. Le reste de l'univers est le milieu extérieur ou environnement. Un système peut être de taille diverse, un secteur cellulaire, une cellule, un organisme... »¹¹⁵¹

¹¹⁵¹ (Peycru, 2009) p.211

II. ANNEXE N°2 : SUJET ET CORRIGES DU CONCOURS CCP 2005

1. Sujet du concours

On étudie la compression réversible d'un gaz dans un compresseur parfaitement calorifugé. Il s'agit de prélever du gaz situé dans un réservoir R_1 , de grandes dimensions, maintenu à la pression P_1 et à la température T_1 constantes, de le comprimer, puis de le refouler dans un second réservoir R_2 , lui aussi de grandes dimensions, maintenu à P_2 et T_2 constantes (figure 3). Le gaz est parfait, de masse molaire M et de caractéristique énergétique $\gamma = c_{p,m} / c_{v,m}$ (rapport des coefficients thermiques molaires, respectivement isobare et isochore) constante. La transformation s'effectue en trois étapes :

(I) Étape d'admission

La soupape d'admission S_1 est ouverte, et la soupape de refoulement S_2 est fermée. Le piston Π est initialement au fond du cylindre (position extrême A) : le volume interne V_i du cylindre est alors considéré comme nul (volume résiduel). Par déplacement du piston, une masse m de gaz, initialement stockée dans le réservoir R_1 , est aspirée dans le cylindre à pression P_1 et température T_1 constantes. Lorsque Π est en bout de course (position extrême B), le volume interne du cylindre est $V_i = V_1$.

(II) Étape de compression

Les deux soupapes sont fermées. La masse m de gaz est alors comprimée, par déplacement du piston, de l'état (P_1, V_1, T_1) à l'état (P_2, V_2, T_2) , avec $0 < V_2 < V_1$.

(III) Étape de refoulement

La soupape S_1 reste fermée, mais la soupape S_2 s'ouvre. Le gaz est refoulé à P_2 et T_2 constantes, dans le second réservoir R_2 . Le piston Π se retrouve finalement dans sa position A initiale.

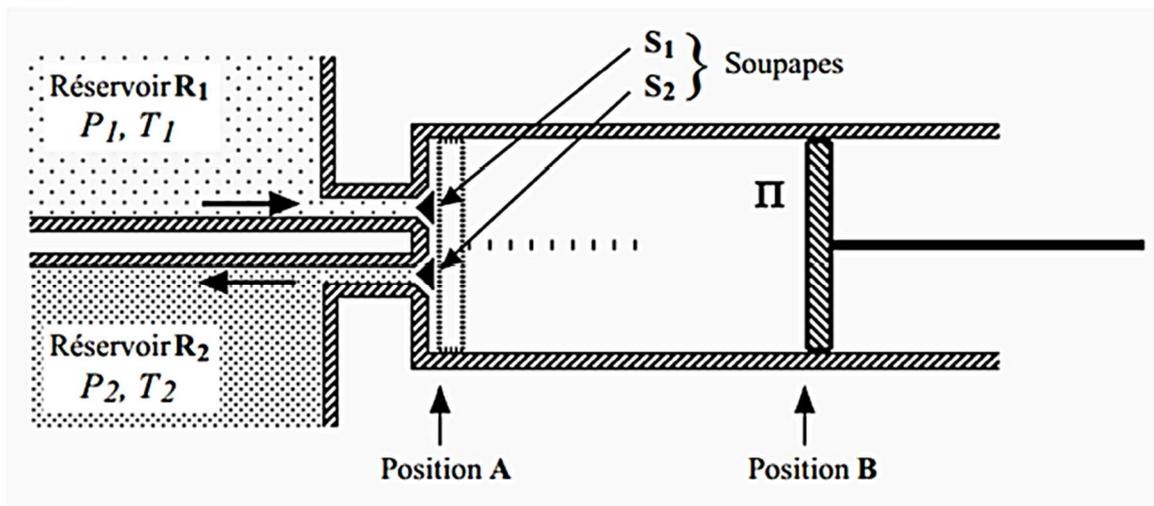


Figure 3

- 1) Préciser la nature de la transformation **(II)** subie par la masse m de gaz.
- 2) Représenter les trois étapes de fonctionnement du compresseur dans un diagramme donnant la pression intérieure P_i en fonction du volume intérieur V_i du cylindre.
- 3) Déterminer le travail reçu par la masse m de gaz **au niveau du piston**, au cours de chacune des trois étapes, pour un aller-retour de la paroi mobile **II**.
- 4) Faire apparaître, sur le diagramme de la question I.2, la représentation graphique du travail total de compression reçu par la masse m , au niveau de la paroi mobile.
- 5) Donner l'expression du travail massique w reçu, au niveau du piston, par l'unité de masse du fluide ayant transité dans le compresseur.
- 6) Montrer que ce travail w représente la variation d'une fonction d'état massique du fluide entre les états (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .

2. Correction n°1¹¹⁵²



MP – Physique-chimie. Devoir surveillé

DS n°4-2 : samedi 1er décembre 2007 (2 heures)

Deuxième problème : thermodynamique

Extrait du concours commun polytechnique (concours national Deug 2005)

Partie B : Thermodynamique

I. Étude énergétique des transformations

1) Nature de la transformation II :

Le compresseur étant parfaitement calorifugé, la compression (II) est donc adiabatique. De plus, la compression est décrite comme réversible. Il s'agit donc d'une compression adiabatique réversible ou encore, cela revient au même, isentropique.

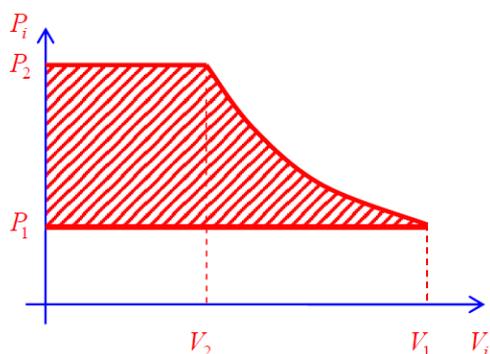
2) Diagramme (V_i, P_i).

Étape (I). L'admission se fait à pression constante.
 $P_i = P_1$ et V_i varie de 0 à V_1

Étape (II). La compression adiabatique réversible suit la loi de Laplace : $P_i V_i^\gamma = P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$.

Application numérique : $\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 0,46$

Étape (III). Le refoulement se fait à pression constante $P_i = P_2$ et V_i varie de V_2 à 0.



3) Travail reçu au niveau du piston.

Étape (I). $W_I = -P_1 V_1 = -\frac{m}{M} RT_1$. C'est le gaz qui travaille pour refouler l'atmosphère, de l'autre côté du piston.

Étape (II). La transformation étant adiabatique, il n'y a pas de transfert thermique et donc le premier principe de la thermodynamique appliqué à cette étape s'écrit :

$$W_{II} = \Delta U = \frac{m}{M} c_{v,m} (T_2 - T_1) = \frac{m}{M} \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1).$$

Étape (III). $W_{III} = +P_2 V_2 = +\frac{m}{M} RT_2$. Cette fois c'est le gaz qui est refoulé et reçoit un travail positif.

¹¹⁵² (Le Hir, 2007) pp. 1-2

4) Représentation graphique du travail

$W = W_I + W_{II} + W_{III}$. Ce travail reçu, positif, correspond à l'aire hachurée sur le diagramme de la question 2.

5) Travail massique w reçu

$$w = \frac{W}{m} = \frac{W_I + W_{II} + W_{III}}{m} = \frac{R}{M}(T_2 - T_1) + \frac{c_{v,m}}{M}(T_2 - T_1) = \frac{R + c_{v,m}}{M}(T_2 - T_1)$$

6) Montrer que w représente la variation d'une fonction d'état.

Le gaz parfait obéit à la relation de Mayer $c_{p,m} - c_{v,m} = R$ et le travail massique s'écrit donc :

Jean Le Hir, 7 décembre 2007

Page 1 sur 2

LYCÉE DE KERICHEN

MP-Physique-chimie

Devoir surveillé n°4 -2

$$w = \frac{c_{p,m}}{M}(T_2 - T_1) = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)M}(T_2 - T_1) = \Delta h$$

Le travail massique w reçu par le gaz dans cette transformation s'identifie à la variation d'enthalpie massique du gaz.

3. Correction n°2¹¹⁵³

EPREUVE 2005 – PARTIE B

B THERMODYNAMIQUE

Attention à l'énoncé.

Il est demandé de s'intéresser et d'étudier comme système la masse m de gaz qui est contenu dans le cylindre quand celui-ci est en position de butée maximale. Ce qui signifie que l'énoncé indique qu'il faut étudier le système fermé composé par les $n = m/M$ molécules de gaz, initialement dans le réservoir 1, et qui, à la fin de l'étape I, sont dans le cylindre et occupe un volume $V_i = V_1$ à une pression P_1 et une température T_1 . A la fin de la transformation II, ce système fermé occupe un volume V_2 , à une pression P_2 et une température T_2 .

Ce système fermé occupe, dans le réservoir 1, avant la transformation I, un volume V défini par :

$$P_1 V = \frac{m}{M} R T_1$$

Après la transformation I, ce système occupe le volume V_1 , qui vérifie la loi des gaz parfaits dans le cylindre. Soit, puisque la température et la pression sont constantes :

$$P_1 V_1 = \frac{m}{M} R T_1 \text{ donc } V = V_1$$

Ce qui signifie que lors de la transformation I, le système fermé passe de l'état P_1, V_1, T_1 à l'état P_1, V_1, T_1 . Il ne change donc pas d'état. Il n'y a pas de transformation !! L'étape I n'est pas une transformation pour le système fermé.

Il en est de même pour l'étape III. Seule l'étape II est une réelle transformation qui modifie l'état du gaz. Dans ce problème, sauf pour la question II, nous étudierons le système fermé ainsi défini.

Il s'agit d'être vigilant sur le système étudié. En effet, l'énoncé ne le définit jamais clairement et propose comme variable d'étude le volume du cylindre, lorsque le piston s'y déplace. Ce volume n'est pas le volume du système fermé (sauf quand le piston est en butée arrière) mais définit le volume d'un système ouvert qui est la quantité de gaz contenu, à un instant quelconque dans le cylindre. Ces deux systèmes sont fondamentalement différents.

I. Etude énergétique des transformations

I.1. L'énoncé stipule que la compression du gaz est **réversible**. On s'intéresse au système fermé défini précédemment. La transformation II est donc **réversible** et **adiabatique** (le piston est calorifugé : pas d'échange de chaleur avec l'extérieur). La transformation II est donc une transformation qui suit la loi de **Laplace** :

$$P.T^{\left(\frac{\gamma}{1-\gamma}\right)} = \text{constante sur la transformation II.}$$

¹¹⁵³ (Micolau, 2005) pp.39-42

I.2. La figure 2005.6 schématise la transformation du gaz dans ses trois étapes I,II,III en fonction du **volume du cylindre** et non du volume du système fermé étudié.

L'étape I se fait à pression constante P_1 . L'étape II suit la loi de Laplace (PV^γ constant). L'étape III se fait à pression

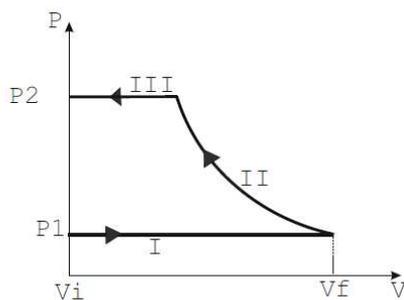


FIG. 2005.6 – Diagramme $P - V_i$ du compresseur

constante P_2 . Il faut noter que seulement pendant l'étape II, le volume du cylindre correspond au volume du système fermé.

La figure 2005.7 représente la transformation **pour le système fermé**. Les Etapes I et III apparaissent sous forme de

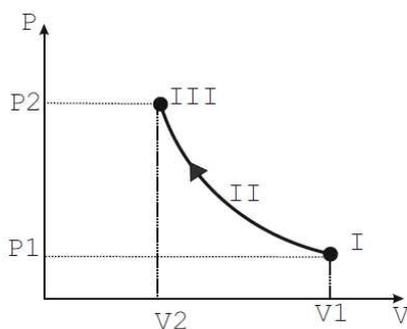


FIG. 2005.7 – Diagramme $P - V$ du système fermé

points puisque pendant ces étapes, ce système ne subit pas de transformation.

I.3. Attention ici aux termes de l'énoncé. La convention académique en thermodynamique est de spécifier le système étudié et d'analyser les échanges d'énergie du système avec l'extérieur. Les quantités sont **analytiques** (elles peuvent être positives ou négatives). On parle de travail ou de chaleur **échangés** par le système avec son extérieur. Ces quantités seront comptées positivement si elles sont **reçues** par le système et négativement si elles sont **cédées** par le système. Dans le cas de la transformation I, le travail échangé peut être **négatif** - ce qui signifie qu'il est **cédé** par le système gaz. Nous allons donc étudier le travail **échangé** par le gaz de masse m au cours des trois transformations et non le travail reçu.

Lors d'une transformation infinitésimale **quelconque**, le travail infinitésimal δW , des forces de pression, échangé par le gaz est :

$$\delta W = -P_{\text{ext}}dV \text{ où } P_{\text{ext}} \text{ est la pression extérieure}$$

Dans le cas d'une transformation réversible, le gaz est à l'**équilibre** en tout point de la transformation. Alors, $P_{\text{ext}} = P$. Il vient pour ce type de transformation :

$$\delta W = -PdV$$

Le travail échangé W pendant une transformation **macroscopique** où le volume initial du gaz est V^{ini} et le volume final V^{fin} est :

$$W = - \int_{V^{\text{ini}}}^{V^{\text{fin}}} PdV$$

Nous allons utiliser cette relation pour les trois transformations :

- étape I : La pression du gaz est constante et vaut P_1 , donc :

$$W_I = -P_1 (V^{\text{fin}} - V^{\text{ini}})$$

Il reste à déterminer V^{fin} et V^{ini} . V^{ini} est le volume occupé par une masse m de gaz parfait (soit m/M moles) à la pression P_1 et température T_1 . V^{fin} est le volume occupé par la même masse m dans les mêmes conditions de pression et température. donc :

$$V^{\text{fin}} = V^{\text{ini}} = \frac{mRT_1}{MP_1}$$

D'où

$$W_I = 0$$

- étape II : Pour une transformation de gaz parfait, la variation d'énergie interne ne dépend que de la variation de température, soit ici :

$$\Delta U = mC_v\Delta T = mC_v(T_2 - T_1)$$

où C_v est la capacité calorifique massique du gaz parfait à volume constant.

