

50376
1976
176

50376
1976
176

N° d'ordre : 191

THESE

présentée
à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR INGENIEUR

par

Dominique GALARA

ingénieur I.M.A.

SUJET DE THESE

" CONTRIBUTION À L'AUTOMATISATION DES SÉCHOIRS
À TAMBOUR ROTATIF "



Soutenu le 24 Septembre 1976 devant la commission d'examen

Messieurs	P. VIDAL	Président
	C. MELIN	Rapporteur
	R. MEZENCEV	Examineurs
	R. CHAUSSARD	
	J.J. BIMBENET	Invités
	C. GASTINEAU	



030 053107 8

AVANT PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille 1, dans le cadre du contrat D.G.R.S.T. " Automatisation des séchoirs à fourrage ".

Nous tenons à exprimer notre grande reconnaissance à Monsieur le Professeur Pierre VIDAL pour l'enseignement qu'il nous a d'abord dispensé, puis pour son accueil au sein d'une équipe de recherche dynamique. Mais notre reconnaissance envers Monsieur le Professeur Pierre VIDAL ne saurait s'arrêter là puisqu'il a toujours été ensuite un guide sûr et conscient durant toute l'élaboration de cette thèse. Nous voudrions qu'il trouve ici l'expression de notre plus vive gratitude pour l'honneur qu'il nous fait d'accepter la présidence de ce jury.

Nous sommes très honorés par la présence de Monsieur le Professeur R. MEZENCEV qui nous a fait profiter largement de son expérience, ses critiques et ses conseils constructifs nous ont beaucoup aidés tout au long de nos travaux. Nous nous permettons de le remercier bien sincèrement.

Nous sommes très reconnaissants et remercions vivement Monsieur R. CHAUSSARD de s'être intéressé à nos travaux et de nous avoir fait l'honneur de participer à la commission d'examen.

Nous adressons notre grande reconnaissance à Monsieur C. MELIN qui nous a dirigé tout au long de cette étude. Son dynamisme, ses nombreux conseils et sa coopération constante ont assuré une forte cohésion et une saine émulation dans son équipe de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de notre plus profonde gratitude pour le soutien qu'il nous a toujours apporté.

Nous tenons également à remercier Monsieur J.J. BIMBENET de nous avoir apporté son expérience en matière de séchage des produits alimentaires et de nous avoir fait l'honneur de participer à cette commission d'examen.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Monsieur C. GASTINEAU, Directeur Scientifique de la Société France-Luzerne, pour la coopération et l'intérêt qu'il a sans cesse porté à ce travail et pour sa présence dans notre jury.

Qu'il nous soit permis ici de remercier la Délégation Générale à la recherche scientifique et technique, ainsi que la présidence et la direction des coopératives de Deshydratations d'Arcis sur Aube et de Recy qui ont permis d'entreprendre nos travaux.

Nous ne saurions terminer cet avant propos sans exprimer notre reconnaissance à tous les chercheurs, au personnel du laboratoire d'Automatique pour l'aide précieuse qu'ils nous ont apportée tant par leur présence amicale que par leur contribution à la mise en forme de ce mémoire.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les travaux que nous allons exposer s'intègrent dans le domaine de l'automatisation des processus industriels, c'est pourquoi ils ont été soutenus en particulier par la Délégation Générale à la recherche scientifique et technique dans le cadre d'une action concertée " Automatisation des séchoirs à fourrages " et par la Coopérative de Deshydratation d'Arcis sur Aube qui a consenti à l'investissement en matériel.

Le mémoire peut être décomposé en deux ensembles principaux :

a) le premier : organisé en trois chapitres, conduit à définir les grandeurs caractéristiques de la commande des séchoirs à tambour rotatif, et permettant d'assurer un rendement thermodynamique optimal en fonction des caractéristiques du séchoir.

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du problème de l'automatisation des séchoirs. On procède ensuite à l'analyse du processus du point de vue physique ce qui permet de le décomposer en sous systèmes que l'on présente séparément du point de vue qualitatif et quantitatif.

- Le second chapitre constitue un bref exposé de la conduite des séchoirs avant l'action concertée. Les objectifs de l'automatisation sont ensuite présentés. Enfin une étude expérimentale préliminaire effectuée sur un séchoir industriel est présentée.

Dans le but d'effectuer la simulation numérique d'un séchoir, l'élaboration d'un modèle mathématique représentant le fonctionnement moyen d'un tel procédé de transformation est présentée dans le troisième chapitre.

b) le second : est entièrement consacré à la mise en oeuvre pratique, sur un processus industriel en fonctionnement, des résultats théoriques obtenus précédemment. Diverses structures de commande caractérisées par la présence d'un modèle statique prédictif directement déduit des résultats de la première partie sont proposées.

- Le quatrième chapitre est consacré à l'élaboration d'une politique de commande à partir du modèle précédent. On y définit en particulier les grandeurs de commande et leur hiérarchie d'action.

- Le cinquième chapitre présente le système " temps réel " installé sur le site. Les problèmes d'acquisition de données, de positionnement automatique des actionneurs aux grandeurs de consigne, ainsi que l'implantation d'un capteur original de l'humidité résiduelle y sont également exposés.

- Le sixième chapitre présente les différentes propositions de commande d'un séchoir industriel. A cet effet on définit et on réalise en utilisant la facilité de mise en oeuvre des filtres digitaux un capteur original qui délivre à une certaine cadence d'échantillonnage la valeur de l'humidité initiale du produit vert. On décrit ensuite la commande assistée par ordinateur qui a été implantée sur le site. On expose enfin les problèmes d'une commande automatique intégrée des séchoirs à tambour rotatif.

NOTATIONS

D_{mf}	$\underline{\Delta}$	débit massique de combustible, kg/h
D_{mf}^v	$\underline{\Delta}$	débit massique de combustible estimé à partir du modèle, kg/h
L_f	$\underline{\Delta}$	pouvoir calorifique inférieur du combustible utilisé Kcal/h.kg
L_{sf}	$\underline{\Delta}$	chaleur sensible de réchauffage du combustible, Kcal/h.kg
t_{rf}	$\underline{\Delta}$	température de réchauffage du combustible °C
$C_{pfor}(t)$	$\underline{\Delta}$	capacité calorifique du combustible à la température t Kcal/h.°C
$C_{pgc}(A,t)$	$\underline{\Delta}$	capacité calorifique des gaz de combustion pour un taux de C_{O_2} et une température des gaz t. Kcal/h.°C
V_a	$\underline{\Delta}$	pouvoir comburivore du combustible $Nm^3/kg.$, kg/kg
$V_{f'}$	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène sec du combustible $Nm^3/kg.$, kg/kg
V_f	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène humide du combustible $Nm^3/kg.$, kg/kg
A_o	$\underline{\Delta}$	taux de CO_2 de la combustion stoechiométrique %
V_{ag}	$\underline{\Delta}$	pouvoir comburivore avec excès d'air sortie générateur $Nm^3/kg.$, kg/kg
$V_{f'g}$	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène sec avec excès d'air sortie générateur $Nm^3/kg.$, kg/kg
V_{fg}	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène humide avec excès d'air sortie générateur $Nm^3/kg.$, kg/kg
A_g	$\underline{\Delta}$	taux de CO_2 sortie générateur %
V_{at}	$\underline{\Delta}$	pouvoir comburivore avec excès d'air ramené à la sortie tambour $Nm^3/kg.$, kg/kg
V_{ft}	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène humide avec excès d'air ramené à la sortie tambour $Nm^3/kg.$, kg/kg
$V_{f't}$	$\underline{\Delta}$	pouvoir fumigène sec avec excès d'air ramené à la sortie tambour $Nm^3/kg.$, kg/kg
A_t	$\underline{\Delta}$	taux de CO_2 sortie tambour. %

$$L_{cd} = L_{c ds} + L_{cdv}$$

.../...

- L_{cd} $\underline{\Delta}$ chaleur sensible de l'air de combustion et de dilution kcal/h
- L_{cds} $\underline{\Delta}$ chaleur sensible de l'air sec de combustion et de dilution kcal/h
- L_{cdv} $\underline{\Delta}$ chaleur sensible de la vapeur d'eau associée à l'air de combustion et de dilution kcal/h

$$D_p = D_{ps} + D_{pv}$$

- D_p $\underline{\Delta}$ débit d'air parasite Nm^3/h , kg/h
- D_{ps} $\underline{\Delta}$ débit d'air sec parasite Nm^3/h , kg/h
- D_{pv} $\underline{\Delta}$ débit de vapeur associé à l'air parasite Nm^3/h , kg/h

$$D_{cd} = D_{cds} + D_{cdv}$$

- D_{cd} $\underline{\Delta}$ débit d'air de dilution et de combustion Nm^3/h , kg/h
- D_{cds} $\underline{\Delta}$ débit d'air sec de dilution et de combustion Nm^3/h , kg/h
- D_{cdv} $\underline{\Delta}$ débit de vapeur associé à l'air de dilution et de combustion

$$D_{gc} = D_{gs} + D_{vap}$$

- D_{gc} $\underline{\Delta}$ débit de gaz à la sortie cheminée Nm^3/h , kg/h
- D_{gs} $\underline{\Delta}$ débit de gaz sec à la sortie cheminée Nm^3/h , kg/h
- D_{vap} $\underline{\Delta}$ débit de vapeur à la sortie cheminée Nm^3/h , kg/h

- T_s $\underline{\Delta}$ température des gaz à la sortie du tambour °C
- T_{sm} $\underline{\Delta}$ température de sortie maximale des gaz sortie tambour °C
- T_e $\underline{\Delta}$ température des gaz sortie générateur °C
- T_a $\underline{\Delta}$ température ambiante de l'air ambiant °C

P_a $\underline{\Delta}$ pression ambiante de l'air ambiant mm Hg

φ_a $\underline{\Delta}$ degré hygrométrique de l'air ambiant

X_a $\underline{\Delta}$ teneur en eau de l'air ambiant kg/kg

$P_{vap}(t_a)$ $\underline{\Delta}$ pression de vapeur dans l'air ambiant mm Hg

T_{gh} $\underline{\Delta}$ température humide des gaz sortie tambour °C

- * $L_V(t)$ Δ chaleur latente de vaporisation de l'eau à t kcal/kg
- H_{gc} Δ hygrométrie des gaz sortie tambour %
- E_C Δ eau issue de la combustion du fuel/kg de combustible kg/kg, Nm³/kg
- Q_e Δ débit calorifique issue du générateur de gaz kcal/h
- * η Δ rendement de l'installation

$$D_{lv} = D_{ms} + E_t = D_{ms} + E_r + W = D_{ld} + W$$

- * D_{lv} Δ débit de luzerne verte à l'entrée du tambour kg/h
- * D_{lvo} Δ débit maximum de luzerne verte kg/h
- D_{ms} Δ débit de matière sèche associé à la luzerne kg/h
- D_{ld} Δ débit de luzerne déshydratée en sortie du tambour kg/h
- * E_t Δ débit d'eau totale contenue dans la luzerne verte kg/h
- * E_r Δ débit d'eau résiduelle contenue dans la luzerne séchée kg/h
- * W Δ débit d'eau évaporée issue de la luzerne kg/h
- * W_0 Δ capacité maximale d'évaporation du séchoir utilisé kg/h

$$D_{lv} (100 - H_V) = D_{ld} (100 - H_S)$$

- * H_V Δ humidité de la luzerne verte % (kg/kg)
 - * \tilde{H}_V Δ humidité estimée à partir des mesures de D_{lv} et V_t % (kg/kg)
 - * ΔH_V Δ terme correctif obtenu en comparant une estimation \tilde{H}_V et sa valeur mesurée à l'étuve H_V %
 - * H_S Δ humidité de la luzerne séchée %
 - * H_{SO} Δ humidité de consigne de la luzerne séchée %
- $$H_S = \frac{a H_t + b H_f}{100}$$
- H_t Δ humidité des tiges séchées %

- H_f Δ humidité des feuilles séchées %
 a Δ teneur en tiges de la luzerne séchée
 b Δ teneur en feuilles de la luzerne séchée
 \ast $C_{peau}(t)$ Δ capacité calorifique de l'eau à la température t (Pa = 760 mm Hg)
kcal / °C - kg
 \ast $C_{pvap}(t)$ Δ capacité calorifique de la vapeur à la température t (Pa = 760 mm Hg)
kcal/ °C - kg
 \ast $C_{pms}(t)$ Δ capacité calorifique de la matière sèche à la température t
kcal / °C - kg
 \ast t_{lv} Δ température de la luzerne verte °C
 \ast t_{ld} Δ température de la luzerne séchée °C
 H_c Δ hauteur de couche de la luzerne après la herse
 A_{mb} Δ ampérage des broyeurs A
 \ast t_f Δ dans notre cas on suppose que l'eau est vaporisée à 100 °C. °C
 et à la pression ambiante 760 mm Hg.

$$D_{ms} = c V_t + d$$

- \ast V_t Δ vitesse du tapis d'alimentation en luzerne verte m/mn
 c, d Δ coefficients de régression
 $V_{t\alpha}$ Δ vitesse de consigne du tapis d'alimentation en luzerne verte m/mn

$$H_s = f_s (F_c, T_c)$$

- F_c Δ fréquence lue au capteur d'humidité MHz
 T_c Δ température de la cellule de mesure °C
 F_t Δ fréquence de tarage à vide de la cellule °C.

CHAPITRE I

ANALYSE DU SECHAGE INDUSTRIEL

I.1 Introduction

On peut définir le séchage comme l'opération qui consiste à enlever totalement ou partiellement l'eau excédentaire contenue dans une matière. Cet excès est relatif et dépend de l'usage auquel on destine la matière en cause. Le séchage n'est donc qu'un cas particulier de l'évaporation mais avec des caractéristiques propres à ce phénomène. On peut ainsi définir deux problèmes importants :

- . l'évaporation, dont il faut définir les conditions
- . l'apport thermique, il convient de l'adapter

L'élaboration du produit déshydraté peut être représentée par le schéma suivant :

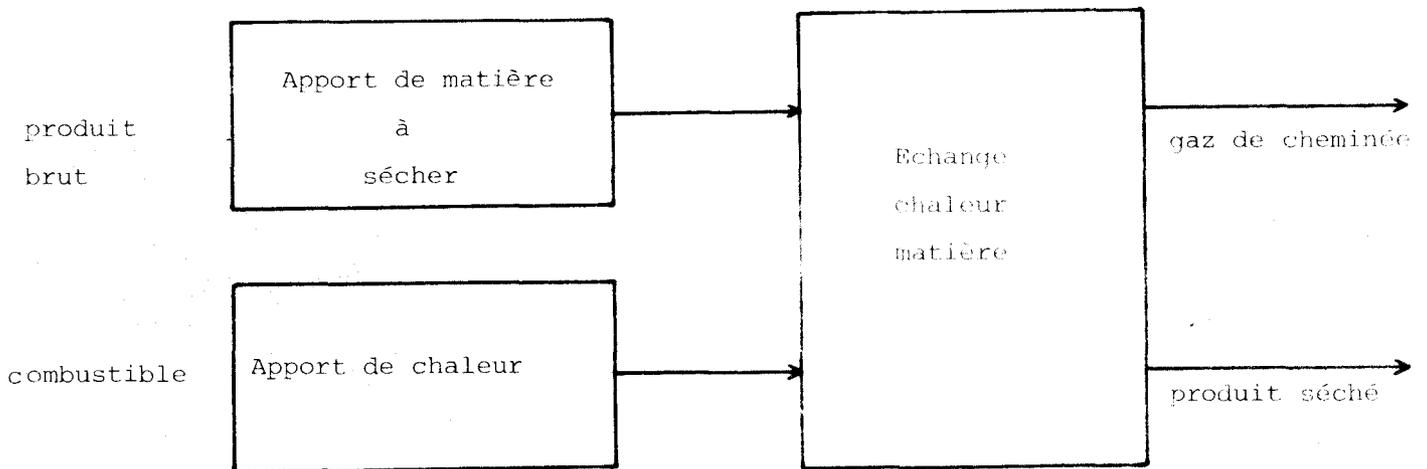


Figure 1.1.

L'opération de séchage amène deux remarques fondamentales pour la suite de l'exposé :

- . Il doit exister une adaptation de la quantité de chaleur à fournir, fonction des caractéristiques du produit brut et du but recherché en ce qui concerne le produit séché.
- . Il doit exister une adaptation entre la puissance de traitement de l'installation et la quantité de produit brut à fournir.

1.2 - Principes et objectifs de l'Automatisation :

La déshydratation industrielle des fourrages se propose de stabiliser le fourrage en vue de sa conservation dans le temps, tout en respectant les critères suivants (1) :

a) Rendement qualitatif :

Restitution maximale de la qualité initiale du produit (protéines, carotène, valeur nutritionnelle etc ...)

b) Rendement quantitatif :

Restitution maximale de la quantité de matière sèche présente dans la matière première.

c) Rendement énergétique :

Consommation minimale d'énergie (fuel oil, gaz, électricité) par unité de masse d'eau évaporée.