D'autre part

$$\Delta U = Q + W = W \text{ car la transformation est adiabatique}$$

Soit

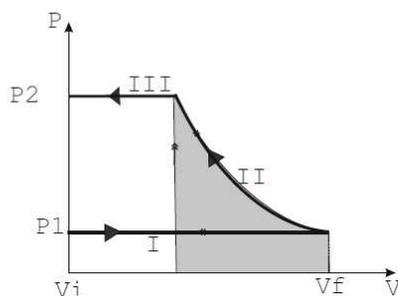
$$W_{II} = \frac{m}{M}c_{v,m}(T_2 - T_1)$$

- étape III : On a le même type de transformation que l'étape I. Il vient donc :

$$W_{III} = W_I = 0$$

I.4. W_{II} est l'intégrale $\int -PdV$. Graphiquement, il est donc représenté, dans le diagramme $P - V$, par l'aire limitée par la courbe représentative $P(V)$ pour la transformation II et les deux segments verticaux où le volume V correspond aux volumes de début et de fin de la transformation II. Cette aire algébrique est représentée sur la figure 2005.8.

L'aire grisée correspond à la valeur algébrique du travail, si on parcourt le volume dans le sens des doubles flèches (à



cause du signe '-' dans l'expression du travail).

Le travail total échangé pendant la compression est représenté par l'aire contenue dans les trois courbes représentatives des trois transformations. Puisque $W_I = W_{III} = 0$, le travail total échangé est donc le travail échangé (reçu) lors de l'étape II.

I.5. Par unité de masse, en utilisant le résultat de la question 3, le travail total échangé est :

$$w = \frac{W_I + W_{II} + W_{III}}{m} = \frac{W_{II}}{m} = \frac{c_{v,m}}{M} (T_2 - T_1)$$

I.6. Comme indiqué à la question 3, cette expression n'est rien d'autre que la variation d'énergie interne Δu massique de la masse de gaz m passant de R_1 à R_2 . Soit :

$$\Delta u = w = \frac{c_{v,m}}{M} (T_2 - T_1)$$

III. ANNEXE N°3 : DEFINITION DE LA NOTION DE « CHALEUR »

Cette annexe regroupe les définitions de chaleur présentes dans les 49 ouvrages sur les 61 consultés pour réaliser l'étude du chapitre 8. Il s'agit d'ouvrages de physique (40 ouvrages), de chimie (7), de biologie (1) mais aussi un ouvrage de génie industriel (1). Sous le libellé « chaleur » nous désignons l'ensemble des termes s'y rapportant, comme quantité de chaleur, transfert de chaleur, transfert calorifique, transfert thermique *etc.*

1. L'introduction via le gradient de température

« *Expérimentalement, si nous mettons en contact deux corps de température différente, le corps chaud cède de la chaleur au corps froid qui le reçoit ; il y a échange de chaleur.* »¹¹⁵⁴

« *La chaleur est un transfert d'énergie résultant d'une différence de température entre le système et son environnement.* »¹¹⁵⁵

« *Le terme "chaleur" doit être plutôt considéré comme la description d'un processus que comme le nom d'une forme d'énergie. En particulier, on dit que l'énergie est transférée sous forme de chaleur entre un système et son milieu extérieur si le transfert d'énergie provient d'une différence de température entre eux.* »¹¹⁵⁶

« *La notion chaleur est définie par la thermodynamique comme étant une grandeur de parcours représentant une forme transitoire d'énergie qui se propage à la suite d'une différence de température soit :*

- *entre deux parties d'un système quelconque ;*
- *entre le système et son environnement ;*
- *entre deux systèmes séparés par un milieu matériel ou pas (vide).* »¹¹⁵⁷

« *On appelle chaleur la forme d'énergie qui est transmise, à travers les limites d'un système ayant une température donnée, vers un autre système (ou vers le milieu ambiant) ayant une*

¹¹⁵⁴ (Bachelier, et al., 1991) p.41

¹¹⁵⁵ (Atkins, 1998a) p.37

¹¹⁵⁶ (Atkins, 1998b) p.31

¹¹⁵⁷ (Bianchi, et al., 2004) p.1

température plus basse et ce, en raison de la différence de température existant entre les deux systèmes. »¹¹⁵⁸

« Il existe deux formes de transfert d'énergie pour un système :

– un transfert thermique Q par contact avec un corps de température différente de celle du système ;

– un transfert par un travail W mesurable directement fourni au système. »¹¹⁵⁹

« Si deux systèmes, à deux températures différentes, sont mis en contact, les chocs permettent un transfert d'énergie d'un système à l'autre jusqu'à ce que l'agitation soit en moyenne la même dans les deux systèmes. L'énergie transférée est appelée CHALEUR. Quand il n'y a plus de transfert, les deux températures sont égales et les systèmes sont en équilibre thermique. »¹¹⁶⁰

« Un échange de chaleur est un transfert d'énergie à l'échelle microscopique. Si l'interaction entre deux systèmes se traduit par un changement de température à l'exclusion de tout changement des autres variables macroscopiques, on dit qu'il y a échange d'une quantité de chaleur Q . Cet échange cesse lorsque l'on a atteint l'équilibre thermique et les températures sont alors égales. »¹¹⁶¹

« On distingue deux formes d'énergie qu'un système peut échanger avec l'extérieur : énergie thermique ou chaleur et travail. Quand on met en contact deux solides de même nature initialement à des températures différentes, le solide le plus chaud se refroidit tandis que le solide le plus froid se réchauffe ; on dit qu'il y a transfert de chaleur du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Le transfert de chaleur cesse quand les deux corps sont en équilibre thermique. »¹¹⁶²

« La chaleur est une forme d'énergie connectée à un changement de température d'un système. »¹¹⁶³

2. L'introduction via le travail macroscopique

¹¹⁵⁸ (Wylen, et al., 1992) p.75

¹¹⁵⁹ (Brébec, et al., 2010) p.228

¹¹⁶⁰ (Belorizki, et al., 1992) p.58

¹¹⁶¹ (Ngô, et al., 2008) p.4

¹¹⁶² (Gendreau, 1990) p.33

¹¹⁶³ (Stöker, et al., 1999) p.678

« Le travail, en thermodynamique (contrairement à la mécanique), ne suffit pas à décrire tous les échanges d'énergie possibles entre un système et son environnement. Par définition, le "reste" sera dénommé chaleur. »¹¹⁶⁴

« Un transfert énergétique qui ne peut être mis sous la forme d'un travail est appelé transfert d'énergie thermique ou chaleur. »¹¹⁶⁵

« La notion de chaleur est une notion intuitive très ancienne. Le contenu essentiellement nouveau que le premier principe a apporté a été de reconnaître comme un échange d'énergie le phénomène observé lorsque l'on chauffe un corps sans qu'il change de volume. »¹¹⁶⁶

« Tout échange qui ne répond pas à la définition du travail est un échange de chaleur. »¹¹⁶⁷

« Une interaction entre deux systèmes fermés n'échangeant pas de travail est dite purement calorifique lorsque les deux systèmes, initialement isolés et dans un état d'équilibre stable sont mis en contact, l'ensemble restant isolé durant l'interaction. L'énergie échangée entre les deux systèmes est alors appelée chaleur. Le concept de chaleur découle de l'existence d'échanges qui ne répondent pas à la définition du travail. »¹¹⁶⁸

« On appelle transfert thermique reçu (algébriquement) par le système thermodynamique Σ tout transfert énergétique qui n'est pas un transfert de travail, soit sous forme finie ou infinitésimale :

$$Q = W_{nc} - W \quad \delta Q = \delta W_{nc} - \delta W \quad \text{»}^{1169}$$

« L'expérience montre que l'on peut transformer un système autrement qu'en échangeant du travail : en plaçant une casserole d'eau froide sur une flamme on observe de façon évidente que sa température s'élève au cours du temps. Cet apport d'énergie est appelé chaleur. »¹¹⁷⁰

« Les autres effets non réductibles à un travail seront liés à ce que l'on appellera d'une façon générale le flux de chaleur. »¹¹⁷¹

« La chaleur notée Q : C'est une forme d'énergie échangée autre que le travail. »¹¹⁷²

« Si on plonge une bouteille d'eau à 300 K dans une bassine d'eau chaude à 350 K, la température de l'eau de la bouteille augmente. Il n'y a pourtant aucun travail échangé puisque

¹¹⁶⁴ (Hulin, et al., 1994) p.23

¹¹⁶⁵ (Balou, et al., 2004) p. 106

¹¹⁶⁶ (Lemarchand, et al., 1999) p.28

¹¹⁶⁷ (Perrot, 1998) p.19

¹¹⁶⁸ (Perrot, 1994) p.28

¹¹⁶⁹ (Roux, et al., 1998) p.114

¹¹⁷⁰ (Taillet, 2010) p.27

¹¹⁷¹ (Dudeck, 1993)pp. 24-25

¹¹⁷² (Mseddi, et al., 1993) p.103

les systèmes sont immobiles. Cela prouve qu'il existe une autre forme d'énergie que le travail mécanique : on appelle cet échange d'énergie le transfert thermique (noté Q). »¹¹⁷³

« Le transfert thermique Q , ou transfert de chaleur, correspond à l'énergie échangée non comptabilisée dans le travail W . Ce transfert est dû aux interactions microscopiques qui modifient l'agitation désordonnée des particules. »¹¹⁷⁴

« L'air a donc reçu de l'extérieur de l'énergie, sans que les forces de pression aient travaillé puisque leurs points d'application ne sont pas déplacés. Un tel transfert d'énergie est appelé chaleur ou mieux transfert thermique et noté Q »¹¹⁷⁵

3. La référence au premier principe

« On appelle chaleur la différence entre la variation d'énergie totale entre deux instants et le travail des forces extérieures. La chaleur sera notée Q : $Q = \Delta E - W$ »¹¹⁷⁶

« Lorsqu'un système évolue d'un état initial à un état final, la chaleur reçue est la différence entre l'accroissement de son énergie totale et le travail reçu autre que celui des forces extérieures fonction d'état du système. $Q = \Delta E - (W + W_p)$ Par cette définition, la chaleur est introduite de façon précise, sans faire appel à aucune notion intuitive ou expérimentale. Elle est un corollaire du premier principe. »¹¹⁷⁷

« On appelle "chaleur" cette énergie reçue qui n'est ni du travail W ni de l'énergie chimique W' : $Q = \Delta U - W - W'$. Cette définition ne présente aucune équivoque. Elle résulte du principe général de conservation de l'énergie. »¹¹⁷⁸

« La chaleur est une forme d'énergie au même titre que le travail mécanique (19^{ème} siècle : expérience de Joule Mayer conduisant à $1 \text{ cal} = 4.18 \text{ joules}$). – La définition générale correspond au 1^{er} principe : $Q = \Delta U - W$ et $\delta Q = dU - \delta W$ »¹¹⁷⁹

« On appelle chaleur reçue par le système, ou transfert thermique, la différence entre la variation d'énergie interne microscopique et le travail algébriquement reçu" : $Q = \Delta U - W$ »¹¹⁸⁰

« La chaleur est précisément l'échange d'énergie qu'il faut ajouter au travail reçu pour obtenir l'échange total d'énergie. On a : $Q \equiv E^r - W$. Ainsi définie, la chaleur, comme le travail

¹¹⁷³ (Sanz, et al., 2002) p.829

¹¹⁷⁴ (Brébec, et al., 1995) p.108

¹¹⁷⁵ (Gié, et al., 1996) p.133

¹¹⁷⁶ (Lorenceau, et al., 2003) p.25

¹¹⁷⁷ (Cheze, et al., 2011) p.65

¹¹⁷⁸ (Diu, et al., 2007) pp. 64-65

¹¹⁷⁹ (Grécias, 1995) p.50

¹¹⁸⁰ (Le Hir, 1999) p.74

n'est pas une énergie mais un transfert d'énergie. C'est finalement un transfert d'énergie interne ; en l'absence de convection et de rayonnement c'est une diffusion d'énergie. »¹¹⁸¹

« L'expérience montre que de l'énergie peut être aussi échangée lorsque le travail reçu est nul. Ce transfert d'énergie, est appelé chaleur. La chaleur est donc l'échange d'énergie qu'il faut ajouter au travail reçu pour obtenir l'échange totale d'énergie : $Q \equiv E^r - W$ »¹¹⁸²

« La dernière forme du principe de l'état initial et de l'état final donne la définition théorique du transfert thermique, ou chaleur. En effet : $W + Q = U(B) - U(A)$. Donc : $Q = U(B) - U(A) - W$. Cette relation définit la chaleur au moyen d'un lien entre des phénomènes se produisant à l'échelle microscopique et des phénomènes se produisant à l'échelle macroscopique. »¹¹⁸³

« D'après le 1^{er} principe de la thermodynamique il ne peut y avoir création d'énergie. Ceci s'écrit pour un système fermé subissant une transformation quelconque $dU^i = \delta Q^i + \delta E_{tot}^i$. Au second membre de cette équation figurent le travail total reçu par le système, δE_{tot}^i , et la chaleur reçue par le système, δQ^i [... qui] peut en thermodynamique phénoménologique être considérée comme une définition de la chaleur reçue. »¹¹⁸⁴

« Axiomatiquement Le premier principe nous permet de définir la quantité de chaleur reçue par un système comme le transfert d'énergie qui ne se fait pas sous forme de travail. Mathématiquement $Q = \Delta U - W$. Et c'est en fait essentiellement à partir de cette formulation que l'on introduit actuellement en thermochimie et en thermique la grandeur " quantité de chaleur ". »¹¹⁸⁵

« On rencontre des transformations sans échange de travail tout en observant une variation d'énergie du système ; le 1^{er} principe nous amène à introduire une autre forme d'énergie échangée : la chaleur. D'où la traduction du 1^{er} principe sous la forme : $\Delta E_{totale} = W + Q$; W travail reçu par le système ; Q quantité de chaleur reçue par le système. »¹¹⁸⁶

« Ce système n'est pas adiabatique mais seulement fermé, il se peut que la relation $U = W$ ne soit pas vérifiée. Dans ce cas, il y a un transfert d'énergie à travers la paroi conductrice. La grandeur qui correspond à ce transfert d'énergie est appelée énergie-chaleur. Sa mesure est

¹¹⁸¹ (Pérez, 1997) p.87

¹¹⁸² (Pérez, et al., 1996) p.100

¹¹⁸³ (Queyrel, et al., 1996) p.102

¹¹⁸⁴ (Thellier, et al., 1991) p.38

¹¹⁸⁵ (Lhuillier, et al., 1994) pp.90-91

¹¹⁸⁶ (Odermatt, 1991) pp.67-68

donnée par la différence entre la variation d'énergie interne et l'énergie-travail mise en jeu, c'est-à-dire par la relation : $Q = \Delta U - W$. »¹¹⁸⁷

« Le système est macroscopiquement au repos et peut échanger de l'énergie avec le milieu extérieur sous forme de travail mais aussi de chaleur. L'accroissement de l'énergie interne au cours d'une transformation infinitésimale s'exprime de façon générale par : $\Delta U = W^{\text{éch}} + Q^{\text{éch}}$. La contribution à la modification de l'énergie interne a été établie, l'équation suivante constitue la définition de la quantité de chaleur échangée : $Q^{\text{éch}} = \Delta U - W^{\text{éch}}$. »¹¹⁸⁸

« L'énergie totale $E_{\text{totale}} = E_m + U$ (E_m = énergie mécanique, U = énergie interne) de la règle a cette fois diminué bien qu'il n'y ait eu aucun travail échangé avec l'extérieur. Il faut donc, en plus du travail des forces extérieures, ajouter un terme de transfert énergétique « invisible ». On l'appelle transfert thermique noté Q . »¹¹⁸⁹

« Ayant dans un premier temps identifié la quantité de travail W , cette relation ($\Delta U = W + Q$) fournit une définition quantitative de la quantité de chaleur Q : $Q = \Delta U - W$ »¹¹⁹⁰

4. La référence au microscopique

a. Ordre et désordre

« La chaleur Q rend compte de l'énergie microscopique transférée au système entre deux états E_1 et E_2 . On peut néanmoins s'en faire une représentation en la reliant au " désordre " microscopique : un transfert de chaleur correspond à une variation de ce désordre qui peut résulter soit d'un échange d'énergie désordonnée (énergie cinétique microscopique), soit d'une transformation d'énergie ordonnée (énergie cinétique macroscopique) en énergie désordonnée. Il est directement lié à la température. »¹¹⁹¹

« ... en plongeant le verre contenant l'eau froide à la température T_0 dans un thermostat, réserve d'un liquide chaud maintenu à une température constante $T_0 > T_1$. Les molécules du liquide thermostatique sont plus agitées que celles de l'eau froide. Certaines d'entre elles vont entrer en collision avec les molécules de la paroi du verre et leur céder alors une partie de leur énergie. Ces dernières transmettent à leur tour de l'énergie aux molécules d'eau froide en contact direct avec la paroi du verre. Les molécules d'eau ainsi excitées échangent une partie de leur

¹¹⁸⁷ (Borel, et al., 2011) p.16

¹¹⁸⁸ (Pullicino, 2007) p.67

¹¹⁸⁹ (Ménétrie, et al., 2003)p.90

¹¹⁹⁰ (Coulon, et al., 1997) p.120

¹¹⁹¹ (Watzky, 2007) p.69

énergie avec leurs voisines. C'est ce transfert particulier d'énergie de proche en proche, par suite des collisions entre les molécules, que l'on nomme transfert de chaleur par conduction. »¹¹⁹²

« Mais qu'est-ce alors que la chaleur ? Dans la version classique du mouvement des particules, il s'agit d'une forme désordonnée d'énergie cinétique. Les molécules sont animées d'un mouvement incessant et entrent en collision, ce qui redistribue leur énergie cinétique. »¹¹⁹³

« A l'échelle moléculaire, un flux d'énergie vers l'extérieur se produit lorsque la chaleur exalte l'agitation moléculaire chaotique des molécules proches du système. Ces molécules qui se déplacent rapidement entrent en collision avec d'autres molécules et leur communiquent leurs énergies excédentaires. L'agitation moléculaire aléatoire est appelé agitation thermique, et nous pouvons dire que la chaleur exalte l'agitation thermique des molécules du milieu extérieur. Lorsque nous disons que l'énergie passe d'une région à haute température à une région de basse température, nous disons que l'énergie passe d'une région où l'agitation thermique est faible. La chaleur stimule l'agitation moléculaire. »¹¹⁹⁴

« Soulignons ici que la température est la variable d'état qui régit les échanges entre deux systèmes, sous forme de chaleur. Ces échanges d'énergie ont lieu à l'occasion de collisions entre les molécules qui possèdent de l'énergie cinétique et non pas du fait de l'existence d'un fluide mystérieux qui serait la chaleur. »¹¹⁹⁵

« De l'énergie peut être transférée d'un système à un autre sans variation apparente, macroscopique, d'un paramètre externe. Ce type de transfert est associé à l'agitation permanente, désordonnée, des molécules de tout système, appelée agitation thermique. Cette agitation, se communiquant de proche en proche, transporte de l'énergie ; c'est cette forme particulière de transport d'énergie que l'on nomme transfert thermique ; la quantité d'énergie ainsi transférée est communément appelée chaleur. »¹¹⁹⁶

« La chaleur Q est un transfert d'énergie ayant pour conséquence de modifier l'agitation microscopique des molécules du système, autrement dit son énergie interne (transfert thermique). »¹¹⁹⁷

« Pour un système fermé, cet échange d'énergie se présente sous deux formes :
- le travail dû aux forces extérieures qui s'exercent sur le système ;

¹¹⁹² (Foussard, et al., 2009) p. 36

¹¹⁹³ (Kondepudi, et al., 1999) pp.34-35

¹¹⁹⁴ (Atkins, et al., 1998) p.183

¹¹⁹⁵ (Rouquérol, et al., 2007) p.256

¹¹⁹⁶ (Faroux, et al., 2002) p.16

¹¹⁹⁷ (Gautron, et al., 2010) p.155

-la chaleur, échange d'énergie de type microscopique»¹¹⁹⁸. Pour la chaleur, le transfert d'énergie aux molécules se fait par choc et de façon désordonnée. »¹¹⁹⁹

b. Travail microscopique

« [un système fermé] échange de l'énergie au cours d'une transformation d'un état A à un état B. Ce transfert d'énergie peut se faire sous deux formes : - le travail W des forces de pression macroscopiques s'exerçant au niveau de la surface délimitant le système (pour un système fluide soumis aux seules forces pressantes) – le transfert thermique Q au niveau des interactions microscopiques dans la zone de contact »¹²⁰⁰

« Les travaux des forces extérieures non conservatives sont classés en deux catégories :

- Le travail de celles entraînant un mouvement macroscopique (déplacement, déformation, etc.) est appelé travail tout court et noté W .

- Le travail de celles n'entraînant aucun effet mécanique macroscopique est appelé transfert thermique et noté Q . »¹²⁰¹

« Au niveau de l'angström, il y a des fluctuations énormes de la pression. Pour calculer le travail réel, il faudrait faire la somme, sur des petites portions de paroi, de forces très différents à l'échelle moléculaire, et ce sur l'ensemble du piston. Mais en fait on fait la moyenne des forces sur tout le piston, que l'on appelle la pression ; on calcule la valeur moyenne des déplacements des molécules.

Mais, on a $\langle Fx \rangle \neq \langle F \rangle \langle x \rangle$ et $\langle Fx \rangle = \sum_i F_i x_i = \text{variation d'énergie}$. Or, on a la relation :

$$\underbrace{\langle Fx \rangle}_{\text{variation d'énergie}} = \underbrace{\langle F \rangle \langle x \rangle}_{\text{travail échangé}} + \underbrace{\langle (F - \langle F \rangle)(x - \langle x \rangle) \rangle}_{\text{transfert calorifique}}$$

On peut aussi parler de « transfert calorifique » ou de « transfert thermique. » »¹²⁰²

« Soit un système microscopique de vitesse \vec{V} soumis de la part du milieu extérieur à une force \vec{F} . La vitesse \vec{V} et la force \vec{F} fluctuent respectivement autour des valeurs moyennes \vec{V}_m et \vec{F}_m , seules grandeurs mesurables à l'échelle macroscopique. En notant \vec{v} et \vec{f} les fluctuations de la vitesse et de la force autour des valeurs moyennes, on écrira $\vec{V} = \vec{V}_m + \vec{v}$ et $\vec{F} = \vec{F}_m + \vec{f}$. Les grandeurs moyennes \vec{V}_m et \vec{F}_m varient lentement à notre échelle de temps. Le système microscopique échange de l'énergie avec le milieu extérieur par l'intermédiaire de la force \vec{F} . Considérons deux instants t_1 et t_2 suffisamment proches à l'échelle macroscopique pour pouvoir négliger toute variation des grandeurs moyennes, mais suffisamment importants à l'échelle microscopique pour pouvoir effectuer une moyenne des grandeurs fluctuantes. La variation de

¹¹⁹⁸ (Foussard, et al., 2005) p. 35

¹¹⁹⁹ (Foussard, et al., 2005) p. 97

¹²⁰⁰ (Grécias, et al., 1999)p.646

¹²⁰¹ (Cousin, et al., 2011) p.381

¹²⁰² (Latour, 1997) p.41

l'énergie totale ε du système entre ces instants t_1 et t_2 est $\Delta\varepsilon = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} \cdot \vec{V} dt$, soit encore $\Delta\varepsilon = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_m \cdot \vec{V}_m dt + \int_{t_1}^{t_2} \vec{f} \cdot \vec{V}_m dt + \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_m \cdot \vec{v} dt + \int_{t_1}^{t_2} \vec{f} \cdot \vec{v} dt$. La valeur moyenne des grandeurs fluctuantes \vec{f} et \vec{v} est nulle, c'est-à-dire $\int_{t_1}^{t_2} \vec{f} \cdot \vec{V}_m dt = \left(\int_{t_1}^{t_2} \vec{f} dt \right) \cdot \vec{V}_m = 0$ et $\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_m \cdot \vec{v} dt = \vec{F}_m \cdot \left(\int_{t_1}^{t_2} \vec{v} dt \right) = 0$. L'intégrale $\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}_m \cdot \vec{V}_m dt$ correspond à la définition mécanique du travail reçu par le système entre les instants t_1 et t_2 , et sera par conséquent noté W . On a ainsi $\Delta\varepsilon = W + \int_{t_1}^{t_2} \vec{f} \cdot \vec{v} dt$. L'énergie $\int_{t_1}^{t_2} \vec{f} \cdot \vec{v} dt$ apparaît donc comme un mode de transfert d'énergie différent du travail. Elle est appelée chaleur et notée Q .¹²⁰³

¹²⁰³ (Meier, 2003) p. 764

IV. ANNEXE N°4 : QUESTIONNAIRE SUR LES CONCEPTS DE TEMPERATURE, DE CHALEUR ET DE TRANSFERT THERMIQUE

Question 1 : Pour chacune des propositions suivantes, indiquer si elle est exacte ou non en rédigeant une courte explication :

1)		V		F	$Q=mc(T_f-T_i)$, T_f et T_i sont les températures initiale et finale
2)		V		F	Quelque soit la transformation, le travail ne dépend pas du chemin suivi.
3)		V		F	Dans une transformation isotherme (température constante) $Q=0$
4)		V		F	Dans une transformation adiabatique ($Q=0$), la température reste constante.
5)		V		F	Un système fermé n'échange ni énergie ni matière

Question 2 : que signifient, pour vous, les termes suivants :

6) la température ?

7) le transfert thermique ?

8) la chaleur ?

Remarque : dans le cadre de ce travail, les questions 2) et 5) n'ont pas été exploitées.

BIBLIOGRAPHIE

I. SOURCES PRIMAIRES

Agabra Jaqueline Echanges Thermiques [Revue] // ASTER n°2. - 1985. - pp. 1-41.

Agregation Interne de Sciences Physiques Epreuve de Physique. - 2005.

Anakkar Abdelkader Semantic difficulties in science and their implications for education [Article] // Journal of Baltic Science Education. - 2014. - pp. 444-447 : Vol. 13 (4).

Anfosso François [et al.] Physique 1re S [Ouvrage]. - Paris : Bordas, 1998. - Vol. Nouvelle collection Galileo.

Angot Alfred Traité de physique élémentaire [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1881.

Atkins Peter Eléments de chimie physique [Ouvrage]. - Bruxelles : De Boeck université, 1998a.

Atkins Peter et Jones Loretta Chimie : molécules, matière, métamorphoses [Ouvrage]. - Bruxelles, Paris : De Boeck université, 1998. - Vol. trad. de André Pousse.

Atkins Peter Les concepts de chimie physique [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1998b.

Bach Stéphane, Buet François et Volet Gisèle Capes de sciences physiques Tome2 – Chimie cours et exercices [Ouvrage]. - Paris : Belin sup Chimie 2ème édition, 2004.

Bachelard Gaston Épistémologie, , textes choisis par Dominique Lecourt, [Ouvrage]. - Paris : 3e édition PUF, 1980. - Vol. 216 pp..

Bachelierie A., Aim J. Ben et Thelliez M. Thermodynamique 1 : conservation de l'énergie théorie cinétique des gaz [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, 1991.

Bachelierie André, Aïm osseline Ben et Thelliez Michel Thermodynamique 1 Conservation de l'énergie. Théorie cinétique des gaz [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, 1991.

Bacon Francis trad. de Lorquet Novum organum [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1857.

Baierlein Ralph Entropy and the second law: A pedagogical alternative [Article] // American Journal of Physics, . - 1994. - pp. 15-26. : Vol. 62 (1).

Balian Roger François Massieu et les potentiels thermodynamiques [En ligne] // Histoire des sciences / Évolution des disciplines et histoire des découvertes. - Avril 2015. - http://www.academie-sciences.fr/pdf/hse/evol_Balian2.pdf.

Balou Daniel, Fabritius Eric. et Gilles André Toute la chimie, PCSI, 2ème période [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2004.

Balpe Claudette Enseigner la physique (2), Approche historique au collège et au lycée [En ligne] // Sciences et éducation. - dimanche 28 avril 2013. - http://educasciences.blogspot.pt/2013/04/enseigner-la-physique-2-approche_28.html.

Barberousse Anouk La mécanique statistique. De Clausius à Gibbs [Ouvrage]. - Paris : Belin, 2002.

Barras J.P. et Gié H. Quelques remarques sur l'énergie potentielle et l'énergie interne en classe de première [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - mars 1982. - pp.561-576 : Vol. 642.

Baudelot Christian [et al.] Les classes préparatoires aux grandes écoles Évolutions sur vingt-cinq ans [Ouvrage]. - [s.l.] : Ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche. Direction de l'évaluation et de la prospective, décembre 2003. - Vol. 146.

Beaugeois Maxime, Deltombe Damien et Hennequin Daniel Quel est le principe du réfrigérateur. - Uniciel, Université de Lille 1, 2013.

Belhoste Bruno Historique des classes préparatoires [Conférence] // Colloque Démocratie, classes préparatoires et grandes écoles des 16 et 17 mai 2003 . - 2003.

Belhoste Bruno L'enseignement secondaire français et les sciences au début du XXe siècle. La réforme de 1902 des plans d'études et des programmes [Article] // Revue d'histoire des sciences, . - [s.l.] : www.persee.fr/doc/rhs_0151-4105_1990_num_43_4_4502, 1990. - n°4, pp. 371-400 : Vol. tome 43.

Belhoste Bruno, Gispert Hélène et Hulin Nicole Les sciences au lycée. Un siècle de réformes des mathématiques et de la physique en France et à l'étranger [Ouvrage]. - Paris : Vuibert, INRP, 1996.

Belorizki E. et Gorecki W. Introduction à la mécanique statistique [Ouvrage]. - Grenoble : Presses Universitaires, 1992.

Bergé Pierre Rapport de la mission sur l'enseignement de la physique [Rapport]. - [s.l.] : <http://educmath.ens-lyon.fr/Educmath/ressources/etudes/pierre-arnoux/berge>, Octobre 1989.

Bernard Daniel L'esprit physique [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2001. - Vol. Tome II.

Bernard Daniel L'esprit physique [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1998. - Vol. Tome I.

Bernard JJ [et al.] Manuel de biologie physiologie Classes de BCPST 1ere et 2eme année [Ouvrage]. - [s.l.] : Ellipses, 2006.