La matière première traitée, la luzerne, est un fourrage présentant des caractéristiques naturelles très variables. Trois sources principales d'hétérogénéité peuvent être retenues :

a) hétérogénéité de structure d'origine botanique, facteur directement en relation avec la présence simultanée de feuilles et de tiges. Le rapport surface/volume de ces deux éléments étant différents, il en résulte des comportements différents au séchage.

b) hétérogénéité de composition physicochimique (matières peptiques, sucre, cellulose, etc ...) variable dans le temps ainsi que dans les feuilles et les tiges.

c) hétérogénéité de distribution de l'eau " associée " à la matière première traitée, ce facteur étant directement en relation avec les conditions météorologiques (rosée, pluie, orage, brouillard ...)

Quel que soit l'état initial du fourrage traité, l'objectif de l'automatisation est de parvenir à une production de luzerne déshydratée présentant les caractéristiques optimales en ce qui concerne les rendements précédemment évoqués. Ceci peut être résumé de la façon suivante :

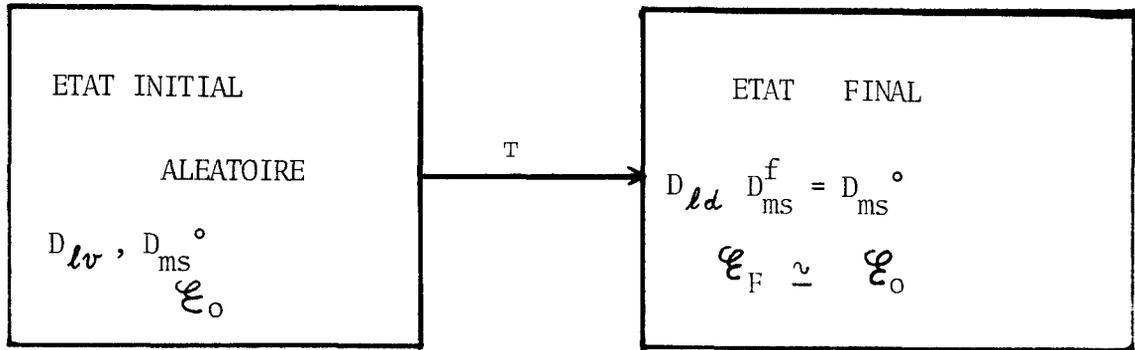


Figure 1.2.

D_{lv} \triangleq masse de produit vert

D_{ms} \triangleq masse de matière sèche contenue dans le produit vert

E_o \triangleq ensemble des grandeurs déterminant la qualité initiale du produit

La transformation T devant s'effectuer avec une consommation minimale d'énergie, celle-ci étant en partie fonction de la détermination de l'état final désiré. Dans ce sens les industriels déshydrateurs ont proposé un état final définit comme suit (1) :

- a) humidité des feuilles deshydratées la plus élevée possible mais inférieure ou égale à 16% :

$$H_f < 16\%$$

- b) humidité des tiges deshydratées la moins élevée possible mais égale ou supérieure à 16% :

$$H_t \geq 16\%$$

- c) la différence d'humidité entre les feuilles et les tiges devant être la plus faible possible :

$$\min (H_t - H_f)$$

Ces contraintes d'humidité du produit déshydraté doivent être considérées à la sortie du cyclone principal avant broyage. Elles constituent le critère de base de l'automatisation, celui-ci pouvant être résumé par la relation suivante :

$$(1.1) \left\{ H_s = \frac{a H_t + b H_f}{100} = 16\% \min (H_t - H_f) \right\}$$

a,b taux respectifs des tiges et des feuilles dans le produit séché.

Le fait d'obtenir une humidité minimale pour les tiges constitue une sécurité vis à vis de la conservation ultérieure du fourrage traité. Ne pas déshydrater des feuilles de manière excessive permet d'assurer la restitution de leurs caractéristiques qualitatives.

Les travaux que nous avons entrepris sont essentiellement centrés sur l'étude des moyens à mettre en oeuvre pour satisfaire le critère précédemment énoncé.

Les études expérimentales ont été réalisées par le Centre d'Automatique de Lille sur des séchoirs continus de capacité théorique d'évaporation de l'ordre de 17000 l/h, à la Coopérative de Recy et plus particulièrement à la Coopérative d'Arcis sur Aube qui a consenti à l'investissement initial en matériel.

1.3 - Analyse qualitative des séchoirs à fourrage :

Comme beaucoup d'unités industrielles de production, le séchoir doit réaliser une transformation précise de l'état physico-chimique du produit traité, pour cela il est composé d'un ensemble de sous-systèmes dont l'interconnection doit conduire à la réalisation de la transformation désirée, (figure 1.3). Le séchoir peut être décomposé en quatre sous systèmes :

- . un générateur de gaz chauds ,
- . une alimentation en luzerne verte ,
- . un tambour rotatif ,
- . un cyclone d'extraction ,

1.3.1. - Le générateur de gaz chauds :

Il doit délivrer la quantité de chaleur nécessaire au séchage de la luzerne, cette quantité de chaleur est une grandeur qui dépend des quantités de combustible, d'air primaire et secondaire. C'est une grandeur d'état alors que les débits de fuel, d'air primaire et secondaire sont des grandeurs de commande. Le fonctionnement du générateur est assuré par deux éléments principaux qui sont :

a) le brûleur : il est mixte, gaz ou fuel et à pulvérisation mécanique le combustible utilisé est du fuel oil lourd n°2 préalablement préchauffé à 120°C afin de lui assurer une bonne viscosité. L'air de combustion doit être réglé pour obtenir une teneur en gaz carbonique maximale de l'ordre de 10% dans les gaz de combustion.

b) l'air de dilution : il sert à refroidir les gaz de combustion à une température supportable par la luzerne. De plus il doit arriver dans la chambre de combustion dans une région où cette dernière est terminée afin de ne pas la perturber. En général l'air arrive par une double enveloppe dans laquelle il est réchauffé, et diminue par la même occasion les pertes par conduction avec l'air environnant.

1.3.2. - le système d'alimentation en luzerne verte :

C'est un élévateur incliné reposant sur une dalle de béton destinée au préstockage. La luzerne remonte et rencontre en fin de parcours une herse de hauteur réglable qui permet d'obtenir une épaisseur de couche constante, l'excédent étant rejeté en amont. Un système de reprise amène ensuite la luzerne à la goulotte d'alimentation située à la partie supérieure entre le four et l'entrée du tambour, d'où elle tombe dans le tambour. L'état initial du produit constitue la principale perturbation de l'opération de séchage.

1.3.3. - le tambour rotatif :

De part sa conception, le séchage s'effectue de façon antiméthodique, c'est-à-dire que le produit et les gaz de séchage vont dans le même sens, tous deux étant aspirés par un ventilateur d'extraction situé en aval du tambour. Ce dernier est constitué d'un tube rotatif posé sur des galets d'entraînement mus par un moto réducteur qui permet d'agir sur la vitesse de rotation. L'intérieur est muni de pales d'homogénéisation qui brassent le produit et assurent ainsi un meilleur contact gaz produit.

1.3.4. - le cyclone d'extraction :

Situé en sortie tambour, il assure la séparation du produit séché et des gaz de séchage.

1.4 - Analyse quantitative des séchoirs à fourrages

La déshydratation industrielle des fourrages met en oeuvre deux phénomènes fondamentaux :

- . un transfert de masse
- . un transfert de chaleur

1.4.1. - Le tambour :

C'est à l'intérieur que s'effectuent simultanément le transfert de masse et de chaleur. Ces deux transferts sont liés, l'eau se vaporise dans l'air chaud pour autant que la pression de vapeur du produit soit inférieure à celle du gaz. L'air chaud et sec passe au contact du produit, il lui cède une quantité de chaleur et reçoit une certaine quantité d'eau et ressort ainsi refroidi et humide. La quantité de chaleur mise en oeuvre sert à évaporer l'eau et à compenser les pertes associées à l'opération de séchage:

$$(1.2) \quad C P L = C T N + Q \quad \text{en kcal}$$

$C P L$ $\underline{\Delta}$ chaleur pratique libérée

$C T N$ $\underline{\Delta}$ chaleur théorique nécessaire

Q $\underline{\Delta}$ pertes

Nous considérons que la chaleur théorique nécessaire est égale à la variation d'enthalpie de la charge entre son état initial et final soit par unité de masse :

$$(1.3) \quad C T N = W \cdot \left\{ \int_{t_{\ell v}}^{t_f} C_{\text{peau}}(T) dT + L_v (t_f) \right\}$$

1.4.1.2. - Pertes associées à l'opération de séchage :

Elles ont diverses origines, certaines sont chiffrables d'autres le sont très difficilement, on peut néanmoins dresser la liste nominative suivante :

a) pertes par réchauffage de la matière sèche : C_{ms}

$$(1.4) \quad C_{ms} = D_{ms} \int_{t_{\ell v}}^{t_{\ell d}} C_{p \text{ ms}} (T) dt$$

b) pertes par réchauffage de l'eau résiduelle : C_{er}

$$(1.5) \quad C_{er} = E_r \int_{t_{\ell v}}^{t_{\ell d}} C_{p \text{ eau}} (T) dt$$

c) pertes par les fumées issues du générateur de gaz chauds et de l'air parasite : C_{gc}

$$(1.6) \quad C_{gc} = D_{mf} V_{Fg} C_{pgc} (A_t, T_s) T_s$$

d) pertes par surchauffe de la vapeur d'eau : C_{sv}

$$(1.7) \quad C_{sv} = W \int_{100}^T C_{pvap} (t) dt$$

e) pertes par rayonnement et conduction des parois, elles sont difficilement chiffrables sauf par bilan de matière et chaleur, soit C_{rc} en kcal/h

L'expression de la chaleur pratique nécessaire au séchage et des pertes est alors :

$$(1.8) \quad C_{PL} = C_{TN} + C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc}$$

$$Q = C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc}$$

1.4.2. - Elaboration de la quantité de chaleur nécessaire au séchage :

La fonction du générateur de gaz chaud est de fournir la quantité de chaleur nécessaire à la transformation envisagée.

Cette quantité de chaleur est apportée par le pouvoir calorifique du combustible utilisé ainsi que par la chaleur sensible de l'air de combustion et de dilution, et par la chaleur de réchauffage du combustible avant injection dans le brûleur. L'expression de la chaleur pratique libérée est alors :

$$(1.9) \quad \text{CPL} = D_{mf} (L_f + L_{sf}) + L_{c ds} + L_{c dv}$$

La chaleur sensible de l'air de combustion et de dilution est exprimée par la relation suivante :

$$(1.10) \quad L_{c ds} + L_{c dv} = D_{mf} V_{Ag} \left\{ \int_0^{t_a} C_{pair} (T) dT + X_a \int_0^{t_a} C_{pvap} (T) dT \right\}$$

La chaleur de réchauffage est obtenue par :

$$(1.11) \quad L_{sf} = \int_0^{t_{rf}} C_{pFO2} (T) dT.$$

* 1.4.3. - Rendement de l'installation :

Le rendement de l'installation constitue un indice de qualité qu'il convient de prendre en compte. Nous le définissons comme le rapport de la chaleur théorique nécessaire à la chaleur pratique libérée. Soit :

$$(1.12) \quad \boxed{\eta = \frac{\text{CTN}}{\text{CPL}}}$$

1.5 - Conclusions relatives à l'analyse formelle des séchoirs :

L'analyse macroscopique des séchoirs nous a permis de reconnaître les principales grandeurs physiques mises en oeuvre. Il nous faut également connaître l'influence de chacune d'elles sur le phénomène du séchage. En effet le but de l'automatisation est d'obtenir, à partir de conditions initiales bien établies, un produit séché dont les caractéristiques ont été précédemment définies, tout en maximisant les rendements qualitatifs,

quantitatif et énergétique. Afin de satisfaire ces exigences il convient d'analyser la part de chaque paramètre à l'élaboration d'une telle politique. Nous allons donc étudier les différents points de cette dernière et dresser la liste des grandeurs physiques dont la connaissance ou l'ajustement sera nécessaire :

1.5.1. - Rendement qualitatif :

Le but est de restituer la qualité et la valeur nutritionnelle^h du produit vert. Cette étude n'appartient pas au cadre général de cette thèse. Elle a été réalisée dans les laboratoires de l'ENSIA de MASSY. Les conclusions générales indiquent que le rendement qualitatif est fonction du débit de gaz de séchage, de la température d'entrée des gaz dans le tambour, et de la vitesse de rotation de ce dernier. Dans le cas de l'unité étudiée, le débit de gaz est commandé pour un ventilateur d'extraction qui est à régime fixe; nous ne tiendrons pas compte de ce paramètre par contre il convient d'appréhender la température d'entrée des gaz dans le tambour ainsi que sa vitesse de rotation :

T_e Δ température des gaz sortie générateur de gaz °C

N Δ vitesse de rotation (tours/minute)

1.5.2. - Rendement quantitatif :

Les études effectuées à Massy et l'expérience des techniciens déshydrateurs ont confirmées la nécessité d'adapter la température d'entrée des gaz de séchage dans le tambour à l'humidité du produit vert. Il convient donc de prendre en compte, ou d'estimer, le taux d'humidité du produit vert :

H_v = humidité de la luzerne verte.

1.5.3. - Rendement énergétique :

Nous l'avons défini comme :

$$\eta = \frac{CTN}{CPL} = \frac{CTN}{CTN + Q}$$

L'amélioration de ce rendement nécessite la diminution des pertes :

$$Q = C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc}$$

A partir de la définition de chacun de ces termes nous pouvons faire les remarques suivantes :

- . Il ne faut pas surchauffer les gaz en sortie afin d'éliminer C_{sv} d'où nécessité de mesurer la température de sortie des gaz du tambour.
- . Afin de diminuer les pertes par les gaz de cheminée il convient de les surcharger en vapeur d'eau. Il faut mesurer l'humidité des gaz de cheminée. Cette remarque implique également la nécessité de faire fonctionner à plein régime l'installation et d'éviter les à-coups dans l'alimentation en luzerne verte.
- . Afin de ne pas surchauffer les gaz à la sortie du tambour il est nécessaire d'adapter la quantité de combustible en fonction du débit de luzerne verte et des taux d'humidité initial et final.

En résumé les grandeurs dont la connaissance ou l'ajustement est nécessaire sont :

T_s Δ température des gaz sortie tambour

H_{gc} Δ humidité des gaz sortie tambour

D_{mf} Δ débit massique de combustible

D_{lv} Δ débit massique de luzerne verte

H_v Δ humidité de la luzerne verte

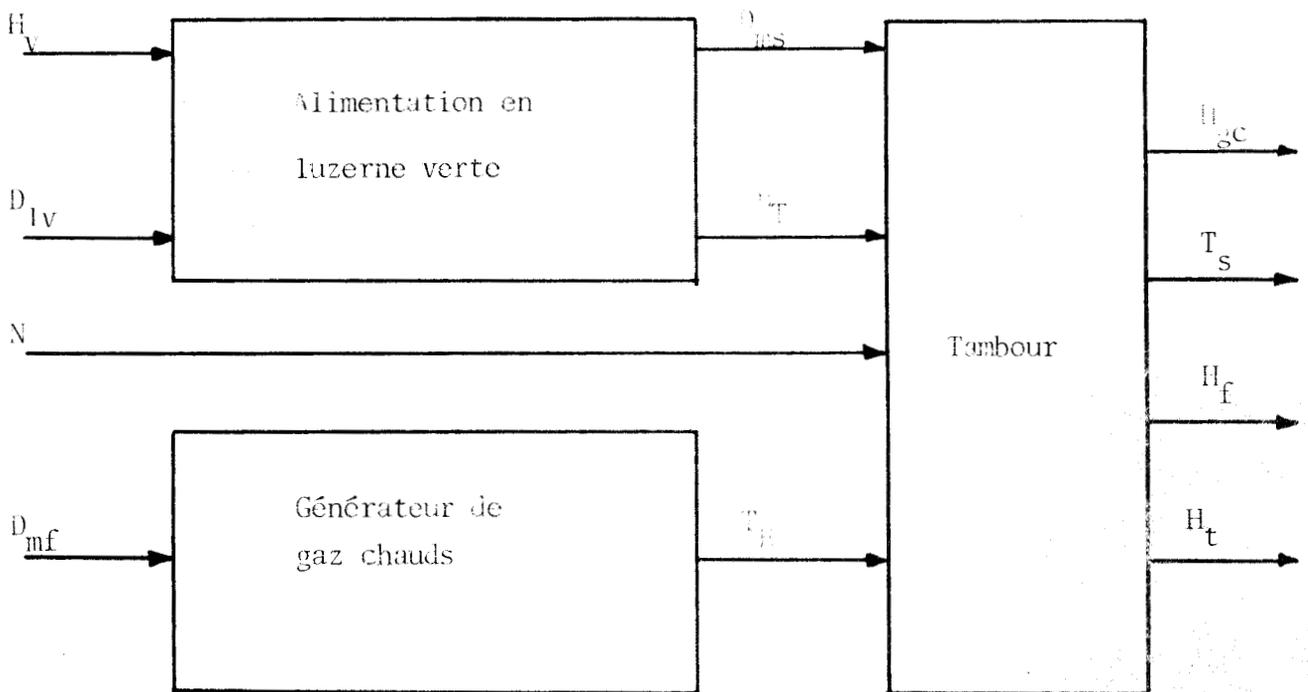
A cet ensemble de grandeurs il convient d'associer le taux d'humidité du produit quittant le tambour.