Bernier François Abrégé de la philosophie de Gassendi [Ouvrage]. - Lyon : Anisson, Posuel & Rigaud, Seconde édition, 1678. - Vol. Tome V.

Bernier Jacques La pompe de Chaleur [Ouvrage]. - Paris : Pyc Edition, 1979. - Vol. Tome 1.

Berrada Faouzi et Mseddi Raouf Thermodynamique classique [Ouvrage]. - Casablanca : Sochepress, 1993.

Bertin Michel, Faroux Jean-Pierre et Renault Jacques Cours de Physique, Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Dunod Université, 1976.

Bianchi A.-M., Fauterelle Y. et Etay J. Transferts thermiques [Ouvrage]. - Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.

Billy Nicolas [et al.] Capes de sciences physiques Tome 1- Physique cours et exercices [Ouvrage]. - Paris : Belin sup Physique, 2004.

Black Joseph Lectures on the elements of chemistry delivered in the University of Edinburgh [Ouvrage]. - Philadelphie : par John Robison, 1803. - Vol. 2 volumes.

Blain François, Faye Suzanne et Martin Françoise Physique Classe de 1re S [Ouvrage]. - Paris : Magnard, 1982.

BO [Article] // Bulletin officiel. - 25 juillet 1957 . - n°30.

BO Bulletin officiel [Article]. - 10 aout 1912. - n°2039.

BO bulletin officiel [Article] // Circulaire relative au programme de la classe de mathématiques spéciales préparatoires du 25 octobre 1917. - 3 novembre 1917. - n°2298.

BO Bulletin officiel [Article]. - 17 aout 1912. - n° 2040.

BO Bulletin officiel [Article]. - 24 aout 1912. - n° 2041.

BO Bulletin officiel [Article]. - 28 septembre 1918. - n° 2343 .

BO Bulletin officiel [Article]. - 12 aout 1999.

BO Bulletin officiel [Article] // Arrêté du 13 juin 1966 Programmes de sciences physiques des classes de second cycle des lycées et écoles normales. - 07 juillet 1966. - n°27.

BO Bulletin officiel [Article]. - 24 septembre 1992. - Hors-série Tome I et II.

BO Bulletin officiel [Article] // Arrêté du 9 mars 1982. - 22 avril 1982. - Vol. n° spécial 3.

BO Bulletin officiel [Article]. - 29 octobre 1998. - hors-série n°12.

BO Bulletin officiel [Article]. - 24 septembre 1992.

BO Bulletin officiel [Article]. - 7 octobre 1905.

BO Bulletin officiel [Article]. - 07 juin 1902. - n°1522.

BO Bulletin officiel [Article]. - 2 juin 1988. - n°21.

BO Bulletin officiel [Article] // arrêté du 20 mars 1978. - 20 avril 1978. - n°16.

BO Bulletin officiel [Article]. - 31 janvier 1946. - n°1634.

BO Bulletin officiel [Article]. - 1904. - n°1654 supplément.

BO Bulletin officiel [Article] // Circulaire du 23 juillet 1948. - 29 juillet 1948. - n°24.

BO Bulletin officiel [Article]. - 26 juin 1947. - n°21.

BO Bulletin officiel [Article] // Décret du 13 mai 1925 relatif aux horaires et aux programmes des classes des lycées et collèges de garçons. - 1er juillet 1925. - Vol. n°2563.

BO Bulletin officiel [Article] // Chartes des Programmes du 13 novembre 1991. - 20 février 1992. - n°8.

BO Bulletin officiel [Article] // Circulaire du 8 juin 1957. - 20 juin 1957. - n°25.

BO Bulletin officiel [Article] // Circulaires du 12 août 1957. - 12 septembre 1957. - n° 32.

BO Bulletin officiel [Article] // Circulaires du 12 octobre 1957. - 17 octobre 1957. - n° 37.

BO Bulletin officiel [Article] // Instruction pour l'admission à l'Ecole polytechnique en 1904. - [s.l.] : Ministère de la guerre, 8 août 1903.

BO Bulletin officiel [Article] // Physique Chimie classe de première scientifique. - 31 août 2000. - n°7 Hors série.

BO Bulletin officiel [Article] // Programme de chimie des classes de seconde. - 5 mars 1981.

BO Bulletin officiel [Article] // Programmes de Physique Chimie. - 29 octobre 1998. - n°12 Hors Série .

BO Bulletin officiel [Article] // Programmes et méthodes, dispositions générales. - 29 novembre 1956. - n°42.

BO Bulletin officiel [Article]. - 4 mai 1995 . - n° 18.

BO Bulletin Officiel [Article] // L'enseignement des sciences au Lycée. - 12 août 1999. - n°6 Hors série .

BO Bulletin officiel [Article]. - 30 mai 2013 . - spécial n° 3.

BO Bulletin officiel Sciences de la Vie et de la Terre [Article] // Programme de Sciences de la Vie et de la Terre. - Paris : [s.n.], 31 août 2000. - n°7 hors série.

Boccara Nino Les principes de la thermodynamique classique [Ouvrage]. - Paris : Presses universitaires de France, 1968.

Boichot Claude et C. Faure Chimie 2nde [Ouvrage]. - Paris : Bordas, 1981.

Bonnin Nathalie [et al.] Physique 1re S [Ouvrage]. - Paris : Hatier, 2005. - Vol. Microméga .

Borel L. et Favrat D. Thermodynamique et énergétique 1 De l'énergie à l'exergie [Ouvrage]. - Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011.

Botet C.atherine Thermodynamique Classique : Cours et exercices corrigés : Classes préparatoires [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1991.

Bottaro P., Cupissol E. et Rouzard L. Physique première S et E [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, 1982.

Bouasse Henri Cours de Physique, conforme aux programmes des certificats et de l'agrégation de physique. Deuxième Partie Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Delagrave, 1907. - Vol. 1ère édition.

Bouasse Henri Cours Thermodynamique 1ere partie Principes Généraux. Gaz et Vapeurs [Ouvrage]. - Paris : Delagrave 2ème édition, 1913a. - Vol. Volume I.

Bouasse Henri Cours Thermodynamique 2ème partie Machines thermiques. Chimie Physique [Ouvrage]. - Paris : Delagrave, 2ème édition, 1913b. - Vol. Volume II.

Bouasse Henri et Brizard Léopold Physique Classe de Seconde [Ouvrage]. - Paris : Delagrave, 1930.

Bouasse Henri et Brizard Léopold Physique Classes de Mathématiques A et B [Ouvrage]. - Paris : Delagrave, 1905.

Bouasse Henri Manuel du Baccalauréat Mécanique et Physique [Ouvrage]. - Paris : Delagrave, 1903.

Bourdieu Pierre et Gros François Principes pour une réflexion sur les contenus de l'enseignement [Rapport]. - [s.l.] : <http://www.r-lecole.fr/doc-hist/bourdieu.htm>, 8 mars 1989.

Boutin Anne, Dosseh Gilberte et Fuchs Alain Eléments de thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1997.

Boyer Louis L'enseignement des sciences : les paroles et les actes [Article] // La recherche. - juin 1996. - n°288.

Brébec [et al.] Thermodynamique 1ère année MPSI PCSI PTSI [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1995. - Vol. Hprépa.

Brébec J-M. [et al.] Physique, Exercices et problèmes MPSI/PCSI/PTSI [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 2010.

Briand Michel Rapport de Jury concours CCP, épreuve de Physique [Rapport]. - 2009.

Briffaut [et al.] Thermodynamique Hprépa 1ère année MPSI PCSI PTSI [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1995.

Brillouin Léon Science et théorie de l'information [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1959.

Brillouin Marcel [et al.] Le livre du cinquantenaire de la Société française de physique [Conférence] // Société française de physique. - Paris : Edition de la Revue d'optique théorique et instrumentale, 1925.

Brochard J. Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Masson et Cie Editeurs, 1963.

Brochard-Wyart Françoise [et al.] Chimie générale : tout le cours en fiches : licence, PACES, CAPES [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2012.

Brosseau Christian et Viard Jean Quelques réflexions sur le concept d'entropie issues d'un enseignement de thermodynamique. [Article] // Enseñanza de Las Ciencias. - 1992. - pp. 13-16 : Vol. 10 (1).

Bruhat Georges Cours de Thermodynamique à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1ère éd, 1926.

Brun Edmond et Jockey emile Chaleur Classes de Mathématiques Spéciales [Ouvrage]. - Paris : Lanore Editeur, 1936.

Bruneaux Michel La thermodynamique, une science à reformuler [Article] // Langue française. - 1984. - n°64 : Vol. pp.81-92. - pp. pp. 81-92..

Brunhes Bernard La dégradation de l'énergie [Ouvrage]. - Paris : Flammarion, 1991.

Bulletin quotidien des Cahiers de la République [Conférence] // Colloque sur l'enseignement et la recherche scientifique. - Caen : [s.n.], 1-3 novembre 1956.

BUP Avant-projet de programmes de physique pour les classes de 4ème - 2nde - 1ère [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - janvier 1992. - pp.1-51 : Vol. 720.

BUP Avant-projets des programmes de physique et de chimie [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - janvier 1992. - n°740 supplément.

BUP Extrait du Journal Officiel, n° du 1 juillet 1925 [Article]. - octobre 1925. - p.23-33 : Vol. 186.

BUP Horaires et Programmes (Extraits de l'Arrêté ministériel paru au Journal officiel du 13 décembre 1923) [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - février Mars 1924. - pp.167-175 : Vol. 170-171.

BUP Informations [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - avril mai 1964. - Vol. 476.

BUP Informations [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - Paris : [s.n.], janvier 1942. - Vol. 337.

BUP Informations [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - avril 1968. - pp. 895-911 : Vol. 504.

BUP La Commission Lagarrigue [Article] // Bulletin de l'union des physicien. - octobre 1977. - pp.1-172 : Vol. 597.

BUP La commission ministérielle pour la rénovation de l'enseignement des sciences physiques : un premier bilan par A. Lagarrigue [Article] // Bulletin de l'Union des Physiciens. - Paris : [s.n.], janvier 1973. - pp.496-512 : Vol. 551.

BUP Les travaux de la commission mixtes UdP-SFP sur l'enseignement [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - janvier 1990. - pp. 138-141 : Vol. 720.

BUP L'horaire en Terminale C,D et E [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - Paris : [s.n.], Juin 1971. - pp.1017-1029 : Vol. 536.

BUP Manifeste de l'Union des Physiciens [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - juin 1970. - pp.871-872 : Vol. 526.

BUP Programme de sciences physiques des classes de première et terminale des lycées [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - avril 1979. - n°613.

BUP Programmes de Sciences physiques (Arrêté du 19 juillet 1957) [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - 1957. - p. 497-511 : Vol. 435.

BUP Programmes de sciences physiques des classes de second cycle des lycées et écoles normales [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - 1966. - pp. 762-776 : Vol. 491.

BUP Programmes des classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - juin juillet 1964. - pp.801-825 : Vol. 477.

BUP Une dégradation de l'enseignement des sciences physiques [Article] // Bulletin de l'Union des physiciens. - Paris : [s.n.], octobre 1971. - pp.1-2 : Vol. 538.

Califano Salvatore Pathways to Modern Chemical Physics [Ouvrage]. - Berlin : Springer, 2012.

Cápek Vladislav et Sheehan Daniel Challenges to the second law of thermodynamics. Theory and experiment [Ouvrage]. - Dordrecht : Springer, 2005. - Dordrecht : Springer..

Carnot Sadi Réflexions sur la Puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance [Ouvrage]. - Paris : Bachelier, 1824.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 1996. - Vol. toute filière.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2009. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 1998. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 1999. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2001. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2002. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2003. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2004. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2005. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2006. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun polytechnique Epreuve de Physique. - 2007. - Vol. Filière PC.

CCP Concours commun Polytechnique Epreuve de Physique. - 1997. - Vol. Filière PC.

CCP Concours Commun polytechnique Epreuve de Physique. - 1995. - Vol. toute filière.

Cengel Yanus et Boles Michael Thermodynamique : Une approche pragmatique [Ouvrage]. - Quebec : De Boeck, Lacroix Marcel (Traduction), 2009.

Chabanel Martial et Illien Bertrand Thermodynamique chimique [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2011.

Charlot R., Gougeon J. et Walter C. Physique [Ouvrage]. - Paris : Belin, 1982. - Vol. Collection A. Cros.

Chassagny et Carré Leçons élémentaires de Physique, classe de Philosophie conforme aux programmes officiels du 4 mai 1912 [Ouvrage]. - 1917.

Chassagny et Carré Précis de Physique, classe de seconde conforme aux programmes officiels du 4 mai 1912 [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 4ème édition, 1918.

Chassagny Michel Cours élémentaire de Physique, conforme aux programmes du 31 mai 1902 à l'usage des candidats aux baccalauréats et aux écoles du gouvernement [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1904. - Vol. Cinquième édition. — 1 vol, 1144 pages .

Cheze C. et Bauer P. La thermodynamique, des principes aux applications : principes, systèmes simples, utilisations [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2011.

Christensen W.M., Meltze D. E. et Ogilvie C. A. Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course [Article] // American Journal of Physics. - 2009. - pp. 907-917 : Vol. 77 (10).

Clapeyron Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur [Ouvrage]. - Paris : Journal de l'école royale polytechnique, 1833. - Vol. 22ème cahier Tome XIV.

Clausius Rudolf Le second principe de la théorie mécanique de la chaleur [Ouvrage]. - Paris : Revue des cours scientifiques de la France et de l'étranger, 5, 10,, 1868a. - Vol. traduit par P. Delestrée.

Clausius Rudolf Mémoire sur une forme nouvelle du second théorème principal de la théorie mécanique de la chaleur [Article] // Journal de mathématiques pures et appliquées . - [s.l.] : Traduit par M. Michaëtis, 1855. - tome 20 (1855), p. 63-86. : Vol. 1re série.

Clausius Rudolf Sur diverses formes des équations fondamentales de la théorie mécanique de la chaleur [Article] // Journal de mathématiques pures et appliquées. - 1865. - tome 10 , p. 361-400 : Vol. Traduction de H-F Bessart.

Clausius Rudolf Théorie mécanique de la chaleur [Ouvrage]. - Paris : Traduit par F. Folie, Edition Eugène Lacroix, 1868b.

Clavel [et al.] Physique Chimie 2de [Ouvrage]. - Paris : Hatier, 2004.

Clavel Chantal [et al.] Physique Chimie 2de [Ouvrage]. - Paris : Hatier, 2004. - Vol. Microméga.

Cochran M. J. et Heron P.R.L. Development and assessment of research-based tutorials on heat engines and the second law of thermodynamics [Article] // American Journal of Physics. - 2006. - pp. 734-741 : Vol. 74 (8).

Concours Commun Sup. Concours Commun Sup. Epreuve de Physique Chimie. - [s.l.] : Ecoles des Mines d'Albi, Alès, Douai et Nantes, 2003. - Vol. Toutes filières.

Coulon C., Boiteux S. Le et Segonds P. Cours de physique : Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1997. - Vol. DEUG Sciences.