La valeur de ce dernier constitue une des contraintes à imputer :

$$\left\{ H_s = \frac{aH_t + bH_f}{100} = 16\%; (H_t - H_f) \text{ minimum} \right\}$$

La satisfaction d'un tel critère nécessite la mesure des taux d'humidité des tiges et des feuilles. De plus il convient de déterminer les grandeurs susceptibles d'agir sur la valeur du taux final d'humidité désiré.

La discussion précédente est résumée par le schéma de la figure (1.4).



$D_{ms} \triangleq$ débit massique de matière sèche

$E_T \triangleq$ eau contenue dans la luzerne

Figure 1.4

Parmi l'ensemble des grandeurs physiques intervenant dans le procédé deux classes peuvent être distinguées :

a) variables d'entrée :

Ensemble des grandeurs qui influencent la réalisation du séchage

et donc les valeurs des différents critères, à savoir :

- D_{lv} Δ débit massique de luzerne verte
 H_v Δ humidité du produit vert
 N Δ rotation de tambour
 T_e Δ température d'entrée des gaz de séchage dans le tambour
 Q_e Δ quantité de chaleur émise par le générateur mais elle n'est pas mesurable
 D_{mf} Δ débit massique de combustible

b) variables de sortie :

Ensemble des grandeurs dépendantes des conditions initiales du séchage :

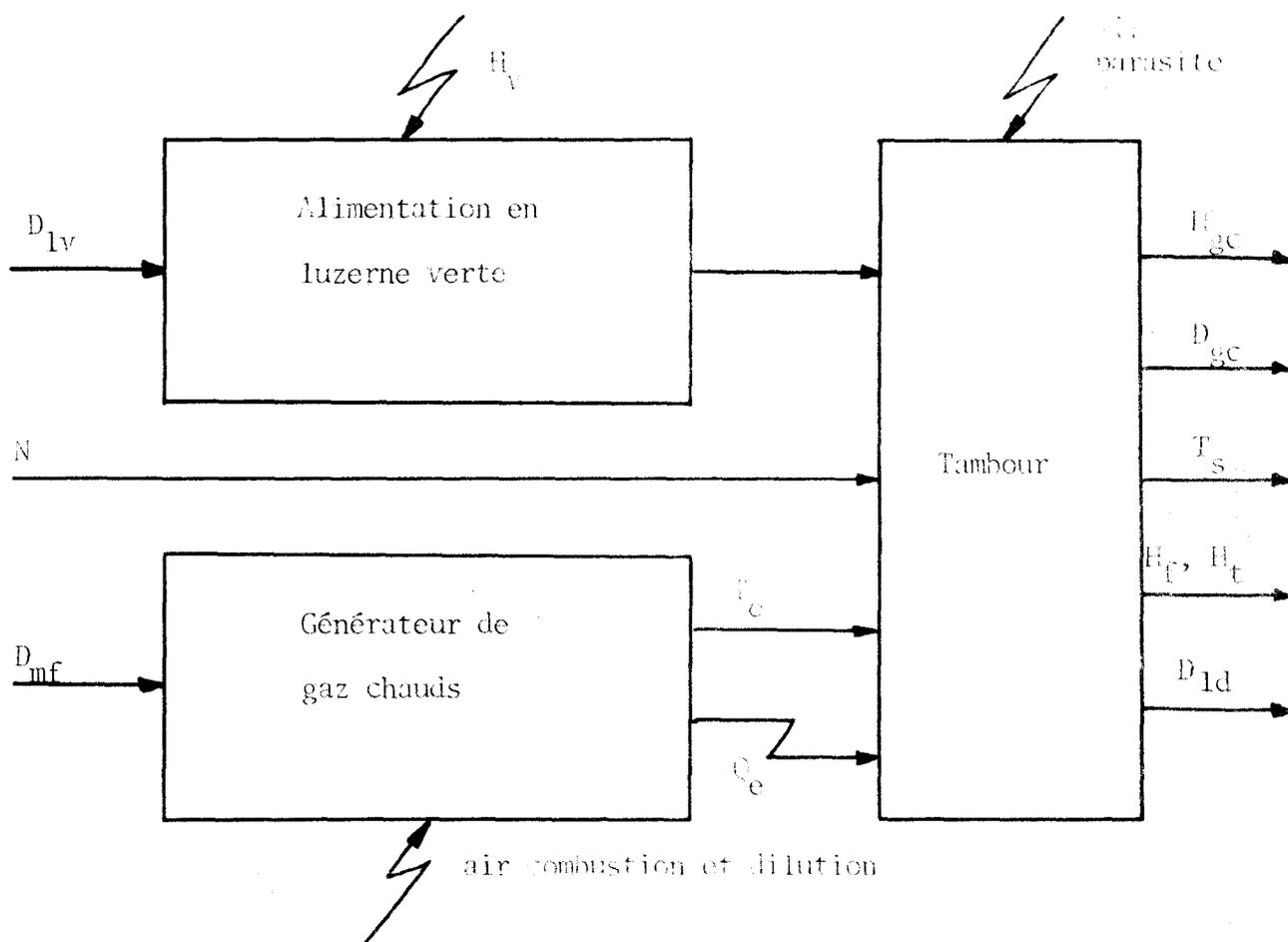
- H_{gc} Δ taux de vapeur d'eau associé aux gaz de cheminée
 T_s Δ température des gaz en sortie tambour
 H_f Δ humidité des feuilles séchées
 H_t Δ humidité des tiges séchées
 D_{ld} Δ débit de matière déshydratée
 D_{gc} Δ débit des gaz en sortie de la cheminée

Une telle description serait incomplète si nous n'évoquions pas le problème des variables qui ne sont ni des variables d'entrée ni des variables de sortie mais dont l'influence n'est pas négligeable sur le procédé de séchage. Le but n'est pas de dresser la liste de toutes les perturbations, mais il convient d'énumérer les principales :

- Air de combustion et de dilution : les débits correspondants ne sont ni mesurables ni commandables. Il en résulte des perturbations sur la température des gaz de sortie du générateur et sur la quantité de chaleur émise.

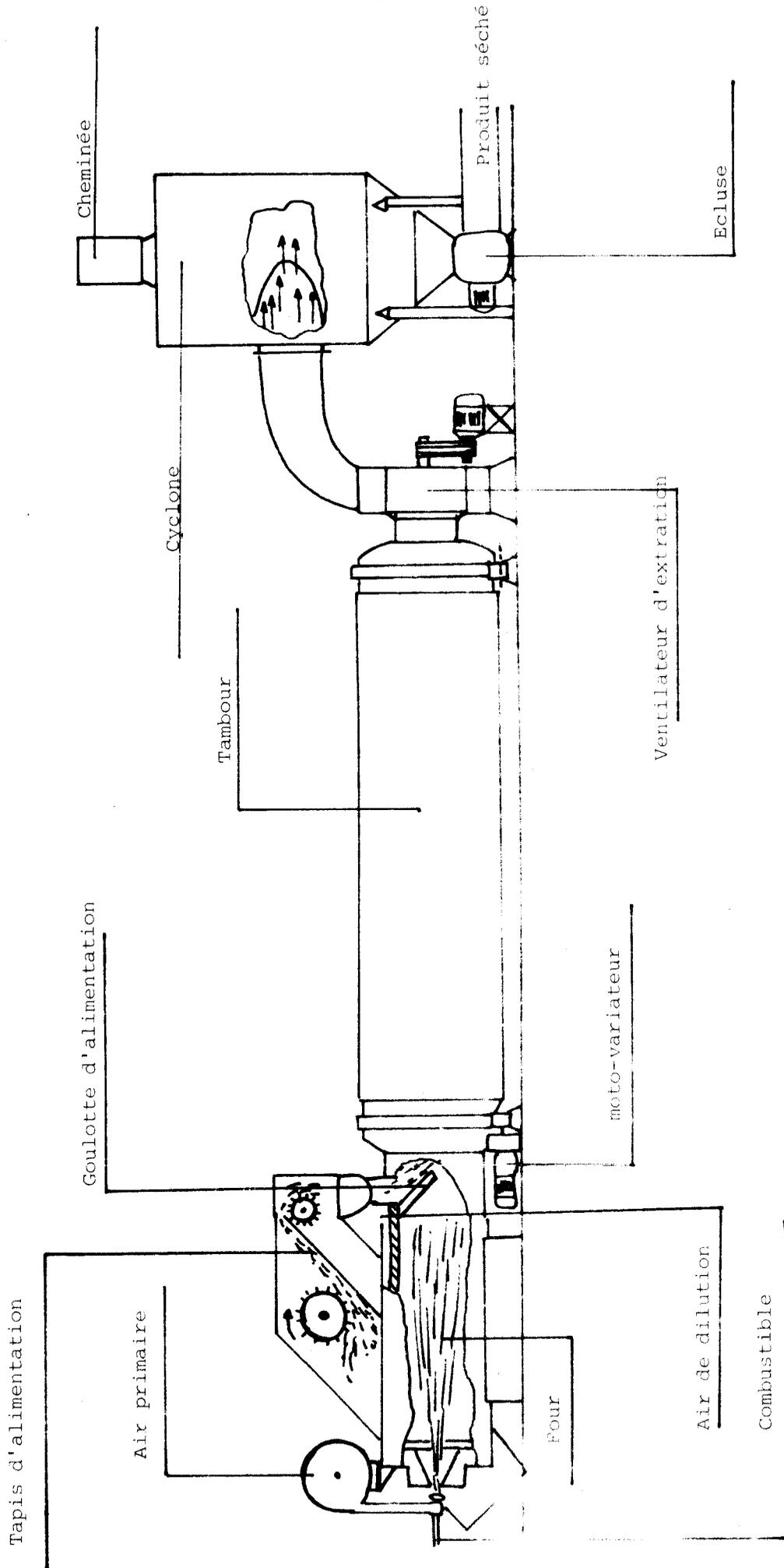
- Air parasite : cet air pénètre dans le séchoir par tous les orifices petits ou grands et il peut atteindre des débits qui sont loin d'être négligeables.
- température de réchauffage du combustible : elle conditionne la combustion et par conséquent la température des gaz et la quantité de chaleur émise.
- les conditions météorologiques perturbent l'humidité du produit vert et constitue ainsi la principale perturbation du procédé.
- la nature de la luzerne, son origine de coupe et son hachage.

Une description plus détaillée du système est représentée figure 1.5.



1.6 - Conclusion : Figure 1.5.

Nous venons de formuler le but de l'automatisation des séchoirs à fourrages en introduisant les différents rendements qui devront être améliorés par une conduite automatique. Le système est présenté sous une forme générale par ses entrées et ses sorties. Avant de mettre en oeuvre une politique de commande il convient d'étudier le phénomène du séchage afin d'en préciser les conditions et d'obtenir ainsi une "boîte grise" entre grandeurs d'entrées et de sorties.



C H A P I T R E I I

ETUDE DU SECHAGE INDUSTRIEL ET PRESENTATION

DE L'AUTOMATISATION DES SECHOIRS.

II.1 Introduction

Le contrôle, la régulation et la conception d'un processus de séchage en vue de son automatisation dépendent des critères qualitatifs et quantitatifs cités précédemment, mais avant qu'il soit possible d'entreprendre les réglages et les mesures sur le processus, il est nécessaire d'identifier les grandeurs physiques qui en sont les causes et les effets.

Dans ce sens après avoir défini le but de l'automatisation des séchoirs il convient de présenter l'état actuel de la conduite des séchoirs afin de mieux préciser les différents points à remplir pour l'automatisation des séchoirs.

On présente ensuite les résultats d'une campagne expérimentale effectuée sur un séchoir industriel.

II.2 Etat de la conduite des séchoirs avant l'action concertée

Le séchage comme nous l'avons vu est un procédé qui consiste à retirer un liquide d'une matière, c'est une opération industrielle que l'on rencontre fréquemment dans la fabrication du papier, des tissus, des carreaux de plâtre, etc ...

L'eau n'est jamais complètement retirée sinon on altère la luzerne, le but du séchage est d'oter suffisamment d'humidité pour que le produit séché puisse subir d'autres transformations et conserver ses propriétés nutritives.

Pour obtenir la luzerne séchée dans un état donné, l'opérateur humain doit en fonction des informations qu'il possède sur l'état du produit et du séchoir, réagir sur le processus. (avec les actions dont il dispose).

L'opérateur humain élabore un concept de conduite et de contrôle des séchoirs au fur et à mesure de son apprentissage et de son expérience acquis sur le site.

.../...

II.2.

Ce modèle intuitif est réajusté en fonction de l'environnement, des informations acquises sur le processus, et des moyens d'action disponibles pour réagir sur le processus.

Une telle conception se résume comme suit :

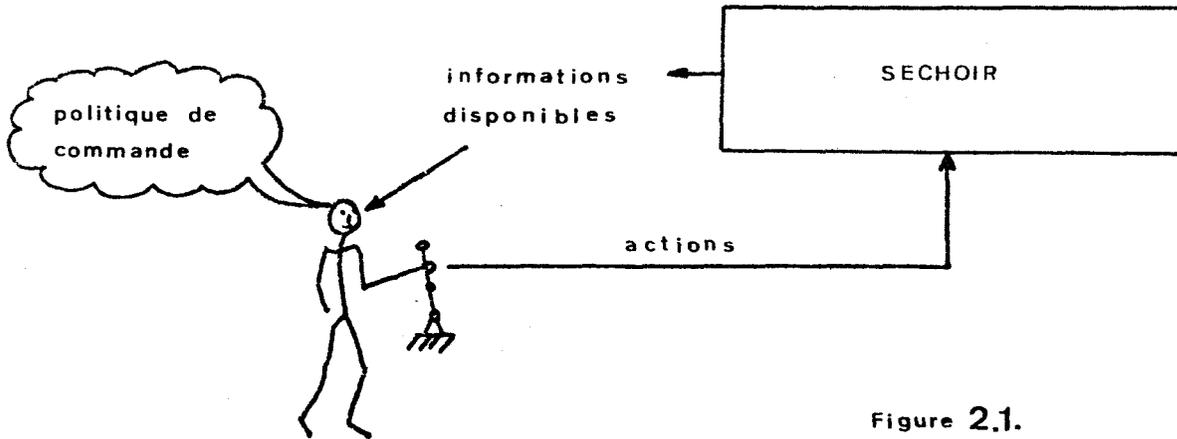


Figure 2.1.

2.2.1. Informations disponibles :

Sur les séchoirs industriels cette information est très limitée l'opérateur possède en fait deux sources différentes d'informations :

a) Informations par capteur physique : elles sont en nombre limitées

- Température des gaz de séchage à l'entrée du tambour T_e
- Température des gaz à la sortie du tambour T_s
- Vitesse de rotation tambour N
- Vitesse de défilement du tapis d'alimentation en produit V_t
- Ampérage des broyeurs A_{mb}

b) Informations visuelles ou organoleptique :

- Humidité de la luzerne verte
- Humidité de la luzerne séchée
- Opacité des gaz à la sortie cheminée
- Texture de la luzerne.

.../...

2.2.2. Actions disponibles

- Vitesse du tapis d'alimentation en produit V_t
- Vitesse de rotation du tambour N
- Température de consigne des gaz à la sortie du tambour T_{sc}
- Débit des gaz de cheminée D_{gc} sur certains séchoirs

2.2.3. Présentation de la politique de commande :

Le modèle de conduite intuitif de l'opérateur humain permet d'élaborer un produit séché présentant les caractéristiques d'humidité désirées grâce à une adjonction d'eau avant compactage sur le produit sec.

Il est également facile de concevoir qu'en fonction de l'opérateur humain, la conduite sera différente. Néanmoins les préoccupations sont les mêmes et la coordination des tâches se résume comme suit.