Courtebras Bernard La structure des hiérarchies scolaires: histoire de l'organisation de l'enseignement professionnel et technique [Ouvrage]. - [s.l.] : Publibook, juin 2008.

Cousin Th. et Perodeau H. Physique Le compagnon MPSI-PTSI [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2011.

Cros Louis L'Explosion scolaire [Ouvrage]. - Paris : CUIP, 1961.

Cunin Bernard et Deiss Jean-Louis La pompe à chaleur [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - décembre 1976. - pp.285-294 : Vol. 589.

Damotte H. [et al.] L'énergie [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - janvier 1986. - pp.453-457 : Vol. 680.

Damour Emilio, Carnot Jean et Rengade Etienne Encyclopédie de science chimique appliquée, Les sources de l'énergie calorifique [Article]. - Paris et Liège : Librairie polytechnique, Ch. Béranger, Editeur, 1912.

Daro Sabine, Stouvenakers Nadine et Graftiau Marie-Christine La propagation de la chaleur : Un outil à l'usage des enseignants pour favoriser une continuité des apprentissages en sciences lors de la liaison primaire secondaire [Rapport]. - Bruxelles : Ministère de la Communauté Française, Administration Générale de l'Enseignement de la Recherche Scientifique, 2009.

Dennery F.M. Précis de thermodynamique rationnelle [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1994.

Descartes trad. Victor Brochard Les principes de la philosophie [Ouvrage]. - Paris : F. Alcan, 1886. - Vol. Livre premier.

Desmons Jean Aide-mémoire Froid industriel, [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2e édition , 2006.

Diu B. [et al.] Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Hermann, 2007.

Dudeck Michel Thermodynamique : Les irréversibilités [Ouvrage]. - Toulouse : ESKA, 1993.

Duhem Pierre Introduction à la mécanique chimique [Ouvrage]. - Paris : Georges Carré, 1893.

Duhem Pierre Quelques réflexions au sujet des théories physiques [Article] // Revue des questions scientifiques. - 1892. - p. 139 – 177 : Vol. t. XXXI.

Duhem Pierre Traité d'énergétique, ou thermodynamique générale [Ouvrage]. - Paris : Jaques Gabay 1997, 1911.

Duhem Pierre Traité élémentaire de mécanique chimique fondée sur la Thermodynamique [Ouvrage]. - [s.l.] : Hermann, 1897.

Duprez Chantal et Méheut Martine A propos du concept de source thermique [Article] // Bulletin de l'Union des Physiciens. - décembre 2007. - pp. 77-103 : Vol. n°899.

Durandeau J.P. [et al.] Physique 1ère S [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 2001. - Vol. Collection Durandeau.

Durandeau J.P. [et al.] Physique 1re S [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1994. - Vol. Durandeau.

Durupthy, Mesnil et Zobiri Thermodynamique chimique 2nde année PC PC* [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1996 . - Vol. Hprépa.

Dusseau Jean-Michel et Fréchengues Pierre Introduction de l'électron dans l'enseignement secondaire français [Article] // Didaskalia-n°16. - 2000. - p. 11 à 31.

Duverney Daniel Le baccalauréat scientifique et son contexte depuis 1962 [En ligne] // <http://danielduverney.fr/>. - décembre 2006. - mars 2016. - <http://danielduverney.fr/documents/textes-courts-systeme-educatif/BaccalaureatS.pdf>.

Duverney Daniel Les "spécialités" au bac S : une approche historique [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - février 2007. - pp.243-252 : Vol. 891.

Encyclopédie Universalis [En ligne] // NEWCOMEN THOMAS . - Encyclopædia Universalis France, 2015. - 26 décembre 2015. - <http://www.universalis.fr/encyclopedie/thomas-newcomen/>.

Faivre-Dupaigre et Lamirand Cours de Physique pour les classes de mathématiques spéciales [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1911.

Faivre-Dupaigre, Carimey et Lamirand Nouveau cours de Physique Élémentaire classe de mathématiques conforme au programme de 1925 [Ouvrage]. - Paris : Masson 8ème édition, 1930.

Faivre-Dupaigre, Lamirand et Barré Nouveau cours de physique élémentaire. Classe de mathématiques [Ouvrage]. - Paris : Masson 9ème édition, 1934.

Faroux Jean-Pierre, Renault Jacques et Bocquet Lydéric Tout la thermodynamique, la mécanique des fluides et les ondes mécaniques MPSI-PCSI,MP-PC-PSI [Ouvrage]. - [s.l.] : Dunod, 2002.

Faverjon G. Thermodynamique MPSI [Ouvrage]. - Paris : Editions Bréal, 2003. - Vol. Les nouveaux précis Bréal.

Faynot Philippe Rapport de Jury, Epreuve de Physique, Concours CCP Deug 2005 [Rapport]. - 2005.

Fermi Enrico Thermodynamics [Ouvrage]. - [s.l.] : Dover Publications; New Ed edition (June 1, 1956), 1956. - Vol. 176 pages.

Filippi Ulysse La définition de la chaleur et le principe de l'état initial et de l'état final (Classes terminales) [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - octobre novembre 1958. - pp.255-259 : Vol. 443.

Finot Thierry [et al.] PCSI prépas Sciences Physique [Ouvrage]. - [s.l.] : Ellipses, 2009 .

Fontaine Guy, Lautrette Marc et Tomasino Adolphe Physique 1res S.E. [Ouvrage]. - Paris : Nathan, 1988.

Fourier Joseph Théorie Analytique de la Chaleur [Ouvrage]. - Paris : Gauthier-Villard et fils, 1822. - Vol. volume I.

Foussard Jean-Noël et Julien Edmond Thermodynamique Bases et applications [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2005.

Foussard Jean-Noël. et Mathé Stéphane Mini Manuel de Thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2009.

Fraudet H Physique. Résumé aide-mémoire classes de 2nde et 1ère. Baccalauréat 1ère partie, programmes du 3 juin 1925 [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1929.

Frère Christian et Krempf Pierre Thermodynamique 2ème année PC-PC* PSI-PSI* [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1999. - Vol. Taupe niveau.

Gaboriaux René Thermodynamique éléments fondamentaux de l'énergétique et de la cinétique chimique [Ouvrage]. - Paris : Ellipse, 1998.

Gamper R. Second principe, aperçus nouveaux [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - janvier février 1962. - pp.345-373 : Vol. 462.

Garing Christian et Lhopital Alain Les 1001 questions de la physique en prépa - 1re année PCSI - programme 2013 [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2013.

Gautron L. [et al.] Physique. Tout-en-un pour la Licence - Cours, applications et exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2010.

Gendreau Bernard Thermodynamique physique, Rappels de cours Exercices et Problèmes Corrigés [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1990.

Gibbs J.-W. Diagrammes et surfaces thermodynamiques [Ouvrage]. - traduit de l'anglais par M. G.Roy : Scientia, 1903.

Gibbs Josiah Willard On the Equilibrium of Heterogeneous Substances (Part I) [Article] // Arts and Sciences. - [s.l.] : Connecticut Academy, 1874-1878. - pp.198-248 : Vol. volume III.

Gié Hubert et Olivier Stephan Thermodynamique 1ère et 2ème année [Ouvrage]. - Paris : Tec&doc, 1996.

Girod de l'Ain Bertrand Formation des maîtres [Article] // L'Université face à sa réforme - Revue de l'enseignement supérieu. - 1966. - n°4 : Vol. pp. 151-160.

Grécias Pierre et Migeon Jean Pierre Physique Sup PCSI, cours et exercices d'application [Ouvrage]. - [s.l.] : Tec&Doc, 1999.

Grécias Pierre Exercices et problèmes de thermodynamique physique [Ouvrage]. - Paris : Tec & Doc, 2ème édition, 1995.

Groff Gerald C. A short history of heat pumps who uses them and why [Revue]. - [s.l.] : The REHVA European HVAC pages 50-56, mars 2010. - 2 : Vol. 47.

Groupe Réussite au Lycée Objectifs de référence en classe de 1ère S [Rapport]. - Académie de Lille : Inspection pédagogique régionale sciences physiques, 1994.

Guedj Muriel L'introduction du principe de conservation de l'énergie dans l'enseignement secondaire français [En ligne] // Tréma [En ligne], 22 | 2003. - 13 octobre 2010 2010. - <http://trema.revues.org/1544> ; DOI : 10.4000/trema.1544.

Guignier Georges La commission Lagarrigue [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - juillet, août, septembre 1971. - Vol. 537.

Haglund Jesper, Jeppsson Fredrik et Strömdahl Helge Different Senses of Entropy—Implications for Education [Article] // Entropy. - Mars 2010. - Vol. 12(3), 490-515.

Harvard Committee General education in a free society [Rapport]. - Cambridge Massachusetts : Harvard University Press., 1950.

Haiüy René Juste Traité élémentaire de Physique [Ouvrage]. - Paris : Courcier, 2^{de} édition, 1806. - Vol. Tome I.

Hawking Stephen W. A brief history of time. From the big bang to black holes. [Ouvrage]. - [s.l.] : Bantam books, 1988. - Vol. New York.

Hébert Alain Chimie 2^{de} [Ouvrage]. - Paris : Technique et Vulgarisation, 1981.

Howard Irmgard K. H Is for Enthalpy, Thanks to Heike Kamerlingh Onnes and Alfred W. Porter de [Article] // Journal of Chemistry Education. - 2002. - p. 697 : Vol. 79 (6).

Hulin Nicole [et al.] Physique et humanités scientifiques : autour de la réforme de l'enseignement de 1902 : études et documents [Ouvrage]. - Lille : Presses universitaires du septentrion, 2000.

Hulin Nicole Décalages entre science enseignée et science savante : la physique en France [Article] // Histoire des science et ces techniques. - 1997. - Centre régional de documentation. - p. 143-168.. - pp. p. 143-168..

Hulin Nicole Le problème de physique aux XIX^e et XX^e siècles. Forme, rôle et objectifs [Article] // Histoire de l'éducation. - 1992. - n°24 : Vol. pp. 39-58.

Hulin Nicole Science qui se fait, science qui s'enseigne. À propos d'un document sur l'agrégation de sciences physiques depuis 1869 [Article] // Histoire de l'éducation. - [s.l.] : http://www.persee.fr/docAsPDF/hedu_0221-6280_1984_num_21_1_1208.pdf, 1984. - pp.37-58 : Vol. n°21.

Hulin Nicole, Hulin Michel et Veyssié Madeline Thermodynamique cours et problèmes résolus [Ouvrage]. - Paris : Dunod , 1994.

Jamin Jules Cours de physique de l'école polytechnique [Ouvrage]. - Paris : Gauthier Villars, 1859. - Vol. Tome 2.

Jandaly Jean Température ou Chaleur? Les sensations du corps humain [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - mai 1999. - pp.849-856 : Vol. 814.

Jech Bruno Bible de physique [Ouvrage]. - Paris : Ellipse, 2004.

Joyal Maxime Cours de Physique pour les classes de mathématiques spéciales [Ouvrage]. - Paris : Masson, douzième édition, 1941. - Vol. II.

Joyal Maxime et Provost Pierre Chaleur [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1964.

Joyal Maxime et Provost Pierre Thermodynamique Classes de mathématiques supérieures, Programmes de 1972 [Ouvrage]. - Paris : Masson et Cie, 1972.

Jury Agregation interne de sciences physiques Rapport de Jury [Rapport]. - 2005.

Jury Agregation interne de sciences physiques Rapport du Jury [Rapport]. - 2010.

Kastler Alfred et Vichnievsky Restilav Cours de Physique Générale à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 5ème édition, 1962. - Vol. Thermodynamique de Georges Bruhat.

Kastler Alfred., Vichnievsky Restilav. et Chanu Jacques Cours de physique générale à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique [Ouvrage]. - Paris : Masson & Cie 6ème édition, 1968. - Vol. Thermodynamique de Georges Bruhat.

Khánh Hằng BÙI THỊ Une étude didactique de la vie de l'Energie dans l'enseignement de la Physique, en France et au Vietnam. - Thèse : Université Joseph Fourier Grenoble, 2005.

Knott Cargill Gilson Life and scientific work of Peter Guthrie Tait supplementing the two volumes of scientific papers published in 1898-1900 [Ouvrage]. - Cambridge : University Press of Cambridge, 1911.

Kondepudi Dilip et Prigogine Ilya Thermodynamique : des moteurs thermiques aux structures dissipatives. [Ouvrage]. - Paris : O. Jacob, 1999.

Lafargue David Conceptions des élèves sur les notions de « chaleur » et de température après enseignement du programme de première S de 2001 [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - Juin 2006. - pp.715-727 : Vol. 885.

Laffont Patrick et Pérez José-Philippe Introduction à la thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1996.

Lagoutte [et al.] Physique une approche moderne [Ouvrage]. - [s.l.] : De Boeck, 2011. - Vol. Tout en un .

Lamirand Jean-Baptiste et Joyal Maxime Chimie. ses de Mathématiques et Sciences expérimentales [Ouvrage]. - Paris : [s.n.], 1951.

Langlois Françoise Un siècle de physique à travers un manuel à succès: le traité de physique de Ganot. - Université Claude Bernard Lyon 1 : Société Chimique de France, 2006.

Latour Bruno Leçons de thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1997.

Lavertu Georges Les Bases de la thermodynamique [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - décembre 1989. - pp.1491-1510 : Vol. 719.

Lavoisier Antoine-Lauren Traité élémentaire de chimie, présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes, avec figures [Ouvrage]. - Paris : Cuchet, 2^{de} édition, 1793.

Lavoisier Laplace Mémoire sur la chaleur [Ouvrage]. - [s.l.] : <http://www.lavoisier.cnrs.fr>, 1780. - pp. 355-408.

Le Hir Jean [En ligne] // Correction devoirs surveillés classe MP. - lycée de Kerichen, 6 décembre 2007. - <http://gensdelalune.free.fr/mp/Devoirs%20surveilles/DS4-2-thermodynamique%20%28CCP%20national%20Deug%202005%29-corrige.pdf>.

Le Hir Jean Thermodynamique optique géométrique : cours et 73 exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1999.

Le Noble Eustache Les œuvres de Mr Lenoble [Ouvrage]. - Paris : Pierre Ribou, seul Libraire de l'Académie Royale de Musique. Quai des Augustins, à la descente du Pont-Neuf, à l'Image S. Louis., 1743. - Vol. 3^{ème} édition.

Le Petit Larousse dictionnaire Daniel Péchoin et François Demay [Ouvrage]. - Paris : Larousse, 1996.

Le Robert dictionnaire d'aujourd'hui Alain Rey (sous la direction) [Ouvrage]. - Paris : Dictionnaires Le Robert, 1991.

Leboutet Lucie L'enseignement de la physique [Ouvrage]. - Paris : Presses Universitaires de France, 1973.

Lecardonnell Jean-Pierre [et al.] Physique Ire S [Ouvrage]. - Paris : Bordas, 1994. - Vol. Galiléo.

Lelievre Claude Histoire des institutions scolaires (1789-1989) [Ouvrage]. - Paris : Nathan, 1994.

Lemaître Jules L'enseignement classique et l'enseignement moderne [Article] // Revue encyclopédique. - Paris : conférence à la Sorbonne du 5 juin 1898, 1898.

Lemarchand H. [et al.] Thermodynamique de la chimie [Ouvrage]. - Paris : Hermann, 1999.

Lemeignan Gérard et Annick Weil-Barais Construire des concepts en physiques, l'enseignement de la mécanique [Ouvrage]. - Paris : Hachette, 1993.

L'étudiant de France Le système des classes préparatoires aux grandes écoles, une machine bien huilée [Article]. - octobre 1969. - nouvelle série n°1.

Lewandowski jean-Claude Classes « prépas » : la réforme sur les rails [Revue]. - [s.l.] : les Echos, 31 janvier 1995.

Leymarie Eliane et Laval Annie Chaleur ou température [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - janvier 1981. - pp.551-554 : Vol. 630.

Lhuillier C. et Rous J. Introduction à la thermodynamique [Ouvrage]. - [s.l.] : Dunod, 2ème Edition, 1994.

Locqueneux Robert Baromètres, machines pneumatiques & thermomètres - Chez & autour de Pascal, d'Amontons & de Réaumur [Ouvrage]. - Paris : L'Harmattan, 2015.

Locqueneux Robert Bouasse et l'esprit taupin, analyse // BibNum. - Janvier 2010.

Locqueneux Robert De l'invention du baromètre : une étape dans la connaissance des propriétés de l'air [Article] // Les nouvelles d'Archimède. - [s.l.] : Université de Lille 1 sciences et technologie, 2015. - 70 : Vol. pp.21-23.

Locqueneux Robert Histoire de la thermodynamique classique, De Sadi Carnot à Gibbs [Ouvrage]. - Paris : Belin, 2009a.

Locqueneux Robert Robert Locqueneux, Baromètres, machines pneumatiques & thermomètres - Chez & autour de Pascal, d'Amontons & de Réaumur [Ouvrage]. - Paris : L'Harmattan, 2015.

Locqueneux Robert Une histoire des idées en physique [Ouvrage]. - Paris : Vuibert, 2009b.

Lorenceau É. et Restagno F. Thermodynamique : aide-mémoire [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2003.

Lucrèce Trad. de Pongerville De la nature des chose [Ouvrage]. - Paris : C. L. F. Panckoucke, 1829-1832b. - Vol. Tome II.

Lucrèce Trad. de Pongerville De la Nature des choses [Ouvrage]. - Paris : C. L. F. Panckoucke, 1829-1832a. - Vol. Tome 1.

Marcella T.V. Entropy production and the second law of thermodynamics: An introduction to second law analysis [Article] // American Journal of Physics. - 1992. - pp. 888-895 : Vol. 60 (10).

Marivetz Étienne-Claude (de) et Goussier Louis-Jacques Physique du Monde dédiée au Roi [Ouvrage]. - Paris : Quillau Imprimerie, 1786. - Vol. Cinquième tome, deuxième partie.

Mathieu J.P. La conciliation des deux principes de la thermodynamique (1845-1852) [Article] // Bulletin de l'Union des physiciens. - mars 1982. - pp-643-660 : Vol. 642.

- Mauduit Richard** Thermodynamique en 20 fiches [Ouvrage]. - [s.l.] : Dunod, 2013.
- Maurel Josette** D'un programme à l'autre [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - Juin 2000. - pp.1095-1097 : Vol. 825.
- Maxwell James Clerck** La Chaleur [Ouvrage]. - Paris : Editions Jacques Gabay Paris (1997), 1891.
- McQuarrie Donald A. et Simon John D.** Chimie physique Approche moléculaire [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2000. - Vol. Sciences Sup.
- Médard Louis et Tachoire Henri** Histoire de la thermochimie. Prélude à la thermodynamique chimique [Ouvrage]. - Aix-en-Provence : Publication de l'université de Provence, 1994.
- Méheut Martine, Duprez Chantal et Kermen Isabelle** Approches historique et didactique de la réversibilité [Article] // Didaskalia. - 2004 . - n° 25 : Vol. pp.31-61.
- Meier Dominique (sous la direction)** Toute la Physique chimie en MPSI- PTSI - cours et exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 2003.
- Mendès-France Pierre** Dix ans après... [Article] // L'Université face à sa réforme - Revue de l'Enseignement Supérieur. - 1966. - n°4 : Vol. pp.47-53.
- Ménétrie M., Ph.Girin, H.Idda et M.Fanguet** Physique MPSI-PCSI-PTSI, [Ouvrage]. - Paris : Hachette,, 2003.
- Mercier J.M., Zanchi G. et Pérez J.P.** Énergie mécanique, énergie interne, énergie et premier principe de la thermodynamique [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - mai 1990. - pp. 685-705 : Vol. 724.
- Mercier Jean** Évolution de l'énergie et principes de la thermodynamique [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - 1959. - pp.452-465 : Vol. 447.
- Mercier Jean** Traité de Thermodynamique à l'usage de l'Enseignement Supérieur des Ecoles d'Ingénieurs [Ouvrage]. - [s.l.] : Gauthier-Villard, 1957.
- Metzger Hélène** Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique [Ouvrage]. - Paris : Librairie scientifique et technique, Albert Blanchard, 1930.
- Meunier Francis** Aide-mémoire Thermodynamique de l'ingénieur. Énergétique. Environnement, [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2004.
- Micolau Gilles** Correction des Epreuves de Physique I aux Concours Communs Polytechniques DEUG des ENSI Années 2003-2004-2005-2006-2007-2008-2009-2010-2011 [En ligne]. - Université Paul Cézanne, 2005. - 2013. - http://www.gilles-micolau.univ-cezanne.fr/Partie_I/Correc-Partie_I.pdf.

Ministère de l'éducation nationale direction de l'enseignement scolaire Chimie Classe de première S accompagnement des programmes [Rapport]. - Paris : Centre national de documentation pédagogique, Chimie 2001.

Ministère de l'Education nationale Classes préparatoires aux grandes écoles (C.P.G.E.) [En ligne] // Enseignement supérieur et Recherche. - octobre 2007. - <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr>.

Ministère de l'Education nationale Classes préparatoires aux grandes écoles : orientations pour l'année scolaire 1997-1998 [Revue]. - 29 mai 1997. - 97 : Vol. Décret n° 94-1015 du 23 novembre 1994 ; Arrêté du 10 février 1995 ; Arrêté du 27 juin 1995.

Ministère de l'éducation nationale Classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques. Mathématiques supérieures et Mathématiques Spéciales M et M' [Ouvrage]. - [s.l.] : Institut National de Recherche et de Documentation Pédagogique, 1974. - Vol. 77 pages.

Ministère de l'Education nationale Direction de l'enseignement secondaire Physique classe de première S série accompagnement des programmes [Rapport]. - Collection Lycée voie générale et technologique : Centre national de documentation pédagogique, Physique 2001.

Ministère de l'éducation nationale Mathématiques supérieures et Mathématiques spéciales M,M et P,P', horaires objectifs programmes instructions [Ouvrage]. - [s.l.] : Centre national de documentation pédagogique 2ème édition, 1989.

Ministère du logement J'éco-rénove, j'économise : en route pour les travaux. - Ministère du logement, 2013.

Moutier Jules La thermodynamique et ses principales applications [Article]. - Paris : [s.n.], 1885. - Gautier-Villars.

Mseddi R. et Berrada F. Thermodynamique classique [Ouvrage]. - Casablanca : Sochepress diffusion, 1993.

Nernst Walther (1864-1941) Experimental and theoretical applications of thermodynamics to chemistry [Ouvrage]. - New Haven : Yale University Press, 1907.

Ngô Ch. et Ngô H. Physique statistique Introduction Cours et exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 3ème édition, 2008.

Odermatt Ph. Thermodynamique physique, 54 exercices de concours corrigés et commentés (contient quelques rappels de cours) [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1991.

Ollive Frédéric Physique classe de mathématiques : programme du 3 juin 1925 [Ouvrage]. - Paris : Vuibert, 1930.

Ollivier Héroïs Henri Cours de physique générale [Article]. - Paris : Librairie Scientifique Hermann et Cie, 1928. - 3ème édition.

Olmer Louis-Joseph Physique classe de mathématique [Ouvrage]. - Paris : De Gigord, 1929.

Ostwald Wilhelm La déroute de l'atomisme contemporain [Revue] // Revue générale des sciences pures et appliquées. - 1895.

Oturan M. A. et Robert M. Thermodynamique chimique [Ouvrage]. - Grenoble : Presses Universitaires, 1997.

Papon P. et Leblond J. Thermodynamique des états de la matière [Ouvrage]. - Paris : Hermann Editeurs des sciences et des arts, 1990.

Parisi Jean-Marie [et al.] Physique Chimie 2e [Ouvrage]. - Paris : Belin, 2001.

Pellat Henri Cours de physique générale : Thermodynamique leçons professées à la Sorbonne en 1895-1896 [Article]. - Paris, : G. Carré & C. Naud, Éditeurs, 1897.

Pérez J.Ph., Massas G. et Zanchi G. Les deux premiers principes de la thermodynamique sous forme de bilan [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - octobre 1993. - pp.25-32 : Vol. 757.

Pérez José-Ph. et Laffont Patrick Introduction à la thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1996.

Pérez José-Philippe Thermodynamique. Fondements et applications [Ouvrage]. - Paris : Masson 2ème édition, 1997.

Perrin Jean Mouvement brownien et réalité moléculaire [Article] // Annales de Chimie et de Physique 19 (8e série). - Paris : [s.n.], 1909. - pp. 5-104.

Perrot P. Thermodynamique chimique : problèmes corrigés et commentés avec rappels de cours [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1998.

Perrot Pierre Dictionnaire de thermodynamique : De l'absolu au zéro absolu [Ouvrage]. - Paris : InterÉditions, 1994.

Peycru Pierre Biologie tout en un BCPST 1ere année [Ouvrage]. - Paris : Dunod 2ème édition , 2009 . - Vol. J'intègre .

Philon de Byzance trad. Le Baron Carra de vaux Le livre des appareils pneumatiques et des machines hydrauliques [Ouvrage]. - Paris : G. Klincksieck, 1902. - Vol. Tome 33.

Pilatte A. IIF IIR Technique du froid : cours de base [Ouvrage]. - Paris : Institut International du Froid, 2006. - Vol. 286 p..

Planck Max The Theory of Heat Radiation [Ouvrage]. - Philadelphia : P. Blakiston's Son & Co., 1914. - Vol. a translation by Masius, M. of the second German edition.

Popper Karl R. Des sources de la connaissance et de l'ignorance [Ouvrage]. - Paris : Rivages Poche Petite Bibliothèque, 1998. - Vol. Traduit de l'Anglais par M.I. et M.B de Launay.

Prigogine Ilya Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1968.

Prost Antoine De l'enquête à la réforme. L'enseignement secondaire des garçons de 1898 à 1902 [Article] // Histoire de l'éducation. - 2008. - pp.29-80 : Vol. n° 119.

Prost Antoine Histoire de l'enseignement en France (1800-1967) [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, 1968.

Pullicino Michel Thermodynamique, Tout le cours PCSI, MPSI, PTSI, [Ouvrage]. - Paris : Nathan, 2007.

Queyrel J.L. et Mesplède J. Thermodynamique MPSI, PCSI [Ouvrage]. - Paris : Bréal, 1996. - Vol. Précis de physique.

Reif Frédéric Physique statistique, Berkeley cours de physique [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, traduit de l'anglais par Pierre Turon, 1972. - Vol. 5.

Richet P. Les bases physiques de la thermodynamique et applications à la chimie [Ouvrage]. - Paris : Belin, 2000.

Riollet Gilbert Thermodynamique appliquée. L'entropie et le second principe [Section] // Traité Génie énergétique. - [s.l.] : Techniques de l'Ingénieur, 1992. - Vol. vol. B 111.

Robert André D. La Quatrième République et les questions de l'égalité et de la justice dans l'enseignement du second degré : le changement sans la réforme [Article] // Revue française de pédagogie [En ligne], 159. - [s.l.] : <http://rfp.revues.org/1064> , avril-juin 2007.

Rochas d'Aiglun Albert de La Science des philosophes et l'art des thaumaturges dans l'antiquité [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1882.

Rosmorduc Jean Une histoire de la physique et de la chimie, De Thalès à Einstein [Ouvrage]. - Paris : Seuil, 1985.

Roulet Bernard L'énergie interne en classe de première [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - 02 février 1981. - pp.613-619 : Vol. 631. - p. 613.

Rouquérol Françoise, Chambaut Gilberte et Lissilour Rolland Le cours de Paul Arnaud, Chimie physique : cours avec 350 questions et exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 6ème édition, 2007.

Rous Jean et Lhuillier Claire Introduction à la thermodynamique [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1994.

Roux Paul et Seigne Jean-Robert Thermodynamique 1ère année MPSI-PCSI-PTSI : cours et exercices corrigés [Ouvrage]. - Paris : Ellipses, 1998.

Roy Bimalendu N. Fundamentals of classical and statistical Thermodynamics [Ouvrage]. - [s.l.] : John Wiley & Son, 2002.

Rumford Benjamin Thompson Mémoire sur la Chaleur [Ouvrage]. - Paris : Firmin Didot, 1804.

Saint Augustin Confessions traduction de Arnault d'Andilly [Section] // Philosophie Chrétienne. Choix d'ouvrages Mystiques / auteur du livre Buhcon J.A.C.. - Paris : A. Desrez, 1840.

Saison André [et al.] Physique 1er SE [Ouvrage]. - Paris : Fernand Nathan, 1981.

Salamito Bernard [et al.] Physique tout en un [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2013. - Vol. J'intègre .

Samiullah Mohammad What is a reversible process? [Article] // American Journal of Physics. - 2007. - pp. 608-609 : Vol. 75 (7).

Sanz Marie Noelle, Badel Anne-Emmanuelle et Clausset François Physique tout en un 1ère année [Ouvrage]. - Paris : J'intègre Dunod 2ème édition, 2002.

Sanz Marie-Noëlle et Chardon Dominique Physique tout en un [Ouvrage]. - Paris : J'intègre , Dunod, 2013.

Schwartzentrube Jacques Thermodynamique [En ligne] // http://nte.mines-albi.fr/Thermo/co/uc_NotionSysteme.html. - Octobre 2007.

Sénéchal David Histoire des sciences. - Université de Sherbrooke : Faculté des sciences, 2004.

Senez Jacques Une situation paradoxale et alarmante [Article] // Bulletin de l'union des Physiciens. - octobre 1971. - Vol. 538.

Souchay Chimie générale, thermodynamique chimique [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1961.

Stöker H., Jundt F. et Guillaume G. Toute la physique [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 1999 .

Suardet René Thermodynamique physique de la matière [Ouvrage]. - Paris : Lavoisier, 1992.

Taillet R. Thermodynamique : 1er cycle-prépas-concours [Ouvrage]. - Bruxelles : De Boeck, 2010.

Talbourdel Yves et Valentin Didier Physique Chimie Première S/E [Ouvrage]. - Paris : Hachette éducation, 1990.