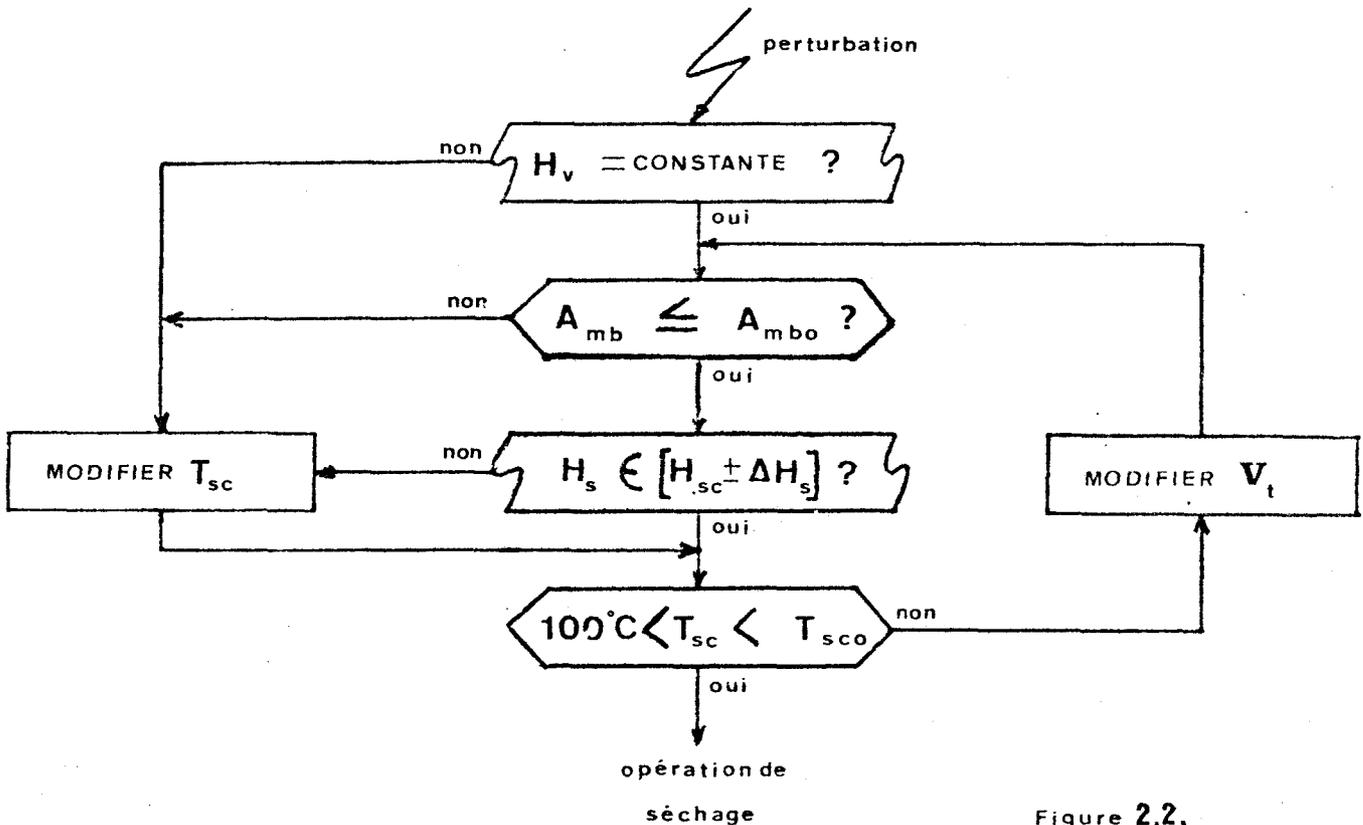


Figure 2.2.

Une telle coordination des tâches est due au fait qu'il existe une régulation de la température des gaz de sortie qui agit sur le débit de combustible. (régulation installée par le constructeur du séchoir).

...../...

La politique de commande se décompose comme suit :

- Dès que l'humidité du produit vert varie l'opérateur réagit en tendance sur la température de consigne des gaz à la sortie du tambour. Dans la plupart des cas il y arrive très difficilement.
- L'ampérage des broyeurs ne doit pas dépasser un seuil A_{mbo} au dessus duquel il y aurait bourrage de ceux-ci et par conséquent immobilisation de l'installation pendant quelques heures.
- Enfin il essaye de réguler l'humidité du produit séché en agissant sur la température de consigne T_{sc} , car il a remarqué qu'il existe une "corrélation" entre T_s et H_s .

En fait sur toutes les installations étudiées nous avons remarqué que l'humidité du produit séché était très inférieure à celle souhaitée. et.Ceci afin d'éviter les ennuis de conduite en particulier le bourrage des broyeurs.

- En ce qui concerne la température de consigne T_{sc} elle varie dans une "fourchette" importante en fonction de l'opérateur conduisant le séchoir. Néanmoins lorsqu'elle est trop élevée on agit sur la vitesse du tapis d'alimentation en produit afin de la faire diminuer.

2.2.4. Conséquence d'une telle politique de conduite :

Compte tenu des informations dont il dispose l'opérateur ne peut pas prendre en compte les fluctuations d'humidité du produit vert et doit donc les subir ce qui entraîne la plupart du temps de sérieuses perturbations.

Le système de régulation proposé par les constructeurs ne permet pas de réguler l'humidité du produit séché. De plus comme nous l'avons constaté, l'humidité du produit séché était toujours inférieure à celle désirée ce qui conduisait à rajouter de la vapeur d'eau aux presses afin d'obtenir le taux d'humidité de référence commercial soit 11 %.

Dans le but d'économiser de l'énergie l'opérateur ne peut pas charger les gaz de séchage de sortie au maximum d'eau car il n'en connaît pas la teneur.

Enfin en ce qui concerne la restitution des qualités nutritives du produit vert et la quantité de matière sèche à l'entrée du séchoir des mesures permettent de constater des pertes en sortie de séchoir.

Il convient donc de présenter les différents axes de recherches en vue de l'automatisation des séchoirs.

* II.3. Motivations de l'automatisation des séchoirs

Celle-ci ne peut se faire que par une amélioration de la connaissance du phénomène de séchage, qui peut être obtenue par l'élaboration de modèles mathématiques dont les objectifs sont multiples :

a) Ce modèle doit fournir aux utilisateurs les moyens de parvenir à une production de luzerne deshydratée présentant les caractéristiques optimales en ce qui concerne les rendements évoqués au premier chapitre. Ces études sont menées par l'ENSIA de Massy. Elles doivent aboutir à l'élaboration de consignes de fonctionnement afin de limiter les pertes du feu et les pertes de qualités nutritives si elles existent.

b) Les études effectuées au laboratoire d'automatique de Lille doivent aboutir à la présentation d'une politique de commande qui respecte les différents critères "émis" au premier chapitre et qui intègre les consignes de fonctionnement élaborées par l'ENSIA. Dans ce sens il convient de les préciser

2.3.1. Amélioration du rendement quantitatif :

L'objectif à atteindre est de limiter les pertes au feu subies par le produit au cours de l'opération de séchage. Des études effectuées par l'E.N.S.I.A. doivent mettre en évidence une adaptation de la température des gaz entrée séchoir en fonction de l'humidité du produit vert.

2.3.2. Amélioration du rendement qualitatif

Il s'agit d'analyser la dégradation si elle existe des qualités nutritives de la luzerne au cours de l'opération de séchage. Au cas où celle-ci serait mise en évidence il conviendrait alors d'élaborer des consignes d'exploitation afin de minimiser ces pertes.

2.3.3. Amélioration du rendement énergétique :

La politique de commande doit permettre d'assurer une consommation minimale d'énergie par unité masse d'eau évaporée tout en respectant les critères qualitatifs et quantitatifs.

2.3.4. Régulation de l'humidité du produit séché

Quelle que soit l'humidité initiale du produit l'opération de séchage doit permettre d'obtenir un produit séché présentant les caractéristiques énoncées au premier chapitre.

$$H_f \leq 16 \% \quad - \text{ humidité des feuilles}$$

$$H_t \geq 16 \% \quad - \text{ humidité des tiges}$$

$$\min (H_f - H_t) \quad \text{et} \quad \frac{aH_f + bH_t}{100} = 16 \%$$

Le même système de séchage est utilisé pour sécher les feuilles et les tiges de luzerne. Comme leur constitution est très différente le séchage de ces deux parties sera donc différent.

Des essais effectués (1) ont permis de mettre en évidence que l'humidité différentielle feuilles-tiges ne peut être inférieure à un seuil donné pour des conditions normales de séchage. Ce seuil dépend également du séchoir utilisé. C'est pourquoi dans notre cas nous nous intéresserons plus particulièrement à l'humidité des tiges, celles-ci constituent en effet la plus grande part de la production.

2.3.4. Politique de commande des séchoirs :

La politique de commande des séchoirs répond à d'autres impératifs que celle adoptée par l'opérateur humain en fonction des informations qui lui étaient accessibles.

L'automatisation nécessite une information accrue sur l'état du système et un traitement de données plus important.

Ceci doit donc permettre à l'opérateur d'alléger sa tâche de surveillance et de mieux saisir l'évolution du système qu'il contrôle.

2.3.5. Amélioration de l'information issue du séchoir :

L'automatisation nécessite

- d'adapter des capteurs sur les séchoirs :

- . Mesure du débit de combustible D_{mf}
- . Mesure du débit de produit vert D_{ev}
- . Mesure de l'humidité des gaz sortie tambour H_{gc}

- de développer des nouveaux capteurs :

- . Humidité du produit vert
- . Humidité du produit séché.

II.4. Analyse formelle du séchoir

Nous venons de présenter les objectifs de l'automatisation des séchoirs il convient maintenant d'analyser ce qu'est un séchoir.

.../...

Le séchoir étudié est à convection, l'atmosphère sèche est produite en amont du tambour par un générateur de gaz chauds. Ceux-ci sont obtenus par le mélange d'une certaine quantité d'air de dilution et de gaz produits par la combustion du fuel lourd. La circulation de ce mélange dans le tambour est réalisée par un ventilateur d'extraction situé à la sortie du séchoir.

Les gaz chauds sont introduits dans le tambour à des températures variant de 700°C à 900°C environ, ils en ressortent à une température de l'ordre de 120°C. En négligeant les pertes calorifiques par la paroi du tambour, il y a échange thermique entre les gaz de séchage et le produit.

En effet ^(produit) celui-ci est introduit dans le séchoir à une température voisine de l'ambiante, sa température mesurée à la sortie cyclone est voisine de la température humide des gaz (environ 60°C).

Dans ces conditions si au moment de l'introduction du produit celui-ci n'est pas en équilibre hygrométrique avec l'atmosphère de séchage il y aura d'abord un régime humide suivi d'un régime hygroscopique.

Compte tenu de notre méconnaissance de la courbe d'équilibre hygrométrique du produit, qui rappelle le est composé de tiges et de feuilles de granulométrie différentes, des caractéristiques de l'air de séchage; il est très difficile de localiser dans l'espace et dans le temps le passage du régime humide au régime hygroscopique pour l'ensemble des particules constituant le produit.

De plus comme la température du produit varie constamment la dynamique du transfert moléculaire qui a lieu à la surface de celle-ci peut être freinée par l'élevation de l'état hygrométrique du milieu vers lequel s'effectue le transfert.

De façon très générale la modélisation du processus de séchage à l'intérieur du tambour peut être abordée à l'aide des relations générales de conservation appliquées à une section différentielle. Cette approche conduit à un système d'équation aux dérivées partielles généralement non linéaires.

Cependant compte tenu du peu de connaissance sur l'aspect physique du phénomène et donc de la quasi-impossibilité de formuler des hypothèses mêmes simplificatrices, mais en accord avec l'expérience, il s'avère très délicat de mener à bien une telle modélisation dans l'état actuel de nos recherches.

Toutefois, une solution d'un système d'équations aux dérivées partielles dépend essentiellement des conditions initiales réparties dans le domaine spatial, et des conditions aux limites à l'entrée du tambour. Parmi les grandeurs participant aux conditions limites retenons :

- . débit masse de matière sèche .
- . humidité initiale du produit .
- . température initiale du produit .
- . débit masse de gaz secs .
- . température des gaz de séchage .
- . teneur en eau initiale des gaz de séchage .

Afin de préciser l'influence de certaines de ces grandeurs qui sont déterminantes pour l'état du processus en sortie de tambour, on peut effectuer une étude expérimentale sur le site industriel ceci afin de préciser les sens de variations, les constantes de temps, et l'importance de chacun de ces paramètres.

2.5. - Etude expérimentale de séchoirs (1)

Le but de ce paragraphe est d'étudier l'influence des grandeurs d'entrée du système sur l'humidité du produit séché ainsi que les autres caractéristiques mesurables sur le site.

Le séchoir étudié est un séchoir Promill installé à la Coopérative de Recy d'une capacité théorique d'évaporation de 17 500 l/h. Ce séchoir est muni d'une boucle de régulation mise au point par le constructeur et fondée sur le principe suivant :

on utilise la mesure de température, au thermomètre sec du mélange gaz produit séché, en sortie du séchoir pour commander le débit massique de luzerne à l'entrée du tambour.

En effet, pour une certaine quantité de chaleur introduite dans le séchoir, une vitesse de rotation donnée et une température de consigne en sortie; il doit passer à l'intérieur du séchoir la quantité de produit appropriée. Cette dernière est théoriquement adaptée par la régulation qui est caractérisée par une relation du type :

$$D_{LV} = g_k (T_{GSC} - T_{GSm})$$

D_{LV} \triangleq débit de luzerne verte

T_{GSC} \triangleq température de consigne en sortie tambour affiché par l'opérateur

T_{GSm} \triangleq température des gaz sortie tambour.

gk il convient de remarquer que cette fonction n'est pas une fonction continue en effet gk n'offre que trois possibilités et entraîne donc une quantification du débit de luzerne.

2.5.1. - Campagne expérimentale :

Les remarques précédentes laissent prévoir que le comportement de la luzerne, et par conséquent les caractéristiques de l'évaporation de l'humidité superficielle ainsi que la migration de l'eau vers la surface du produit, varient dans le temps et tout au long du tambour.

De plus l'atmosphère de séchage évolue tout au long du séchoir en température, humidité, vitesse et pression. Le matériau soumis au séchage change de conductivité thermique à mesure que s'élimine sa teneur en humidité. Les coefficients de transfert de chaleur et de matière, la pression de vapeur varient continuellement durant le processus de séchage.

Il ne pourrait être question, au cours de ces essais de suivre l'évolution de toutes ces grandeurs, car nous ne disposons pas de moyens de mesures nécessaires de plus il est très difficile d'arrêter la production pour implanter de tels capteurs.

Nous ne nous sommes intéressés qu'à l'aspect statique du fonctionnement compte tenu des moyens matériels mis à notre disposition.

Pratiquement nous n'avons fait varier que les caractéristiques suivantes qui sont d'ailleurs les seules mesurables et manipulables sur les séchoirs industriels, à savoir :

- . vitesse de rotation tambour
- . débit d'air à l'intérieur du séchoir
- . température des gaz à l'entrée du tambour
- . température de consigne des gaz en sortie cyclone
- . débit d'alimentation en luzerne verte.

Pour chaque expérimentation relative à l'étude de l'un de ces paramètres nous avons procédé à des essais différents.

- Essais avec maintien de la régulation prévue par le constructeur pour les deux périodes de scrutation de mesures (15mn et 3 mn)
- Essais avec suppression de la régulation .

La période de scrutation de 15mn nous a été suggérée par les industriels; elle correspond très approximativement à leur estimation du temps de séjour du fourrage dans le tambour.

2.5.2. - Résultats et conclusions :

Il convient tout d'abord d'étalonner le débit de gaz rejetés par la cheminée en fonction de l'ampérage des ventilateurs. la figure (2.3) nous donne le débit de gaz en mètres cubes normaux (m³N) en fonction de l'ampérage des ventilateurs.

2.5.2.1. - Influence de la vitesse de rotation tambour :

Elle est directement reliée au temps de contact du produit et des gaz, elle agit également sur le temps de séjour par l'intermédiaire de pâles inclinées. On constate qu'une diminution (respectivement, une augmentation) de la vitesse de rotation entraîne une diminution (resp. une augmentation) de l'humidité du produit séché comme l'indique la figure (2. 4). Une remarque importante convient d'être formulée : le deshydrateur ne modifie presque jamais la rotation du tambour elle reste la même pour la campagne de luzerne soit N_L

pour la pulpe elle est positionnée à une valeur N_p pour du maïs à une autre N_m .

2.5.2.2. - Influence de l'ampérage des ventilateurs :

Une augmentation de l'ampérage des ventilateurs d'extraction est reliée à une augmentation du débit d'air et par conséquent à un accroissement de la vitesse des gaz à l'intérieur du tambour. Le temps de séjour du produit décroît, ce qui entraîne une humidité plus forte du produit séché.

De plus une augmentation du débit des gaz de sortie entraîne une augmentation du débit d'air de dilution dans la chambre de combustion et par conséquent une diminution de la température des gaz à l'entrée du tambour. (figure 2.5).

2.5.2.3. - Influence de la température d'entrée :

La figure (2.6) montre clairement qu'une élévation de la température des gaz de séchage à l'entrée du tambour entraîne une diminution de l'humidité du produit séché ainsi qu'une diminution de l'ampérage des ventilateurs.

2.5.2.4. - Influence du débit de luzerne verte :

En fait nous n'avons pas réussi à faire varier le débit de luzerne dans une fourchette assez large sans modification des autres paramètres d'entrées.

Il convient de noter que ce paramètre est difficile à manipuler sans trop perturber les variables de sortie. En effet on a constaté que des variations de l'ordre de quelques pour cent sur le débit de luzerne verte avaient des répercussions très importantes sur les variables de sortie. C'est pourquoi d'aussi difficiles manipulations ont été abandonnées.

Il faut également remarquer que sur la majorité des séchoirs le débit de luzerne verte sert rarement en régulation à cause des contraintes mécaniques, on préfère souvent agir sur débit de combustible qui réagit plus rapidement. Ces deux remarques sont extrêmement importantes quand on sait combien coûte une heure d'immobilisation du séchoir.

2.5.2.5. - Influence de la température de consigne des gaz de sortie :
.....

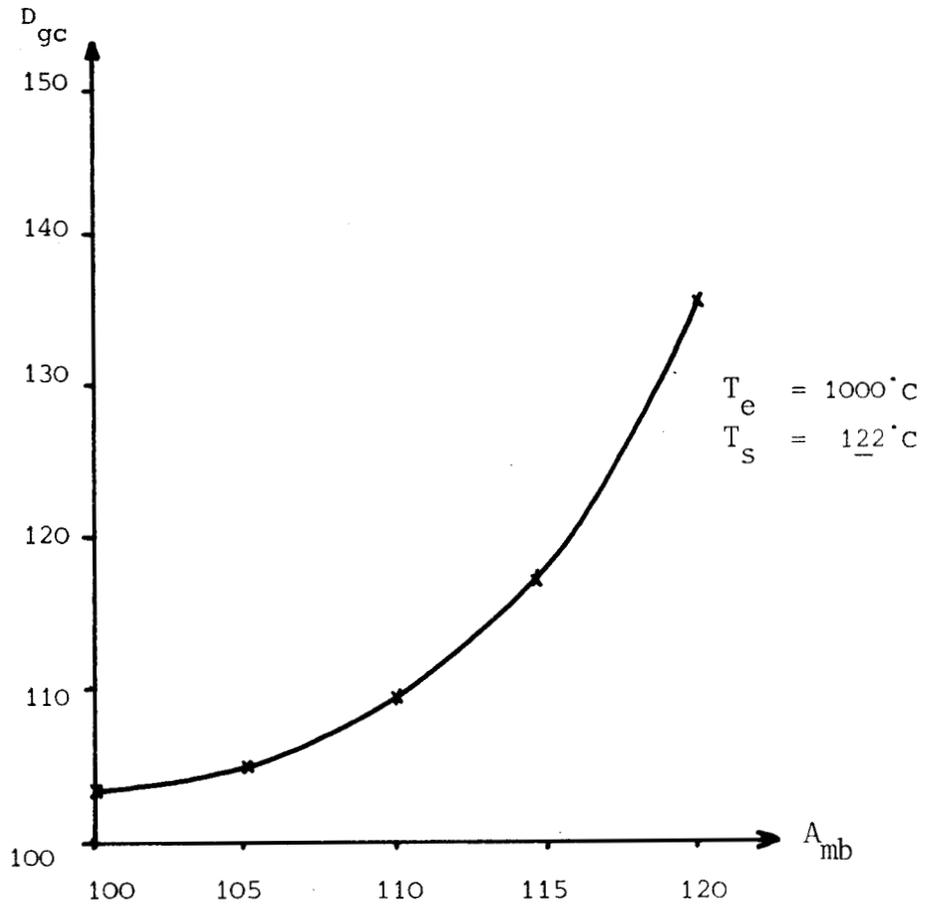
Une élévation de la température de consigne provoque, de part la conception de la boucle de régulation, une diminution du débit massique du produit, à l'entrée du tambour.

La quantité de chaleur introduite dans le séchoir est toujours constante ce qui à pour effet de sursécher le produit, (figure 2.7)

2.5.3. - Conclusions :

Les essais résumés ici font apparaître le sens des variations des grandeurs de sortie en fonction de celles d'entrée. Ils fournissent également une idée générale sur les gains entrées-sorties. Mais ils font surtout apparaître que la boucle de régulation basée sur la mesure de la température sèche des gaz de sortie pour réagir sur le débit de luzerne d'entrée ne peut avoir d'action efficace sur l'humidité du produit séché.

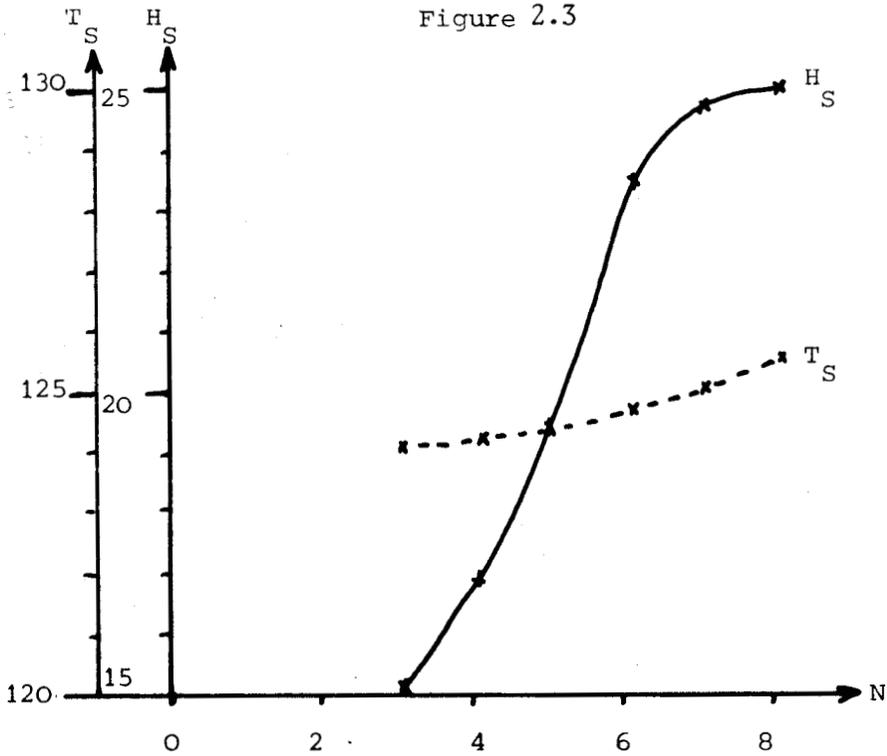
Cette dernière remarque est importante au niveau de la maîtrise de la conduite des séchoirs; c'est pourquoi nous serons amenés à redéfinir les grandeurs caractéristiques utilisées en milieu industriel. Mais avant de parvenir à ce stade il convient maintenant de parfaire notre connaissance des séchoirs pour un fonctionnement moyen.



D_{gc} Δ débit de gaz rejetés par la cheminée : milliers de m³ N

A_{mb} Δ ampérage de ventilateurs : A

Figure 2.3



$N \downarrow \Rightarrow H_s \downarrow$

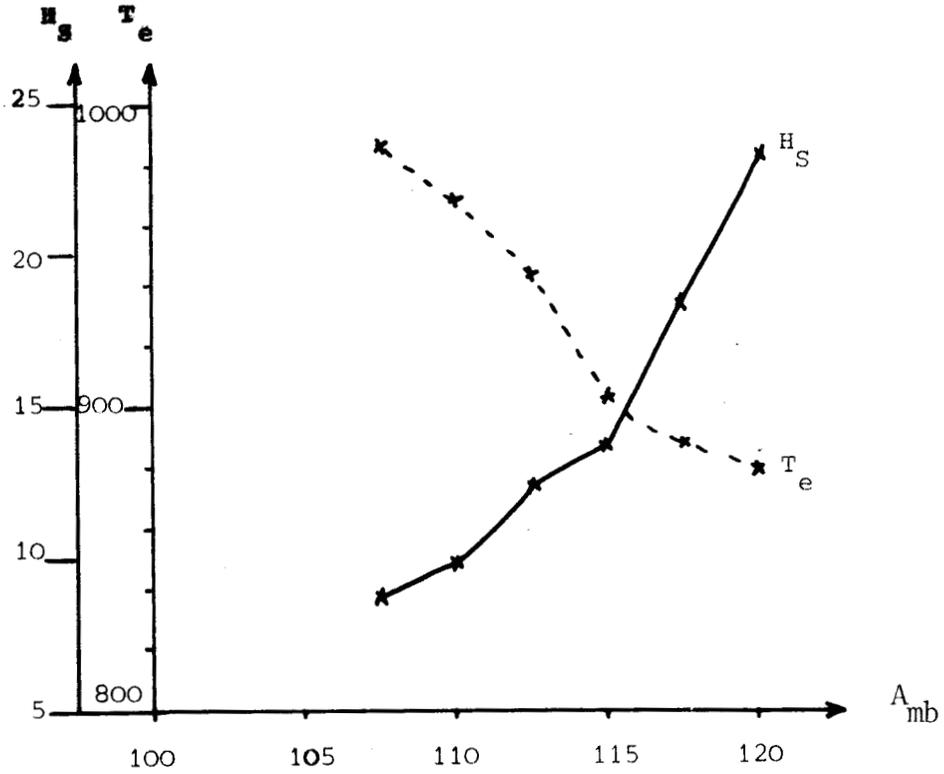
T_s Δ température de sortie : °C

H_s Δ humidité du produit déshydraté : %

N Δ rotation de tambour : tour/mn

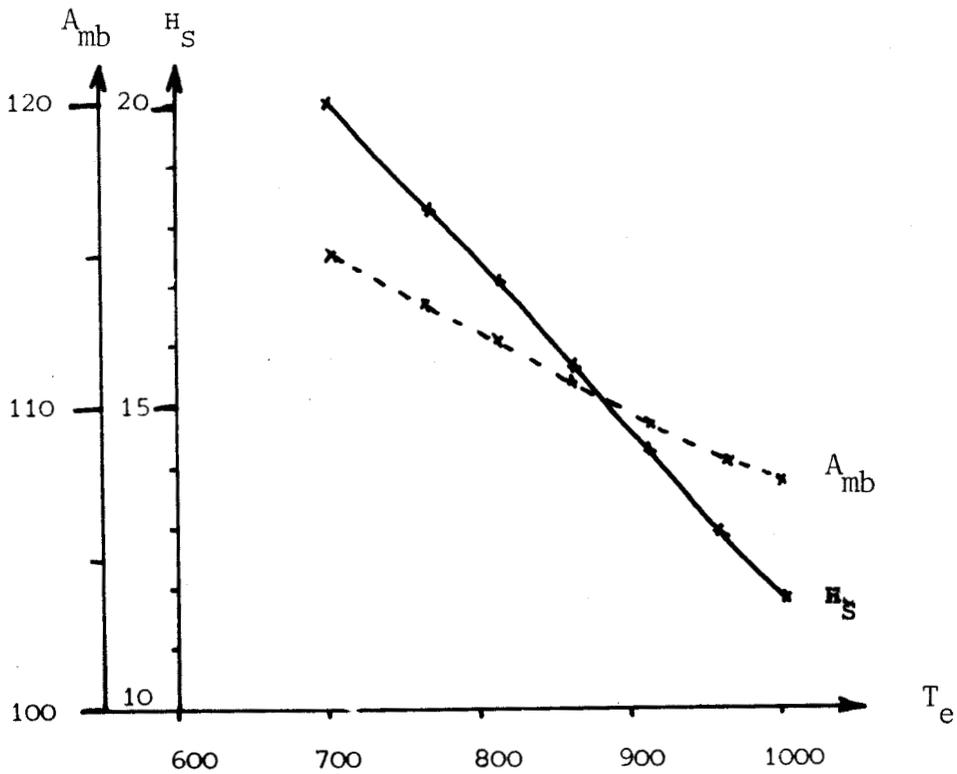


Figure : 2.4



T_e Δ température d'entrée : °C
 H_S Δ humidité produit déshydraté : %
 A_{mb} Δ ampérage des broyeurs : A

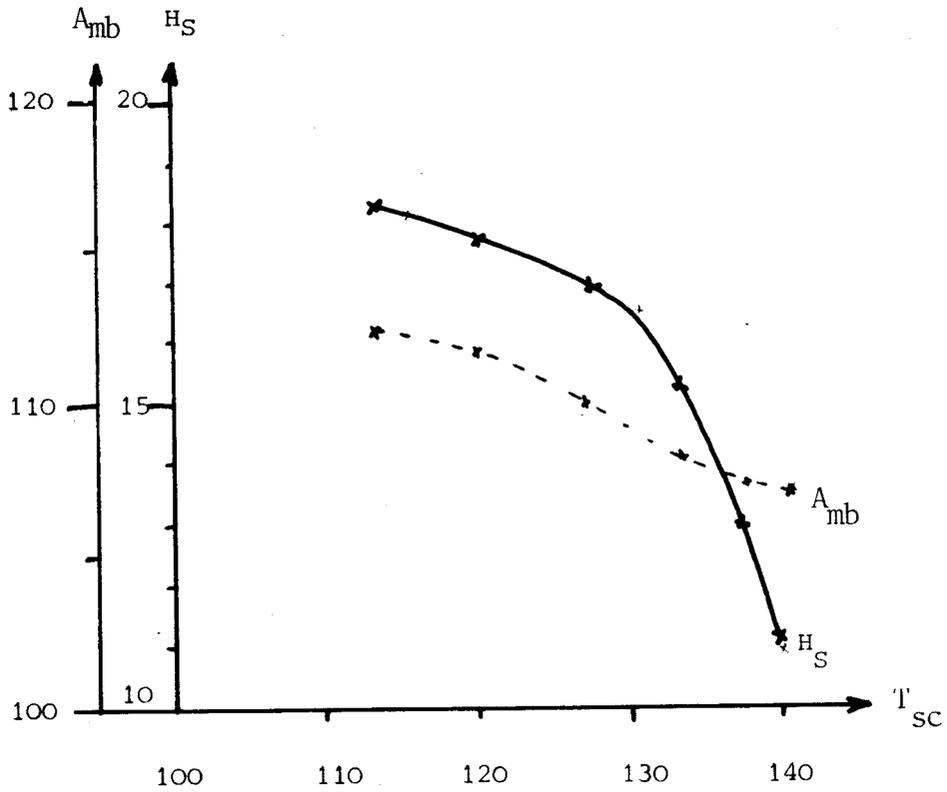
Figure 2.5



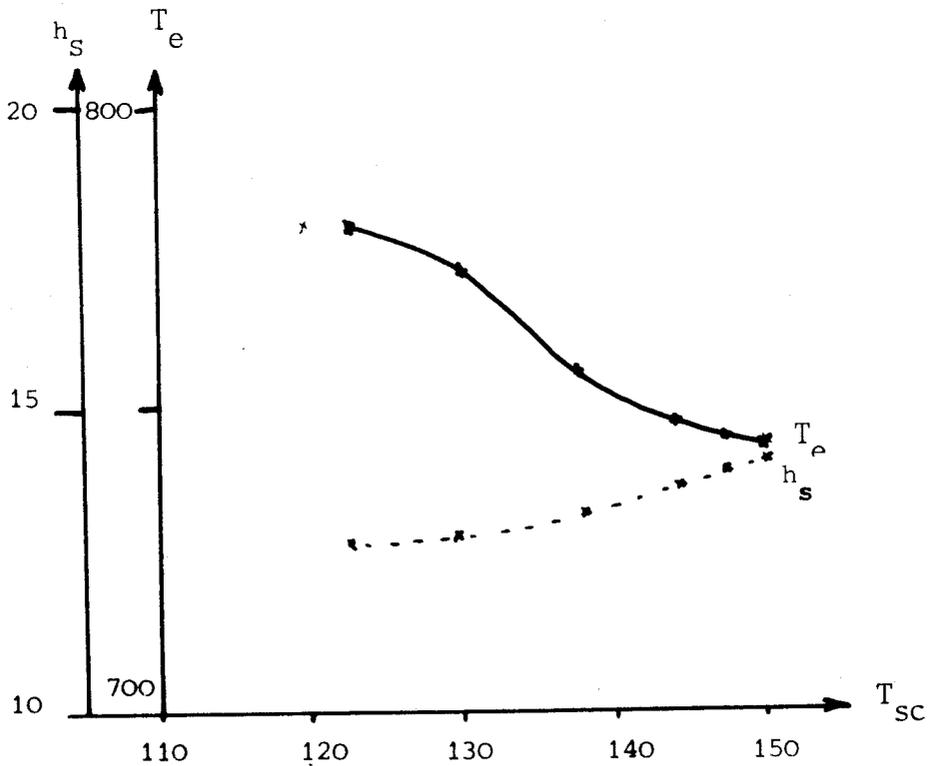
A_{mb} Δ ampérage des ventilateurs : A
 H_S Δ humidité de sortie : %
 T_e Δ température d'entrée : °C



Figure 2.6



A_{mb} Δ Ampérage des ventilateurs : A
 H_s Δ Humidité du produit déshydraté : %
 T_{sc} Δ Température de consigne des gaz sortie : °C
 tambour



T_e Δ température entrée tambour : °C
 h_s Δ hauteur de couche de luzerne entrant : cm



Figure 2.7

CHAPITRE III

MODELE STATIQUE REPRESENTANT LE FONCTIONNEMENT MOYEN DES
SECHOIRS.