Thellier Michel et Ripoll Camille Bases thermodynamiques de la biologie cellulaire [Ouvrage]. - Paris : Masson, 1991.

Thomsen John S. et C. Bers Helene The reversible process: A zero-entropy-production limit [Article] // American Journal of Physics. - 1996. - pp. 580-583 : Vol. 64 (5).

Thomson William Mathematical and Physical Papers [Conférence] // On the economy of the heating or cooling of buildings by means of currents of air 1882 . - Cambridge : Cambridge University Press, 2011. - Vol. pp.515-520.

Tinnès Jacqueline Lettre ouverte, enseigner la physique [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - octobre 1989. - pp.9-10 : Vol. 713.

Tolman Richard et Fine Paul On the irreversible production of Entropy [Article] // Reviews of modern physics. - 1948. - pp.51-77 : Vol. 20 (1).

Tréherne Georges Physique Classe de sciences expérimentales [Ouvrage]. - Paris : Nathan, 1955.

Tréherne Georges, Cessac Jean et Roulet Bernard Physique classe de deuxième [Ouvrage]. - Paris : Nathan, 1971.

Trouilhet J.P. Thermodynamique de la réaction chimique [Ouvrage]. - [s.l.] : Ellipse, 1991.

Tuech J, Dubusc M. et Mossoyan M. Thermodynamique chimique [Ouvrage]. - Paris : Armand Colin, 1995.

Union des Professeurs de Spéciales Comparatifs entre les programmes de 1995 et ceux de 2003 [En ligne] // Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles. - 1995. - prepa.org.

Union des professeurs de Spéciales Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles [En ligne] // Programmes de chimie de la voie PCSI. - 2003 PCSI (chimie). - prepa.org.

Union des professeurs de Spéciales Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles [En ligne] // Programme de Physique 1ère année BCPST. - 1995 BCPST. - prepa.org.

Union des Professeurs de spéciales Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles [En ligne] // Programmes de physique de la voie PCSI. - 2003 PCSI. - prepa.org.

Union des Professeurs de Spéciales Programme de Physique des classes de MP et MP* [En ligne] // Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles. - 1996. - prepa.org.

Union des Professeurs de Spéciales Programme PCSI [En ligne] // Le site de l'UPS pour les Classes Préparatoires aux Grandes Écoles. - 1995 PCSI. - prepa.org.

Valeru Filip Introductory thermal physics [Ouvrage]. - Bucuresti : Universitatii din , 2006.

Vanhaecke Jean-Marc Le second principe de la thermodynamique [Article] // Bulletin de l'union des physiciens. - mars 1982. - pp. 611-624 : Vol. 642.

Vidal Jean Thermodynamique application au génie chimique et à l'industrie pétrolière [Ouvrage]. - Paris : Editions Technip , 1997.

Watzky Alexandre Thermodynamique macroscopique à l'usage des étudiants en sciences de l'ingénieur [Ouvrage]. - Paris : De Boeck, 2007.

Williams H. Thomas Semantics in teaching introductory physics [Article] // American Journal of Physics. - 1999. - pp.670-680 : Vol. 67 (8). - pp. p.670-680.

Wipf Nicolas Pierre Duhem et la théorie du magnétisme fondée sur la thermodynamique. - Université de Lille : Thèse, 2011.

Wylen V. et Desrochers S. Thermodynamique appliquée [Ouvrage]. - Montréal : Du Renouveau pédagogique, 2ème édition, 1992.

II. SOURCES SECONDAIRES

Carnot Sadi Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propres à développer cette puissance [Ouvrage] Archives of the Académie des Science–Institut de France, Paris, 1878a

Carnot Sadi Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propres à développer cette puissance. [Ouvrage] Gauthier–Villars, Paris, 1878b

Carnot Sadi Réflexions sur la puissance motrice du feu sur les machines propres à développer cette puissance, [Ouvrage] édition critique par Fox Robert. Vrin J, Paris. [Ivi, Recherche d'une formule propre à représenter la puissance motrice de la vapeur d'eau], [1824] 1978

Carnot Sadi (s.d.) Notes sur les mathématiques, la physique et autres sujets. In: Carnot S (1878b), pp 89–102 [The manuscript is conserved In: Carnot S 1878a]

Gillispie CC, Pisano R Lazare and Sadi Carnot. A Scientific and Filial Relationship. [Ouvrage] 2nd edition. Springer, Dordrecht, 2014

Pisano R On Principles in Sadi Carnot's Thermodynamics (1824). Epistemological Reflections. *Almagest* 2/2010 :128–179, 2010

Pisano R, Bussotti P The Emergencies of Mechanics and Thermodynamics in the Western Society during 18th–19th Century. In: Pisano R (ed). *A Bridge between Conceptual Frameworks, Science, Society and Technology Studies*. Springer Dordrecht, 399–436, 2015

Smith C, Wise MN *Energy and Empire : A Biographical Study of Lord Kelvin*. Cambridge. The Cambridge University Press, 1989

Thomson William On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations. *Proceedings of The Cambridge Philosophical Society* 1/5:66–71, 1848–1849

Thomson William On an absolute thermometric scale founded on Carnot's theory of the motive power of heat, and calculated from Regnault's observations. *Mathematical and physical papers*, vol I. The Cambridge University Press, Cambridge, pp 100–106, 1851a

Thomson William On the dynamical theory of heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a thermal unit, and M. Regnault's observations on steam. *Mathematical and physical papers*, vol I. The Cambridge University Press, Cambridge, pp 175–183, 1851b

Thomson William An account of Carnot's theory of the motive power of heat with numerical results deduced from Regnault's experiments on steam. *Mathematical and physical papers by Sir William Thomson*, vol I. The Cambridge University Press, Cambridge, pp 113–155., [1882]1911

TABLE DES ILLUSTRATIONS

I. FIGURES

Figure 1 Thermoscope de Philon de Byzance	34
Figure 2 Thermoscope de Héron d'Alexandrie	35
Figure 3 Calorimètre de Laplace et de Lavoisier.....	45
Figure 4 Tableau des substances simples selon Lavoisier.....	47
Figure 5 Thermomètre de Rumford	48
Figure 6 Représentation de la machine à vapeur de Newcomen	52
Figure 7 Modèle pratique de l'indicateur de Watt	53
Figure 8 Illustration de la Machine idéale de Carnot.....	56
Figure 9 Cycle de Carnot d'une machine à vapeur (à son maximum de densité) idéale interprété graphiquement par Clapeyron.....	57
Figure 10 Dispositif de mesure de l'équivalence entre chaleur et travail.	60
Figure 11 Conclusion de l'article de Clausius de 1865 se référant à un système adiabatique isolé. En haut le texte original en allemand, en bas la traduction de Bessart	66
Figure 12 Diagramme (T,s) de la machine parfaite selon Gibbs.....	70
Figure 13 Représentations du gaz de Krönig (à gauche) et du gaz de Clausius (à droite)	72
Figure 14 Organisation de l'enseignement secondaire selon la réforme de 1902	91
Figure 15 Extrait du programme de la classe de Seconde A et B, 7 juin 1902	96
Figure 16 Extrait du programme de la classe de Philosophie, 7 juin 1902.....	97
Figure 17 Extrait du catalogue des appareils de sciences pour l'enseignement dans les lycées et les collèges	98
Figure 18 Extrait du Programme de l'école Polytechnique, 8 août 1903	109
Figure 19 Extrait du programme de l'Agrégation des sciences physiques, 1906	113
Figure 20 Diagrammes indicateurs du travail dans une machine à vapeur.....	138
Figure 21 Extrait du Programme de Mathématique spéciale, 1925	142
Figure 22 Extrait du programme de l'Agrégation des sciences physiques, 1912	143
Figure 23 Extrait du programme de l'Agrégation de sciences physiques, 1918.....	145
Figure 24 Diagramme Température Entropie pour un cycle de Rankine.....	153
Figure 25 Extrait du programme de mathématiques de 1942	156
Figure 26 Extrait du programme de Mathématiques paru au BO du 25 juillet 1957	167
Figure 27 La température et les sensations de chaud et de froid.....	171
Figure 28 Illustration de la théorie cinétique des gaz : mise en évidence de la structure lacunaire (à gauche) et illustration du chaos moléculaire (à droite)	172
Figure 29 Illustration de l'équivalence Chaleur Travail sur l'expérience de Tyndall	174
Figure 30 Application industrielle des échanges de chaleur	175
Figure 31 Extrait du programme section B et B'	184

Figure 32 Extrait du programme de Première C appliqué à la rentrée scolaire à compter de 1979	216
Figure 33 Extrait du programme de Première S et E, 1982	217
Figure 34 Représentations schématiques du système	229
Figure 35 Evolution des effectifs en CPGE entre 1947 et 2002	231
Figure 36 Poids relatif des CPGE face aux sections sélectives des sections STS et IUT	232
Figure 37 Extrait du Programme de la Classe P.....	235
Figure 38 Représentation des processus quasistatiques dans le diagramme de Clapeyron	249
Figure 39 Parts des bacheliers littéraires, scientifiques et économiques dans le baccalauréat général	252
Figure 40 Agence pour les économies d'énergie, publicité de 1977.....	253
Figure 41 Campagnes publicitaires anti-gaspi de l'AEE entre 1974 et 1979	254
Figure 42 Evolution du nombre de bacheliers de 1980 à 2014.....	260
Figure 43 Extrait du Programme de Chimie en Première S	270
Figure 44 Extrait du Programme de Physique en Première S.....	274
Figure 45 « L'énergie c'est quoi? ».....	278
Figure 46 Illustrations des chaines énergétiques : réacteur de fusée (figure haute) et réfrigérateur (figures basses).....	281
Figure 47 Chaîne énergétique du moteur thermique	282
Figure 48 Les différentes façons d'augmenter l'énergie microscopique d'un système : les transferts d'énergie.....	287
Figure 49 Organigramme des classes préparatoires scientifiques	292
Figure 50 Extrait du programme de thermodynamique de CPGE à compter de 1995...	295
Figure 51 Evolution des effectifs en CPGE à la suite des réformes des années 90	301
Figure 52 Représentation du dispositif à deux enceintes calorifugées.....	309
Figure 53 Extrait de l'exercice et de la correction	310
Figure 54 Référentiel en classe de 1ère S (sciences Physiques) Année scolaire 1994-1995	313
Figure 55 Représentation schématique du système Accompagnement des programmes Physique, classe de première S.....	314
Figure 56 Point méthode, Manuel Première S.....	315
Figure 57 Exercice de calorimétrie, Manuel 1ère S.....	316
Figure 58 Résolution de l'exercice de calorimétrie, Manuel 1ère S.....	316
Figure 59 Représentation schématique d'un système thermodynamique.....	323
Figure 60 Exemple de systèmes thermodynamiques non connexes.....	325
Figure 61 Schéma du compresseur proposé dans le sujet concours CCP 2005	330
Figure 62 Questionnaire du sujet « compresseur », CCP Deug 2005.....	331
Figure 63 Diagramme de Watt du compresseur (à gauche) et Diagramme de Clapeyron du gaz (à droite). Les étapes d'admission et de refoulement sont représentées par des points	333

Figure 64	Commentaire d'un étudiant sur un résultat attendu pour un compresseur ...	338
Figure 65	Système proposé par un étudiant pour l'étude énergétique du compresseur.	338
Figure 66	Copie d'étudiant rédigeant sa réponse en fonction du système clairement choisi au départ.....	339
Figure 67	Représentation schématique du piston du cylindre soumis au gaz parfait à la pression P_1 et à la pression atmosphérique P_{atm}	343
Figure 68	Représentation schématique des forces s'appliquant sur le système masse de gaz dans le cylindre + piston.....	345
Figure 69	Extrait du document La propagation de la chaleur : Un outil à l'usage des enseignants pour favoriser une continuité des apprentissages en sciences lors de la liaison primaire secondaire.....	354
Figure 70	Extrait de la publicité J'éco-rénove, j'économise.....	357
Figure 71	Extrait n°2 du programme de thermodynamique de CPGE à compter de 1995.....	386
Figure 72	Représentation de l'entropie selon Brosseau et Viard.....	400
Figure 73	Représentation conceptuelle de l'entropie dans le sens commun.....	401
Figure 74	Visualisation graphique du travail des forces pressantes. Cas du cycle triangulaire.....	410
Figure 75	Cycles triangulaires à partie infinitherme à pente négative.....	411
Figure 76	Cycles triangulaires à partie infinitherme à pente positive.....	412
Figure 77	Cycles à partie infinitherme et isotherme (à gauche) et adiabatique réversible (à droite).....	412
Figure 78	Cycle triangulaire étudié : cycle moteur.....	413
Figure 79	Premier calcul du travail.....	413
Figure 80	Evolution de la température avec le volume du système.....	416
Figure 81	Valeur de la température suivant les états finaux et initiaux. cas n°1.....	417
Figure 82	Valeur de la température suivant les états finaux et initiaux., cas n°2.....	418
Figure 83	Les différents cas accessibles pour la valeur de la température suivant les états finaux et initiaux.....	419
Figure 84	Evolution de la fonction $f_Q(V)$ représentative de la quantité d'énergie élémentaire échangée par transfert thermique sur la portion BC.....	420
Figure 85	Cycle triangulaire faisant apparaître le changement de signe sur la portion infinitherme : $\delta Q > 0$ entre B et N et $\delta Q < 0$ entre N et C.....	422
Figure 86	Cycle triangulaire dans le cas où $q=2$	424
Figure 87	Représentation graphique de Q_{BC} dans le cas où $k=11/4$ pour un gaz diatomique évoluant sur l'intervalle de volume $[1L ; 2L]$. L'aire entre la courbe (somme algébrique des parties hachurées) et l'axe des abscisses est nulle sur l'intervalle de volume considéré.....	425
Figure 88	Représentation graphique de la température T dans le cas où $k=11/4$ pour un gaz diatomique évoluant sur l'intervalle de volume $[1L ; 2L]$. Les volumes correspondant à la température maximum et au changement de signe de δQ_{BC} sont clairement distincts.....	426

Figure 89 Distinction entre le point B' correspondant à une température maximale atteinte par le système et le point N correspondant à un changement de signe de δQ 427

Figure 90 Diagramme à transformations adiabatique réversible et infinitherme 428

Figure 91 Représentation du rendement moteur pour un cycle à portion adiabatique, en fonction du paramètre q de la transformation 431

II. TABLEAUX

Tableau 1 Classification des transformations selon Clausius.....	68
Tableau 2 Répartition des horaires de mathématiques et de sciences physiques par classe et par semaine dans le second cycle.....	93
Tableau 3 Définir ce qu'il y a dans le système (à gauche). Référence à l'espace (à droite)	321
Tableau 4 Définir le système par son volume de contrôle.....	323
Tableau 5 Tableau synthétique des réponses des deux corrigés.....	335
Tableau 6 Tableau synthétique des réponses des étudiants.....	337
Tableau 7 Tableau bilan du sujet « compresseur »	342
Tableau 8 Illustration des définitions de chaleur et de température dans des dictionnaires usuels français	353
Tableau 9 Classification des définitions de « chaleur » dans des ouvrages du supérieur sur la période 1990-2012	362
Tableau 10 Résultats aux questions 1 3 et 4 du questionnaire sur le lien température chaleur	378
Tableau 11 Résultats aux questions lorsque chaque étudiant répond par Vrai ou Faux aux trois affirmations	379
Tableau 12 Résultats aux questions sur les transformations isotherme et adiabatique..	379
Tableau 13 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification de la température.....	381
Tableau 14 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification de la chaleur.....	382
Tableau 15 Répartition des réponses d'étudiants de niveau L2 sur la signification du transfert thermique.....	382