III.1 Introduction

Les chapitres précédents ont montré les difficultés inhérentes à l'élaboration d'un modèle de connaissance, basé sur les lois physico-chimiques régissant l'ensemble du procédé. De plus il faut souligner que l'utilisation d'un tel modèle même en supposant résolus les problèmes des données numériques et d'identification sera peu adapté à une exploitation en temps réel.

C'est pourquoi nous nous sommes orientés vers la recherche d'un modèle plus simple pouvant être exploité en temps réel sur le procédé. Dans ce sens nous adoptons la démarche classique de l'automatique qui consiste à reporter dans la mesure du possible les caractères non linéaires du procédé dans un modèle statique (12) valable en régime permanent .

Le modèle que nous proposons est obtenu à partir d'un bilan énergétique dans lequel figurent tous les paramètres et toutes les grandeurs caractéristiques des séchoirs.

Ce modèle appartient à la classe des modèles de connaissance, cependant toutes les grandeurs qui y figurent peuvent être simplement mesurées.

3.2. - Structure d'interconnexion des séchoirs

La structure d'interconnexion des séchoirs que nous proposons découle directement des analyses faites dans les chapitres précédents. Celles-ci conduisent à trois sous systèmes interconnectés, pour lesquels il convient de préciser les relations mathématiques d'interaction.

Parmi l'ensemble de ces relations, la plus importante, due à la conception même des séchoirs, introduit une contre réaction entre le débit de gaz secs dans la cheminée d'évacuation et les débits d'air de dilution et d'air parasite.

En effet, le ventilateur exhausteur, placé dans la cheminée extrait, par unité de temps, un volume de gaz constant dont la composition est variable .

III.2

$$(3.1) \quad D_{gc} = D_{gs} + D_{vap} = \text{cte}$$

D_{gc} $\underline{\Delta}$ débit de gaz extrait par le ventilateur sortie tambour

D_{gs} $\underline{\Delta}$ débit de gaz sec contenu dans les gaz de cheminée

D_{vap} $\underline{\Delta}$ débit de vapeur d'eau contenu dans les gaz de cheminée

Les gaz secs proviennent de la chambre de combustion, et des entrées d'air parasites à savoir :

$$(3.2) \quad D_{gs} = D_{mf} V_{F'g} + D_{ps} = D_{mf} V_{F't}$$

Le débit de vapeur d'eau à plusieurs origines qui sont :

- . vapeur d'eau due à la combustion du fuel
- . vapeur d'eau associée à l'air de combustion, de dilution, et parasite.
- . vapeur d'eau due au séchage du produit

Soit encore :

$$(3.3) \quad D_{vap} = W + E_c D_{mf} + D_{cdv} + D_{pv}$$

D'après l'égalité 3.1 les débits d'air de dilution et d'air parasite apparaissent comme des grandeurs dépendantes du régime de fonctionnement du ventilateur et du séchage du produit.

Ceci apparaît clairement sur la structure d'interconnexion représenté figure 3.1.

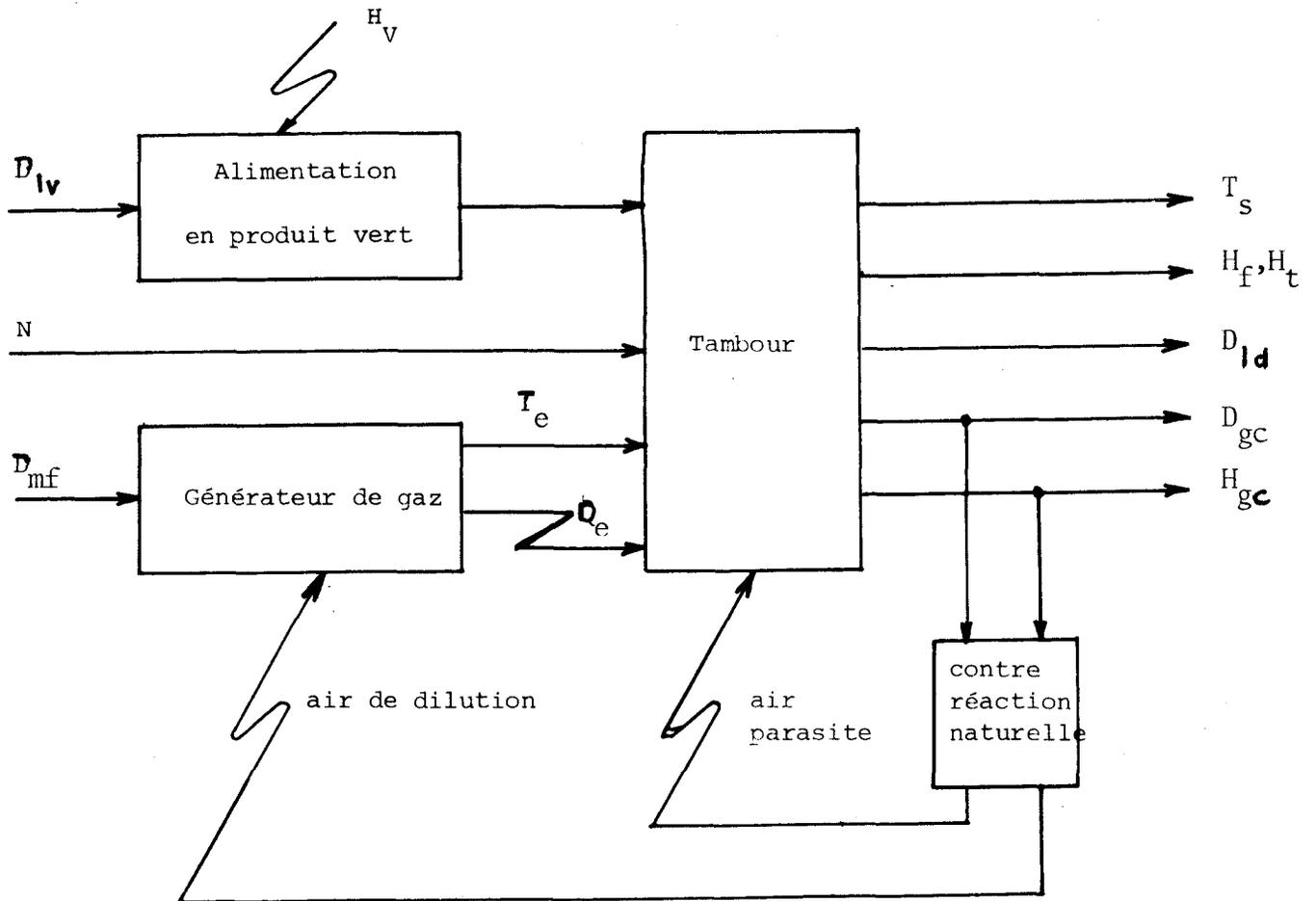


Figure 3.1.

(3.3) Etablissement du bilan énergétique

Dans la suite de ce mémoire nous ne considérerons que les séchoirs sans recyclage de gaz. Le cas du séchoir avec recyclage ne constitue qu'un cas particulier dû à une modification de la quantité de gaz rejetée dans l'atmosphère.

Le bilan énergétique est obtenu à partir des expressions des quantités de chaleur théorique et pratique associées à un bilan de matière. Nous en rappelons les diverses expressions :

3.3.1. - Chaleur théorique nécessaire

C'est la quantité de chaleur théorique nécessaire à l'évaporation d'une certaine quantité d'eau soit :

$$(3.4) \quad CTN = W \left[L_V(t_f) + \int_{t_{lv}}^{t_f} C_p \text{ eau}(T) dt \right]$$

3.3.2. - Chaleur pratique libérée par le générateur de gaz

En pratique la quantité de chaleur produite doit être supérieure à la chaleur théorique ceci afin de compenser les pertes qui sont :

- . quantité de chaleur perdue pour élever la température de la matière sèche : C_{ms}
- . quantité de chaleur perdue pour élever la température de l'eau résiduelle contenue dans la luzerne séchée : C_{er}
- . quantité de chaleur perdue par les gaz en sortie cheminée (gaz issues du générateur, de l'air parasite :) : C_{gc}
- . quantité de chaleur nécessitée par l'élévation de température de la vapeur d'eau issue du séchage : C_{sv}
- . pertes par rayonnement conduction ... etc, : C_{rc}

La chaleur pratique libérée nécessaire à l'évaporation de l'eau excédentaire ainsi qu'aux pertes peut donc s'écrire :

$$(3.5) \quad C P L = C T N + C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc} \text{ kcal/h}$$

3.3.3. - Mise en oeuvre de la chaleur pratique libérée :

Elle est issue de la combustion du fuel, des chaleurs sensibles apportées par le combustible réchauffé, l'air de combustion et de dilution soit :

$$(3.6) \quad C P L = (L_f + L_{sf}) D_{mf} + L_{cds} + L_{cdv}$$

Le bilan énergétique du séchoir se traduit alors par les relations suivantes :

$$C P L = C T N + C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc}$$

(3.7)

$$C P L = (L_f + L_{sf}) D_{mf} + L_{cds} + L_{cdv}$$

3.3.3. - Bilan de matière :

Afin d'exploiter le bilan énergétique il convient d'associer un bilan des matières gaz et produit .

Le fourrage entrant dans le séchoir est caractérisé par une humidité H_V en sortie de tambour son humidité est H_S .

Pour les gaz en sortie tambour nous obtenons la même quantité en entrée augmenter de la vapeur d'eau issue du séchage.

Nous obtenons donc les relations suivantes :

$$D_{lv} = W + D_{md}$$

$$W = E_t - E_r = D_{lv} \frac{(H_V - H_S)}{(100 - H_S)}$$

avec :

$$(3.8) \quad D_{md} = D_{lv} \frac{(100 - H_V)}{(100 - H_S)}$$

$$E_r = D_{lv} H_S \frac{(100 - H_V)}{(100 - H_S)}$$

$$D_{ms} = D_{lv} (100 - H_V)$$

pour les gaz de cheminée nous obtenons :

$$(3.9) \quad D_{gc} = W + D_{cdv} + V_{Fg} D_{mf} + D_p$$

Il faut remarquer que l'établissement du bilan énergétique ne tient pas compte des contraintes naturelles existantes sur les séchoirs industriels. Le bilan énergétique associé au bilan de matière constitue un modèle statique d'un séchoir théorique.

3.4 - Modèle statique des séchoirs :

Le modèle statique reflète le fonctionnement en régime permanent

du processus étudié. Le bilan énergétique constitue la base d'un modèle statique, il précise les relations entrées-sorties. Ce bilan doit être complété par les contraintes naturelles du système qui sont : la contrainte sur le débit de gaz de cheminée, la capacité évaporatoire, le débit de luzerne verte. Cependant le modèle ainsi défini ne tient pas compte de la vitesse de rotation de tambour dans ce sens il convient de préciser l'influence de ce paramètre et nous allons constater qu'en fait il est inclu dans le terme de pertes par rayonnement et convection.

3.4.1. - Influence de la vitesse de rotation de tambour :

Nous allons exposer brièvement les résultats de campagnes de mesures effectuées par l'E.N.S.I.A. de MASSY sur des séchoirs à luzerne et à pulpe, ainsi que par le Laboratoire Central de la Siiddeutsche Zucher A.G.

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'influence de la vitesse de rotation de tambour sur les pertes du système, ce qui peut se comprendre intuitivement quand on sait que la vitesse de rotation influe sur le brassage air de séchage produit. Des expérimentations ont été effectuées pour différentes charges du tambour et différentes vitesses de rotation, on peut les résumer par la figure 3.2 suivante :

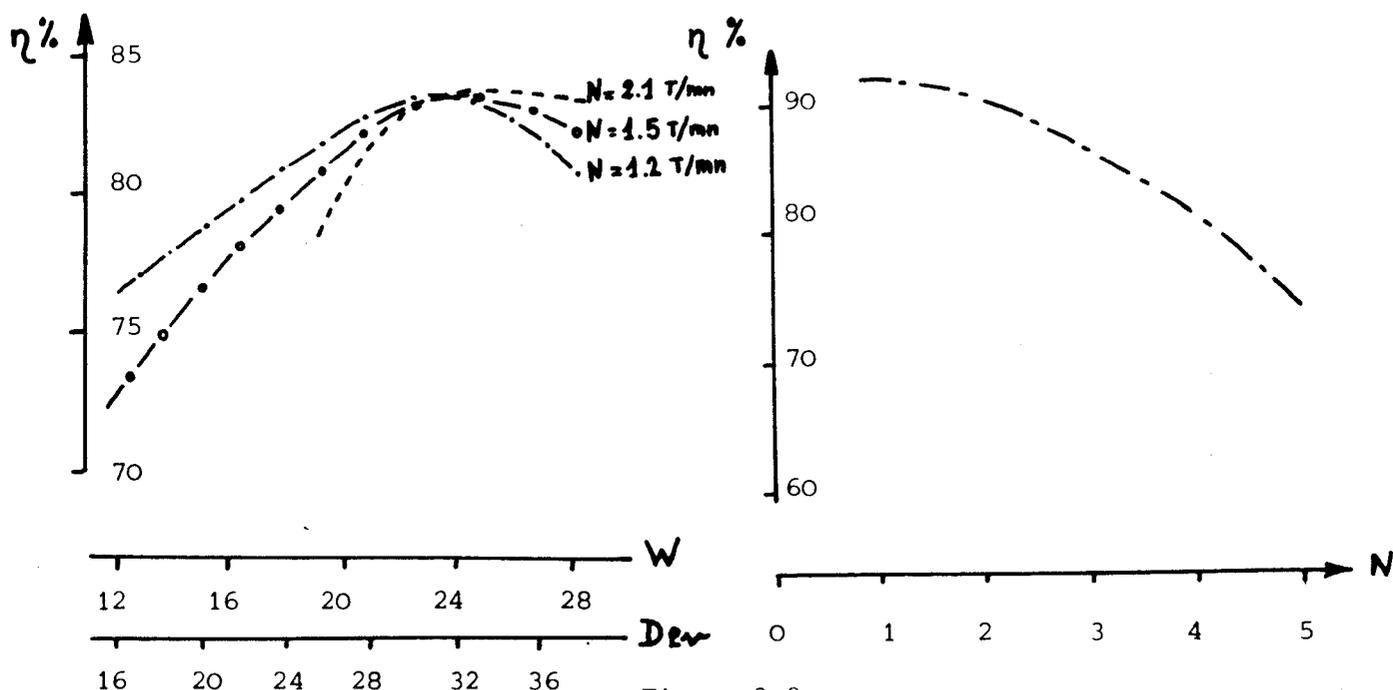


Figure 3.2.

On constate donc que le rendement thermique pour différentes vitesses de rotation de tambour présente un maximum pour une capacité évaporatoire spé-

cifique qui correspond à la capacité d'évaporation nominale de l'installation. On peut expliquer l'influence de la vitesse de rotation de tambour sur la consommation spécifique en combustible de la manière suivante :

Pour un faible débit de luzerne verte et une vitesse de rotation lente le produit séjourne longtemps dans le tambour aux vues des faibles capacités évaporatoires, l'air parasite à un débit important et vient grevé le rendement, cependant ce dernier est meilleur que pour les vitesses de rotation élevée, en effet le produit séjourne moins longtemps sort plus humide et aggrave les pertes.

Pour des débits de luzerne importants il se produit l'effet inverse à savoir :

la charge élevée entraîne des puissances d'évaporation importantes ce qui entraîne des débits de gaz faibles à travers le séchoir, afin d'obtenir un meilleur échange matière chaleur il est préférable de brasser et donc de maintenir une vitesse de rotation de tambour élevée.

On constate donc que la vitesse de rotation de tambour doit être choisie en fonction de la nature du produit à sécher et du débit de produit à traiter. Par sa contribution la vitesse de rotation intervient donc dans les pertes de l'opération de séchage. Il conviendra donc d'adopter une vitesse qui limite ces pertes qui peuvent être résumées dans le terme C_{rc} .