INDEX

A

adiabatique, 56, 66, 317, 323, 324, 338, 339, 342, 344,
345, 349, 352, 354, 355, 356, 388, 390, 417, 426,
435, 437, 441, 442, 444, 486, 490
agitation thermique, 75, 208, 229, 232, 262, 284, 373,
449, 487
agrégation, 12, 16, 22, 84, 102, 109, 113, 114, 115,
117, 119, 120, 122, 125, 145, 146, 147, 148, 188,
197, 379, 382, 395, 495, 503
Aristote, 23, 28, 29, 30, 31, 40, 83, 131

B

Bergé, 269, 271, 273, 306, 308
Berkeley, 170, 209, 244, 245, 510
Black, 23, 41, 42, 46, 52, 58, 375, 448, 493
Boltzmann, 75, 77, 164, 410, 413
Bouasse, 20, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109,
110, 114, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124,
125, 130, 134, 135, 138, 142, 143, 148, 149, 151,
154, 155, 158, 170, 191, 242, 306, 325, 359, 418
Bourdieu-Gros, 268, 269, 270
Boyer, 270, 271, 306, 307
Bruhat, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 156, 157, 164,
165, 191, 192, 201, 202, 204, 207, 208, 242, 252,
335, 358, 423
Brun, 149, 150, 153, 154, 155, 164, 166, 191, 384
Brunhes, 130, 143, 402, 403, 496

C

calorimétrie, 23, 39, 42, 87, 97, 99, 101, 104, 111, 112,
115, 119, 124, 130, 133, 134, 145, 146, 159, 160,
161, 171, 172, 174, 179, 220, 221, 225, 231, 323,
324, 364, 449
calorique, 6, 23, 41, 45, 46, 47, 48, 49, 54, 55, 56, 57,
61, 67, 78, 85, 88, 89, 114, 137, 183, 229, 375, 376,
378, 448
Carnot, 20, 53, 54, 55, 56, 57, 62, 63, 65, 67, 70, 72,
79, 80, 81, 99, 107, 108, 114, 119, 121, 129, 140,
141, 142, 146, 147, 151, 155, 156, 160, 165, 172,
173, 179, 181, 220, 223, 291, 420, 423, 442
chaleur

équivalent mécanique (de la), 86, 87, 88, 89, 99,
101, 114, 118, 124, 154, 181
latente, 42, 52, 61, 89, 298, 385
pompe (à), 14, 166, 249, 250, 261, 385, 452, 499
quantité de, 39, 41, 42, 44, 58, 61, 62, 75, 97, 104,
106, 107, 118, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 145,
146, 147, 151, 152, 153, 154, 155, 159, 160, 172,
174, 175, 177, 178, 200, 226, 228, 238, 248, 323,
361, 369, 375, 377, 380, 381, 383, 445, 481, 482,
485, 486
sensible, 61, 136
changement d'état, 41, 42, 43, 64, 71, 87, 97, 101,
111, 117, 146, 147, 159, 177, 362, 447, 462
Chanu, 191, 203, 204, 504
Chassagny, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109,
124, 128, 130, 132, 133, 134, 135, 138, 139, 140,
142, 176
Clapeyron, 56, 57, 62, 67, 156, 181, 255, 341, 423,
426, 498
Clausius, 20, 57, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 73, 74,
75, 76, 115, 121, 141, 158, 192, 199, 402, 409, 413,
418, 419, 420
colloque de Caen, 186, 188, 269
commission Lagarrigue, 24, 173, 211, 214, 215, 216,
219, 222, 223, 238, 256, 257, 261, 270, 277

D

dégradation de l'énergie, 69, 99, 108, 116, 121, 124,
129, 141, 142, 143, 144, 147, 157, 173, 181, 220,
230, 243, 262, 263, 290, 291, 292, 402, 420, 422,
447, 451
Descartes, 34, 37, 50, 83, 500
description microscopique, 67, 75, 88, 150, 170, 175,
176, 182, 190, 208, 219, 229, 241, 245, 247, 261,
262, 283, 299, 365, 371, 372, 374, 378, 392, 395,
449, 450
Duhem, 64, 78, 79, 80, 102, 325

E

Éducation nationale, 128, 169, 216, 267
Einstein, 81, 120, 162, 164, 172, 181, 182, 197, 207,
510
énergie

agitation (d'), 75, 76, 208, 229, 262, 283, 291, 395
 énergie calorifique, 104, 106, 107, 135, 136, 152, 158, 166, 172, 173, 180, 183, 194, 195, 200, 206, 220, 226, 227, 229, 230, 231, 262, 387
 énergie cinétique, 73, 75, 76, 77, 105, 106, 109, 118, 135, 136, 150, 152, 158, 176, 177, 182, 183, 196, 207, 208, 224, 225, 229, 231, 239, 242, 245, 246, 247, 262, 286, 364, 365, 371, 449, 486, 487
 énergie interne, 6, 64, 69, 70, 71, 73, 106, 107, 109, 116, 117, 118, 119, 121, 124, 125, 137, 138, 139, 147, 152, 153, 154, 158, 165, 166, 182, 183, 189, 195, 196, 197, 198, 206, 207, 208, 220, 221, 229, 230, 231, 232, 233, 238, 239, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 249, 250, 261, 262, 275, 277, 279, 286, 287, 288, 291, 293, 297, 298, 299, 302, 303, 323, 343, 344, 345, 348, 352, 354, 356, 357, 360, 361, 364, 367, 370, 374, 375, 376, 379, 381, 394, 399, 419, 427, 446, 449, 450, 451, 452, 485, 486, 488, 492, 507, 510
 énergie mécanique, 105, 106, 124, 135, 138, 152, 157, 158, 172, 173, 180, 183, 193, 194, 206, 212, 220, 221, 226, 228, 229, 230, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 262, 276, 277, 287, 288, 291, 319, 374, 409, 486
 énergie potentielle, 78, 105, 106, 108, 109, 135, 184, 232, 243, 244, 245, 246, 286, 287, 399, 409, 492
 énergie thermique, 135, 136, 137, 227, 247, 262, 275, 295, 364, 376, 387, 394
 enthalpie, 42, 161, 189, 302, 303, 343, 344, 345, 346, 348, 351, 353, 355, 356, 357, 376, 379, 381, 423, 427
 entropie, 6, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 64, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 77, 79, 108, 109, 116, 121, 124, 125, 142, 146, 147, 151, 155, 156, 157, 162, 164, 165, 189, 190, 191, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 225, 238, 239, 241, 243, 252, 302, 303, 304, 312, 313, 316, 373, 379, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 420, 421, 422, 423, 446, 448, 450, 451, 452, 453, 459, 461, 496, 510
 équilibre thermodynamique, 71, 256, 303, 334, 336, 339, 401, 406, 407, 458, 462, 467

F

Faivre-Dupaigre, 109, 117, 118, 119, 128, 130, 134, 135, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 160, 163, 191
 Fraudet, 130, 131, 132, 133, 502

G

Gamper, 253, 446
 Ganot, 87, 88, 504
 Gassendi, 30, 34, 36, 40, 492
 gaz parfait, 17, 73, 74, 76, 104, 146, 150, 151, 160, 208, 219, 223, 224, 225, 231, 238, 241, 243, 261, 262, 275, 279, 302, 316, 317, 319, 342, 343, 347, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 364, 399, 413, 426, 429, 432, 435, 436, 441, 444, 445, 516
 Gibbs, 22, 70, 71, 72, 79, 411, 423

H

Helmholtz, 58, 60, 61, 78, 86, 119
 Hulin
 Michel, 163, 215, 257, 262, 271, 277, 450
 Nicole, 4, 23, 84, 114, 115, 262
 humanités scientifiques, 94, 96, 213, 306

I

isotherme, 345, 346, 349, 388, 389, 390, 414, 426, 452, 455, 490, 516, 518

J

Joule, 58, 59, 60, 62, 64, 99, 111, 112, 119, 138, 139, 145, 163, 172, 177, 178, 181, 202, 208, 398, 407, 484
 Joyal, 191, 192, 194, 197, 202, 207, 243, 244, 246, 247, 249, 250, 251, 252, 255, 324

K

Kastler, 149, 191, 192, 193, 194, 197, 198, 200, 201, 202, 204, 208, 324, 335, 358
 kelvin, 62, 63

L

Lamirand, 109, 117, 118, 119, 130, 170, 191, 501, 504
 Laplace, 21, 23, 42, 43, 44, 45, 49, 89, 316, 317, 352, 375, 441, 448, 505
 Lavoisier, 21, 23, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 58, 89, 182, 375, 448, 505, 511
 Leygues, 22, 93, 448

M

machine frigorifique, 147, 155, 165, 166, 250, 382, 419, 453
 machine thermique, 70, 107, 130, 166, 291, 292, 357, 419, 421
 Massieu, 69, 70, 72, 491
 Maxwell, 75, 76, 77, 84, 413
 Mayer, 58, 484
 Mercier, 23, 191, 192, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 207, 208, 227, 229, 247

N

Newton, 29, 39, 40, 46, 49, 83, 507

O

Ollive, 130, 135, 136, 139, 140, 143, 165, 166, 508

P

Pascal, 34, 35, 40, 506
 Pérez, 247, 256, 403, 408, 409, 411
 Perrin, 80, 81, 95, 115, 149, 418, 509
 phlogistique, 39, 40, 41
 Planck, 77, 162, 208, 410, 418
 Prigogine, 191, 203, 204, 263, 312, 400, 409
 principe
 Carnot (de), 81, 115, 125, 129, 130, 139, 172, 173, 190, 418
 conservation (de), 46, 57, 60, 61, 63, 64, 67, 89, 99, 106, 107, 111, 115, 117, 118, 119, 121, 137, 138, 139, 142, 146, 147, 153, 154, 161, 163, 164, 165, 171, 181, 190, 195, 261, 279, 330, 404, 449, 503
 deuxième, 63, 65, 67, 77, 99, 119, 129, 151, 157, 177, 181, 190, 191, 199, 201, 202, 203, 204, 208, 209, 218, 220, 225, 252, 253, 254, 262, 263, 277, 291, 303, 312, 367, 396, 397, 398, 399, 400, 402, 403, 404, 405, 407, 408, 409, 410, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 436, 442, 444, 446, 449, 450, 452, 499, 510, 513
 équivalence (d'), 61, 106, 107, 108, 111, 113, 115, 116, 117, 120, 121, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 146, 147, 151, 154, 160, 161, 165, 172, 181, 184, 194, 239, 325, 419
 premier, 49, 60, 65, 77, 107, 109, 137, 139, 152, 154, 155, 157, 165, 171, 173, 179, 181, 190, 192, 195, 197, 202, 204, 208, 220, 221, 232, 233, 238, 239, 242, 244, 246, 247, 252, 261, 276, 277, 280,

292, 303, 321, 342, 346, 354, 356, 364, 370, 371, 373, 378, 397, 399, 400, 401, 403, 404, 406, 409, 432, 442, 448, 449, 450, 465, 483, 484, 485, 507

Q

quasistatique, 57, 253, 254, 255, 256, 263, 317, 406, 407, 408, 446

R

Rankine, 74, 75, 78, 156
 réversible, 16, 56, 77, 108, 120, 121, 151, 165, 190, 201, 203, 204, 209, 253, 254, 255, 256, 263, 264, 303, 342, 352, 353, 400, 402, 404, 405, 406, 407, 408, 412, 417, 418, 422, 426, 441, 442, 446, 452, 507
 Ribot, 90, 91, 92, 93, 94
 Roulet, 173, 232, 233, 234, 244, 250, 323, 326, 357, 359
 Rumford, 46, 47, 48, 49, 57, 61, 375, 448, 511

S

sensation, 10, 28, 30, 32, 36, 37, 88, 104, 131, 132, 149, 150, 174, 175, 224, 225, 283, 284, 361, 362, 385, 386, 391, 448, 449, 503, 514
 Société Française de Physique, 100, 214, 215, 271, 272
 système thermodynamique, 6, 24, 25, 109, 184, 185, 198, 201, 207, 234, 241, 248, 250, 252, 261, 263, 288, 297, 299, 302, 312, 314, 316, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 340, 341, 343, 349, 350, 353, 356, 357, 358, 359, 369, 398, 399, 402, 404, 418, 420, 450, 451, 455, 456, 457, 458, 460, 461, 462, 463, 465, 466, 467, 470, 471, 472, 483

T

température, 6, 21, 23, 24, 27, 31, 35, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 52, 54, 55, 56, 58, 61, 62, 63, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 85, 88, 97, 103, 104, 105, 117, 122, 124, 125, 130, 131, 132, 133, 134, 139, 149, 150, 151, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 182, 183, 190, 192, 194, 198, 199, 201, 202, 204, 206, 207, 208, 209, 219, 222, 223, 224, 225, 227, 228, 229, 231, 234, 235, 238, 239, 240, 241, 248, 249, 250, 253, 254, 261, 263, 275, 278, 283,

284, 292, 293, 296, 297, 298, 299, 302, 304, 312,
 316, 319, 323, 330, 334, 335, 336, 338, 340, 343,
 352, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367,
 368, 369, 370, 371, 372, 374, 375, 376, 378, 385,
 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 394, 395, 397,
 398, 399, 400, 401, 402, 407, 411, 412, 413, 416,
 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 429, 430,
 431, 432, 433, 435, 438, 439, 440, 441, 445, 446,
 447, 448, 449, 450, 451, 455, 456, 457, 461, 463,
 467, 469, 470, 471, 481, 482, 483, 484, 487, 490,
 504, 506

Thomson, 6, 9, 20, 23, 57, 61, 62, 63, 64, 86, 97, 166,
 215, 375, 418, 419, 512

transfert calorifique, 369, 377, 378, 481, 489

transfert thermique, 6, 25, 279, 280, 296, 297, 298,
 299, 304, 305, 306, 311, 317, 359, 360, 369, 371,
 373, 374, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383,
 384, 385, 386, 387, 388, 390, 391, 392, 393, 394,

395, 399, 401, 404, 411, 412, 413, 418, 419, 421,
 427, 429, 432, 433, 434, 435, 436, 439, 440, 441,
 442, 443, 444, 445, 446, 447, 451, 461, 481, 482,
 483, 484, 485, 486, 488, 489, 490

Tréherne, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181,
 182, 183, 184, 185, 207, 225, 234, 235

U

Union des Physiciens, 100, 182, 212, 214, 215, 256,
 271, 272, 308, 385

V

Verdet, 60, 86, 114

W

Watt, 52, 53, 56, 140, 160, 181, 340, 341