3.4.2. - Présentation du modèle statique :

Le modèle général peut donc se résumer par le système d'équation suivant :

$$(3.10) \quad \begin{aligned} \text{CPL} &= D_{MF} (L_f + L_{sf}) + L_{cdv} + L_{c ds} \\ \text{CPL} &= C_{IN} + C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc} \end{aligned}$$

Ce modèle doit vérifier les contraintes suivantes :

$$(3.11) \quad \begin{aligned} D_{gc} + D_{gs} + D_{vap} &= \text{cte} \\ D_{vap} &< W_o \\ D_{lv} &< D_{lvo} \end{aligned}$$

Ce modèle serait toutefois incomplet si le calcul des gaz sortie tambour n'était pas effectué à savoir :

$$(3.12) \quad CPL = D_{mf} V_{Fg} \times \int_0^T e^{C_{pgc} (A_G, t)} dt + Q_g$$

On voit donc que l'adaptation du modèle à un séchoir particulier sera caractérisée par les termes C_{rc} et Q_g typique de l'unité industrielle étudiée.

Q_g pertes particulières associées au générateur de gaz.

Il conviendra donc avant toute simulation d'identifier ces termes à partir de résultats expérimentaux acquis sur le site.

3.4.3. - Exploitation du modèle :

L'exploitation d'un tel modèle nécessite, l'introduction des propriétés thermodynamiques de l'air, du produit, de l'eau, du combustible.

De plus nous avons orienté le modèle vers la recherche du débit de combustible adapté aux conditions de séchage, c'est-à-dire en fonction du débit de luzerne verte et de son humidité à l'entrée du séchoir et de la température des gaz à la sortie du tambour ainsi que de l'humidité du produit séché en sortie de séchoir.

La mise en oeuvre pratique d'un tel modèle peut donc se résumer comme suit figure 3.3.

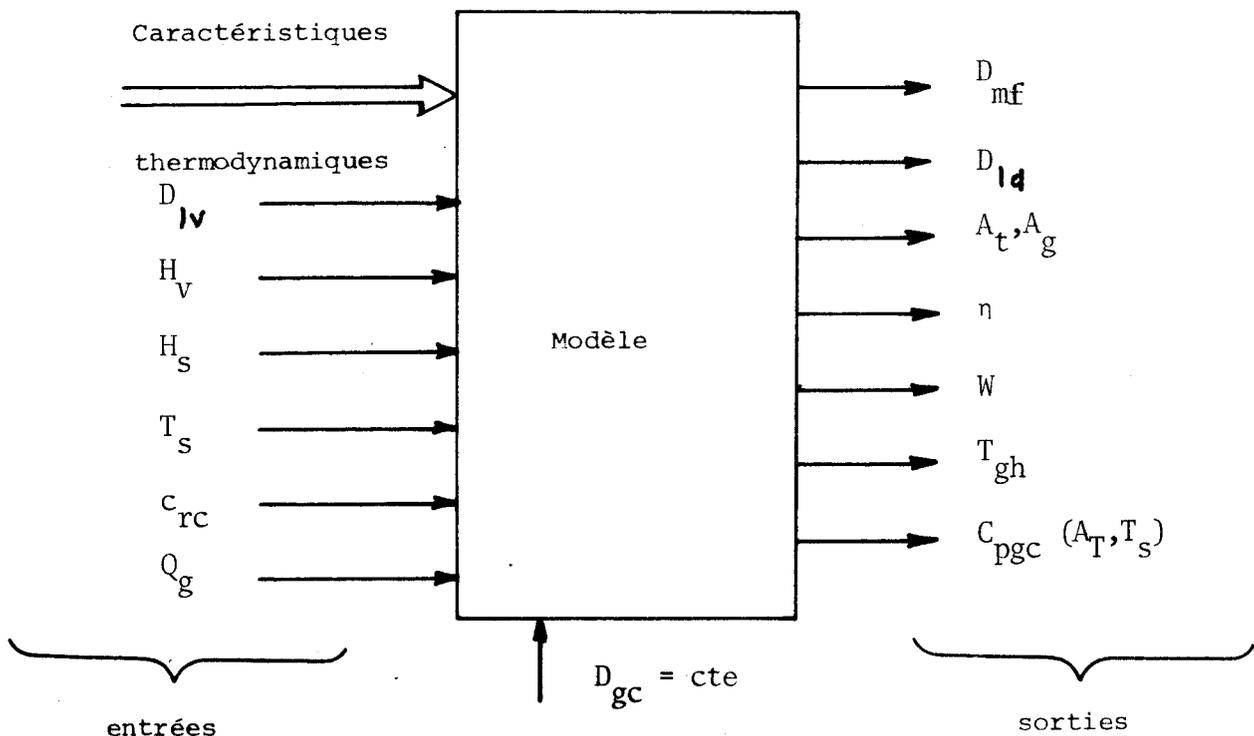


Figure 3.3.

En introduisant les pertes C_{rc} et Q_g on obtient alors un modèle personnalisé du séchoir étudié, on peut donc se servir des résultats de simulation afin de tirer quelques conclusions relatives au fonctionnement réel du séchoir.

3.5 - Résolution numérique du modèle

Le modèle établi précédemment est très général, il convient donc de préciser chaque terme afin d'effectuer des simulations, dans ce sens nous allons reprendre en détail chacun des termes et préciser les hypothèses qui seront adoptées.

3.5.1. - Chaleur mise en oeuvre par le générateur de gaz :

Elle est obtenue à partir de la relation (3.6)

$$CPL = D_{mf} (L_f + L_{sf}) + L_{c ds} + L_{cdv}$$

pour laquelle nous adoptons les relations suivantes pour les chaleurs sensibles apportées par le combustible et l'air de combustion et de dilution, à savoir :

$$L_{sf} = C_p \text{ fo}_2 \times T_{rf}$$

(3.14)

$$L_{cdv} + L_{c ds} = D_{mf} V_{At} \left[C_p \text{ air } (T_a) \times T_a + X_a C_p \text{ vap } (T_a) \times T_a \right]$$

où V_{At} désigne le pouvoir comburivore avec excès d'air en sortie tambour qui est de la forme : (Annexe A).

$$(3.15) \quad V_{At} = V_a + \frac{A_o - A_t}{A_t} V_{f'}$$

X_a teneur en vapeur d'eau des airs de combustion de dilution et parasite.

$$(3.16) \quad X_a = \frac{P_s \text{ vap } (T_a) \cdot \varphi_a}{P_a - P_s \text{ vap } (T_a) \cdot \varphi_a}$$

Les caractéristiques thermodynamiques suivantes sont connues :

$$C_p \text{ fo2 } C_p \text{ air } (T), C_p \text{ vap } (T), P_s \text{ vap } (T), V_a, A_o, V_f,$$

Les paramètres suivants seront mesurés et fournis au modèle comme conditions initiales :

$$P_a, T_a, \varphi_a, T_f$$

L'expression de la quantité de chaleur libérée par le générateur de gaz est donc :

$$(3.17) \quad \text{CPL} = f_g (D_{mf}, A_t)$$

3.5.2. - Chaleur théorique nécessaire :

Partant de la relation (3.4) nous obtenons successivement :

$$(3.18) \quad \text{CTN} = W \int_{T_{lv}}^{T_f} C_p \text{ eau } (t) dt + L_v (T_f)$$

$$(3.19) \quad \text{CTN} = D_{lv} \left(\frac{H_v - H_s}{100 - H_s} \right) \left[C_p \text{ eau } (T_f) * T_f - C_p \text{ eau } (t_{lv}) t_{lv} + L_v (T_f) \right]$$

$C_p \text{ eau } (T), L_v (T)$ sont connues. $T_f = 100^\circ\text{C}$

Les paramètres suivants seront fournis au modèle :

$$D_{lv}, H_v, H_s, t_{lv}$$

3.5.3. - Chaleur pratique libérée :

Il suffit d'expliciter chaque terme des pertes de la relation (3.5)

a) Pertes par réchauffe de la matière sèche : on fait l'hypothèse que la luzerne séchée sort à la température humide des gaz T_{gh} . On obtient alors :

$$(3.20) \quad C_{ms} = D_{ms} C_{pms} (T_{gh} - t_{lv})$$

ou encore

$$C_{ms} = D_{ev} (100 - H_v) C_{pms} (T_{gh} - t_{lv})$$

b) Pertes par réchauffe de l'eau résiduelle : on fait l'hypothèse que l'eau contenue dans la luzerne verte est à même température que la matière sèche d'une part et que l'eau résiduelle sort du tambour également à la température humide des gaz. Soit :

$$(3.21) \quad C_{er} = E_r (C_{p \text{ eau}} (T_{gh}) T_{gh} - C_{p \text{ eau}} (t_{lv}) t_{lv})$$

$$E_r = D_{lv} H_s \frac{100 - H_v}{100 - H_s}$$

c) Pertes par les gaz en sortie cheminée :

$$(3.22) \quad C_{gc} = D_{mf} V_{Ft} C_{pgc} (A_t, T_s) T_s$$

avec $C_{pgc} (A_t, T_s)$ capacité calorifique des gaz en sortie tambour à la température

d) Pertes par surchauffe de la vapeur d'eau :

$$(3.23) \quad C_{sv} = W [C_{p \text{ vap}} (T_s) T_s - C_{pvap} (100) 100]$$

ou encore
$$C_{sv} = D_{lv} \left(\frac{H_v - H_s}{100 - H_s} \right) \left[C_p \text{ vap } (T_s) T_s - C_p \text{ vap } (100) \cdot 100 \right]$$

e) Pertes par rayonnement et conduction : Nous avons vu précédemment que les pertes avaient des origines diverses mais on a pu également constater qu'elles dépendaient de la vitesse de rotation de tambour. Ces pertes peuvent se traduire de la façon suivante :

$$(3.24) \quad C_{rc} = n_1 D_{mf}$$

avec n_1 coefficient de perte qui sera obtenu par identification du modèle avec les valeurs mesurées sur une unité de production.

L'expression de la chaleur nécessaire à l'évaporation ainsi qu'aux pertes peut donc se mettre sous la forme :

$$(3.25) \quad CPL = g (D_{mf}, T_{gh}, A_t, n_1)$$

en effet les caractéristiques suivantes sont connues :

$$C_p \text{ vap } (T), C_p \text{ eau } (T), C_p \text{ ms}, V_f, V_{f'}, A_o$$

Les valeurs des paramètres suivants seront fournis au modèle :

$$T_s, T_{lv}, D_{lv}, H_v, H_s$$

Nous obtenons alors :

$$(3.26) \quad f_g (D_{mf}, A_t) = g (D_{mf}, T_{gh}, A_t, n_1)$$

ou encore

$$(3.27) \quad F (D_{mf}, T_{gh}, A_t, n_1) = 0$$

3.5.4. - Contrainte débit de gaz de cheminée :

L'expression du débit de gaz extrait par le ventilateur est :

$$D_{gc} = D_{gs} + D_{vap}$$

tandis que le débit de gaz sec est

$$(3.29) \quad D_{gs} = V_{F't} \times D_{mf}$$

où $V_{F't}$ désigne le pouvoir fumigène sec, calculé à partir de :

$$V_{F't} = V_{f'} \frac{A_o}{A_t}$$

Le débit de vapeur d'eau dans les gaz de cheminée est donné par :

$$D_{vap} = D_{mf} E_c + W + D_{mf} V_{At} X_A$$

soit encore :

$$(3.30) \quad D_{vap} = D_{mf} (E_c + V_{At} X_a) + D_{lv} \frac{(H_v - H_s)}{(100 - H_s)}$$

La contrainte sur les gaz de cheminée peut alors être écrite sous la forme condensée suivante :

$$(3.31) \quad G (D_{mf} A_t) = 0$$

en effet les autres paramètres sont connus ou précisés dans les conditions initiales :

$$E_c, X_a, D_{lv}, H_v, H_s, V_a, V_{f'}, A_o$$

3.5.5. - Calcul de la température humide des gaz : /11/

A partir de l'équation du thermomètre humide on peut établir la relation suivante :

$$(3.32) \quad P_{vap} (T_s) = P_s \text{ vap} (T_{gh}) - \frac{(P_a - P_s \text{ vap} (T_{gh})) (T_s - T_{gh})}{1503 - 1.385 T_{gh}}$$

$P_{\text{vap}}(T_s)$ $\underline{\Delta}$ pression de vapeur à la température T_s

$P_s \text{ vap}(T_{\text{gh}})$ $\underline{\Delta}$ pression de vapeur saturante à la température T_{gh}

P_a $\underline{\Delta}$ pression des gaz humides à la température T_s .

L'hypothèse simplificatrice suivante justifie dans notre cas (12)

$$(3.33) \quad P_s \text{ vap}(T_{\text{gh}}) = \frac{T_{\text{gh}}^4}{100} \times 760 \times 10^{-3}$$

peut être utilisée, pour obtenir une expression de la pression de vapeur à la température T_s :

$$(3.34) \quad P_{\text{vap}}(T_s) = h(T_{\text{gh}}, P_a, T_s)$$

Les paramètres P_a et T_s sont connus, le calcul de $P_{\text{vap}}(T_s)$ permet de déduire T_{gh} la température humide des gaz.

a) Calcul de la pression de vapeur dans les gaz à T_s

Sous l'hypothèse que les gaz sont parfaits, nous obtenons immédiatement:

$$(3.35) \quad \frac{P_a \cdot V_T}{T_s} = \frac{P_o \cdot V_o}{T_o}$$

P_o $\underline{\Delta}$ pression normale : 760 mm Hg

V_o $\underline{\Delta}$ volume normal en m³N

T_o $\underline{\Delta}$ température normale : 0°C ou 273°K

Si $P_{\text{vap}}(T_s)$ est la pression de vapeur dans ces gaz on peut donc calculer le volume normal de vapeur d'eau soit :

$$(3.36) \quad V_{\text{vap } o} = \frac{P_{\text{vap}}(T_s)}{P_o} \cdot \frac{T_o}{T_s} \cdot V_T$$

V_T $\underline{\Delta}$ volume des gaz à température T_s

Si nous faisons l'hypothèse que ce volume de gaz peut être ramené aux conditions normales par la relation suivante :

$$V_{oT} \frac{P_a}{P_o} \cdot \frac{T_o}{T_s} = V_T$$

Le volume de vapeur ramené aux conditions normales est alors :

$$(3.37) \quad V_{vap\ o} = \frac{P_{vap} T_s}{P_a} \cdot V_{oT}$$

Dans les gaz de cheminée le débit total ramené aux conditions normales V_{oT} est D_{gc} , le débit de vapeur contenu dans les gaz D_{vap} est $V_{vap\ o}$, la pression de vapeur est alors calculée par :

$$(3.38) \quad P_{vap}(T_s) = \frac{D_{vap}}{D_{gc}} \cdot P_a$$

$$\frac{D_{vap}}{D_{gc}} \cdot P_a = h(T_{gh}, P_a, T_s)$$

La résolution de l'équation suivante fournit la valeur de T_{GH}

$$(3.39) \quad H(T_{gh}, P_a, D_{vap}, D_{gc}) = 0$$

3.5.6. - Calcul de la température des gaz sortie générateur :

Il suffit de reprendre l'expression de la chaleur pratique libérée par la chambre de combustion nous obtenons alors :

$$(3.40) \quad CPL = D_{mf} V_{Fg} \int_0^{T_E} C_{pgc}(A_g, t) dt + Q_g$$

Q_g est le coefficient de perte du générateur qui tient compte du réfractaire, du rayonnement, de la conduction et des caractéristiques propres au générateur de gaz chauds.

$$Q_g = n_2 D_{mf}$$

Q_g sera également obtenu par identification du modèle avec les mesures effectuées sur une unité de production.

3.5.7. - Programme de mise en oeuvre du modèle :

Le système d'équations décrivant le modèle statique sous une forme condensée est :

$$(3.41) \quad \begin{aligned} \text{a) } F (D_{mf}, A_t, T_{gh}, n_1) &= 0 \\ \text{b) } G (D_{mf}, A_t, n_2) &= 0 \end{aligned}$$

avec les contraintes suivantes :

$$\begin{aligned} D_{lv} &< D_{lv0} \\ W &< W_0 \end{aligned}$$

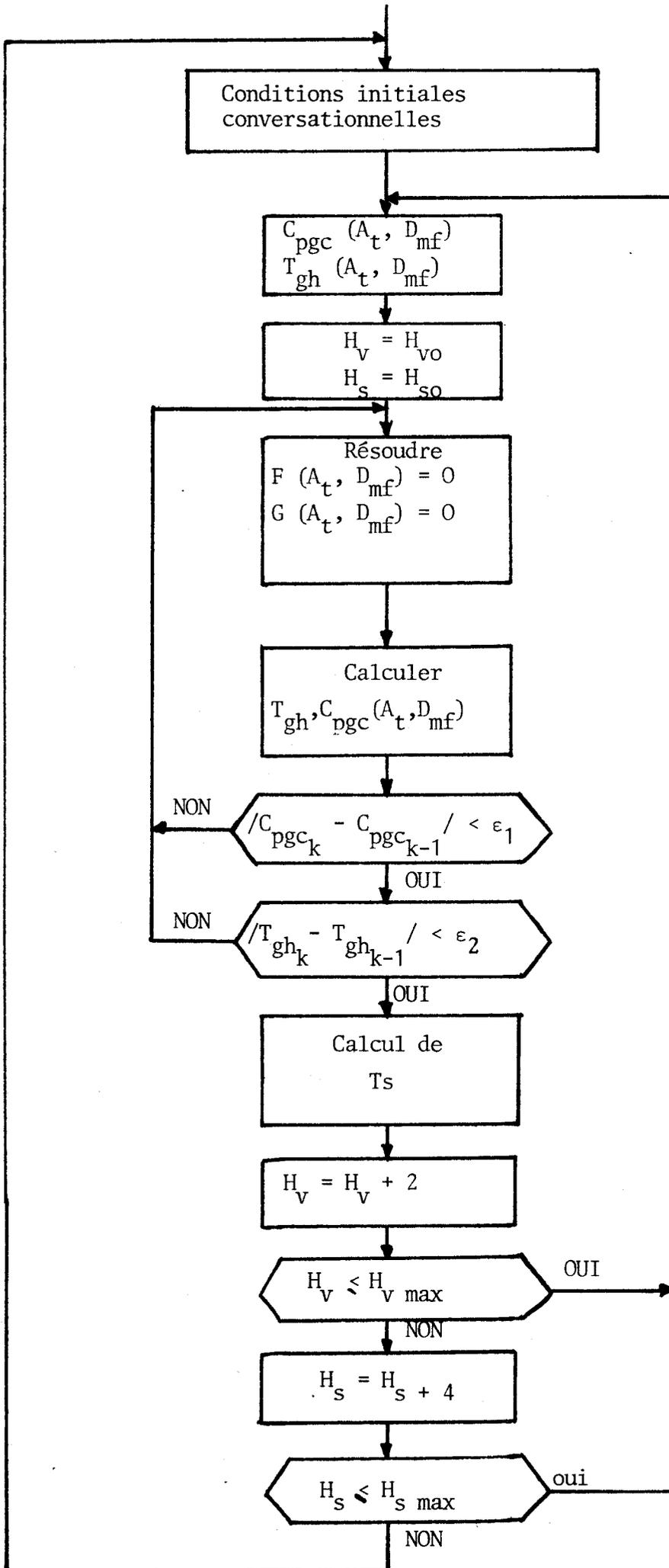
Le système d'équation 3.41 nécessite la connaissance de la capacité calorifique des gaz sortie tambour $C_{pgc}(A_t, T_s)$, A_t est une inconnue. La résolution d'un tel système n'est pas possible par des méthodes directes en effet nous avons un système de deux équations à quatre inconnus.

Nous avons donc utilisé une méthode de relaxation qui consiste à prendre deux variables à priori et de résoudre le système d'équation 3.41 par rapport aux deux autres variables par la méthode de NEWTON-RAPHSON.

Les variables prises à priori sont : T_{gh} , C_{pgc} . Nous résolvons donc le système d'équation par rapport à A_t et D_{mf} . Quand ces deux paramètres sont connus nous recalculons T_{gh} et C_{pgc} , nous les comparons aux valeurs prises à priori et si l'erreur entre ces deux variables est trop grande nous réalisons à nouveau le système d'équation à partir des dernières valeurs de T_{gh} et C_{pgc} trouvées.

Le mode de résolution numérique peut être schématisé par la figure 3.4 n_1 et n_2 sont obtenus par identifications à partir de valeurs expérimentales tel que le système suivant soit résolu :

$$\begin{aligned} F (n_1) &= 0 \\ G (n_2) &= 0 \end{aligned}$$



3.6 - Validité des résultats fournis par le modèle :

Il convient de remarquer que nous avons défini le modèle comme une représentation mathématique qui fournit les indications relatives au régime permanent du processus. La véracité d'un tel modèle sera fonction du degré de précision atteint d'une part et du respect de toutes les contraintes du processus. De plus il faut remarquer que le modèle peut être adapté à chaque séchoir à l'aide de l'identification des pertes C_{rc} pour le bilan énergétique et des pertes Q_g pour l'expression de la température des gaz sortie générateur. La validité d'un tel modèle a été confrontée aux résultats expérimentaux effectués par l'A.P.P.A.V.E., sur le séchoir étudié. La comparaison des résultats peut être résumée par le tableau 3.5 suivant :

<i>Caractéristiques communes</i>	<i>A.P.P.A.V.E.</i>	<i>Modèle statique</i>
- <i>taux de CO₂ tambour</i>	3.0%	3.01%
- <i>débit de luzerne verte</i>	20.145 T/h	20.145 T/h
- <i>température sortie générateur</i>	793°C	791°C
- <i>débit combustible</i>	1310.kg/h	1305.6 kg/h
- <i>rendement de l'installation</i>	793 kcal/kg	792 kcal/kg

Tableau 3.5

Il convient cependant de préciser que les valeurs données par l'A.P.P.A.V.E. résultent d'un fonctionnement moyen sur une longue période de temps pendant laquelle toutes les grandeurs d'entrée et de sortie ont fluctué.

Le modèle statique ainsi mis au point peut donc être un modèle moyen de fonctionnement, cette remarque sera importante pour la structure de commande envisagée.

3.7 - Conclusions

Nous venons de présenter l'élaboration d'un modèle statique de fonctionnement des séchoirs. L'originalité de ce modèle est d'inclure les contraintes naturelles du système afin d'en améliorer la reproductibilité par rapport au système réel.

De plus nous avons pu constater que la caractérisation d'une unité de production ne dépendait que de deux paramètres : C_{rc} , Q_g ces derniers peuvent être très facilement appréhendés à partir d'une campagne de mesures effectuées sur le site.

L'intérêt d'un tel modèle est donc de simuler les réactions du processus physique et d'éviter ainsi des campagnes de mesures laborieuses et coûteuses de plus un tel modèle permet de tester les différentes politiques de commande envisagées sur de tels séchoirs, c'est ce que nous allons envisager dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV

PRESENTATION DE LA POLITIQUE DE COMMANDE DES SECHOIRS.

IV.1 - Introduction

Comme nous l'avons défini précédemment le but de la conduite d'un séchoir est de maximiser les rendements énergétique, qualitatif et quantitatif, tout en obtenant un produit dont les caractéristiques d'humidité respectent le critère présenté au premier chapitre.

Nous nous sommes intéressé essentiellement au rendement énergétique que nous avons défini comme le rapport entre la chaleur théorique nécessaire et la chaleur pratique libérée soit :

$$n = \frac{CTN}{CPL}$$

$$\text{où } CTN = D_{mf} (L_s + L_{sf}) + L_{cds} + L_{cdv}$$

$$CPL = CTN + C_{ms} + C_{er} + C_{gc} + C_{sv} + C_{rc}$$

S'il est aisé de définir le rendement énergétique, il n'est pas immédiat de formuler les rendements qualitatif et quantitatif. Des études ont été effectuées par l'ENSIA de MASSY, ces dernières ont permis de mettre en évidence la corrélation entre les pertes au feu du produit séché en fonction de l'humidité du produit vert et de la température des gaz à l'entrée du tambour pour une humidité résiduelle donnée les résultats de cette étude sont représentés à la figure (4.1)

Les buts de la conduite étant définis, il convient de définir la politique de commande capable de respecter ces buts compte tenu des contraintes du système étudié en particulier :

- . humidité résiduelle donnée
- . capacité d'évaporation bornée
- . débit massique de produit vert borné

Le débit de produit à traiter est fixé par le conducteur du séchoir en fonction de la capacité de coupe des différents secteurs de récolte.

La recherche de la politique de commande correspondante est difficilement envisageable à partir de l'expérimentation directe coûteuse; cependant l'utilisation du modèle établi précédemment constitue, le moyen adapté.

Dans ce sens nous présentons une politique de commande élaborée par simulation.

IV.2 - Simulation des différents régimes de fonctionnement :

Le but des simulations est de définir la politique de commande qui maximise les rendements précédemment définis tout en respectant les contraintes propres au séchoir étudié.

Le conducteur fixe lui même la capacité de traitement de l'installation, trois régimes d'alimentation en produit vert sont théoriquement possibles :

- débit d'eau à évaporer constant
- débit de luzerne verte constant
- débit de matière sèche constant

Les simulations seront donc relatives à une étude comparative de ces trois régimes.

Avant de présenter les résultats il convient de préciser les conditions dans lesquelles ont été effectuées ces simulations :

Le modèle statique de fonctionnement a été adapté au séchoir de capacité d'évaporation de 17500 l/h installé à la coopérative d'ARCIS S/AUBE, et les conditions d'exploitation sont celles relevées par l'A.P.P.A.V.E. lors d'une intervention sur le séchoir :

- . Pression ambiante : 760 mm Hg
- . Température ambiante : 26°C
- . Humidité relative : 0,6
- . Température de réchauffe
de combustible : 116°C
- . Vitesse de rotation du
tambour : 5 T/mn
- . Débit de gaz rejetés à
l'atmosphère : 91205 m³N

L'ensemble des résultats présentés est relatif à l'obtention d'une luzerne séchée à 16% d'humidité en sortie du tambour.

Les résultats sont présentés sous la forme de graphe dans lesquels nous faisons apparaître l'influence des différents mode de fonctionnement sur les caractéristiques suivantes :

- . Capacité de traitement et d'évaporation
- . Débit de luzerne séchée
- . Rendement de l'installation
- . Adaptation température des gaz à l'entrée du tambour.
humidité du produit vert

4.2.1. - Débit d'eau à évaporer constant :

Les séchoirs sont conçus pour des puissances d'évaporation maximales données, il peut sembler intuitif d'envisager la conduite de telles unités en maintenant un taux d'évaporation fixe. Ce dernier devant être fixé par l'opérateur humain en fonction de la réserve de produit vert. Les résultats de la simulation correspondante sont présentées ci-dessous :

a) figure 4.2.a :

On constate que le débit de luzerne verte est fonction du taux d'évaporation et de l'humidité du produit vert. Pour une capacité d'évaporation de 17500 l/h le débit de luzerne verte atteint sa valeur maximale par une humidité initiale de l'ordre de 82%.

Le débit de luzerne séchée dépend également de la capacité d'évaporation et de l'humidité du produit vert. Les variations de l'humidité initiales vont donc provoquer des a-coups dans la production de luzerne séchée. Ces derniers sont préjudiciables pour le matériel de transformation situé en aval du séchoir.

b) figure 4.2.b :

Le rendement de l'installation exprimé en kcal/kg d'eau évaporé est d'autant meilleur que la capacité d'évaporation est proche de sa valeur nominale et que la température des gaz sortie tambour est basse

c) figure 4.2.c :
.....

On a tracé l'évolution de la température des gaz en sortie du générateur en fonction de la capacité d'évaporation et de l'humidité du produit vert. En superposant les résultats proposés par l'E.N.S.I.A. on constate que les critères qualitatif et quantitatif ne sont pas respectés pour des capacités d'évaporation proches du régime nominal, en effet les taux de pertes en matière sèche sont importants.

4.2.2. - Débit de luzerne verte constant :

Puisque le conducteur du séchoir à la possibilité de régler lui-même le débit d'alimentation en produit vert, les résultats présentés ici sont relatifs à différents régimes d'alimentation.

a) figure 4.3.a. :
.....

La capacité d'évaporation est fonction du débit massique de luzerne verte à l'entrée du séchoir et par conséquent de l'humidité du produit vert. Le débit de luzerne séchée, est également fonction des variations d'humidité du produit vert. Ces variations sont également préjudiciables pour le matériel de transformation situé en aval du séchoir.

b) figure 4.3.b. :
.....

Le rendement de l'installation est d'autant meilleur que le débit de luzerne verte est proche de sa valeur maximale et que la température des gaz à la sortie du tambour est faible.

c) figure 4.3.c. :
.....

En comparant l'évolution de la température des gaz à l'entrée du tambour aux résultats de l'E.N.S.I.A. en fonction de l'humidité du produit

vert, on constate que cette fois il existe une adaptation qui permet d'éliminer pratiquement les pertes du feu; à condition toutefois de ne pas dépasser la capacité de traitement de 22 tonnes/heure pour des humidités supérieures à 80%.

4.2.3. - Débit de matière sèche constant :

Cette dernière simulation consiste à maintenir constant le débit de matière sèche introduit dans le séchoir. Cette hypothèse de simulation suppose qu'elle soit réalisable dans la pratique. En fait nous établirons que la technologie employée pour réaliser le système d'alimentation autorise un tel fonctionnement.

a) figure 4.4.a. :

La capacité d'évaporation dépend du débit de matière sèche et de l'humidité du produit vert. Il est important de noter que le débit de luzerne séchée est indépendant de l'humidité du produit vert. C'est donc un avantage par rapport aux cas précédents.

b) figure 4.4.b. :

L'évolution du rendement exprimé en kcal/kg d'eau évaporée est d'autant meilleur que la température de sortie des gaz du tambour est basse et que la capacité de traitement est élevée.

c) figure 4.4.c. :

L'adaptation des gaz à l'entrée du tambour en fonction de l'humidité du produit vert est respectée. Il n'y a pas de pertes au feu pour des capacités d'évaporation inférieures à 17000 l/h. Quelque soit le débit massique de matière sèche.

4.2.4. - Conclusions relatives aux simulations :

Du point de vue thermodynamique, les résultats de simulations font apparaître deux politiques acceptables pour la conduite des séchoirs :

- . débit de luzerne verte constant
- . débit de matière sèche constant

Cependant, il convient d'introduire un autre aspect qui est important pour la durée de vie du matériel et pour les conditions d'exploitation, en particulier citons la tenue mécanique d'une installation.

C'est en fait cet aspect qui va départager les deux modes de fonctionnement retenus et donner la supériorité à la conduite avec débit de matière sèche constant.

En effet par la conception même du système d'alimentation on peut mettre en évidence une relation entre le débit de matière sèche et la vitesse de défilement du tapis élévateur (1).

Cette relation est linéaire soit :

$$D_{ms} = c V_t + d$$

D_{ms} Δ débit de matière sèche

V_t Δ vitesse du tapis d'alimentation

c, d Δ coefficient de régression.

Cette corrélation entre débit de matière sèche et vitesse du tapis d'alimentation, permet donc de régler le débit de matière sèche en positionnant simplement la vitesse du tapis.

Ce réglage présente l'avantage d'être indépendant de l'humidité du produit vert ce qui ne peut être le cas si on envisage une conduite à débit de luzerne verte constant.

Ces remarques permettent de conclure à une meilleure tenue mécanique du matériel dans le cas de la conduite à débit de matière sèche constant.

4.3 - Politique de commande des séchoirs :

A partir des remarques précédentes, il convient de préciser la politique de commande que nous allons envisager pour la conduite des séchoirs.

Cette politique doit intégrer les différents critères définis au premier chapitre de plus elle doit tenir compte des contraintes du système.

La conduite retenue doit conduire à l'élaboration d'un produit séché présentant les caractéristiques voulues d'humidité tout en satisfaisant les contraintes énergétiques, qualitatives et quantitatives précédentes.

Dans ce sens nous présentons les grandeurs qu'il faut régler pour satisfaire l'ensemble des critères.

a) vitesse de rotation tambour :

.....

celle-ci doit être adaptée au produit à traiter, afin de limiter les pertes dues à un mauvais échange chaleur-matière intervenant dans le terme C_{rc} .

b) débit de matière sèche :

.....

comme nous venons de le montrer c'est le seul régime de fonctionnement qui satisfait les critères de conduite et les contraintes mécaniques des systèmes.

c) humidité du produit vert :

.....

c'est la principale perturbation de l'opération de séchage en effet une variation brusque ou lente modifie brusquement (resp. lentement) le régime de fonctionnement du séchoir.

Nous présentons au chapitre suivant une méthode d'estimation en temps réel de cette perturbation.

d) débit de combustible :

.....

Il doit être adapté au débit de luzerne entrant dans le tambour, à l'humidité de cette dernière et aux conditions en sortie du tambour. Dans ce sens, la simulation nous a montré qu'il était possible d'en déterminer la valeur de consigne.

e) température de sortie :

.....

Le critère énergétique impose une température des gaz minimale, à la sortie du tambour afin de minimiser les pertes par surchauffe de la vapeur, et les pertes dans les gaz de sortie.

f) humidité du produit séché :

.....

elle doit respecter le critère d'humidité différentielle feuilles tiges défini au premier chapitre c'est-à-dire :

$$H_s = \frac{aHt + bHf}{100}$$

16% où a et b désignent respectivement les pourcentages de tiges et de feuilles.

4.3.1. - Présentation de la structure de commande :

Un modèle mathématique simplifié basé sur des équations de bilans énergétiques a été établi, en respectant les contraintes du système. Un tel modèle peut être utilisé en guide opérateur ou en optimisation statique de l'unité industrielle. Ce modèle statique de fonctionnement permet de réaliser une commande en boucle ouverte en vue d'obtenir des régimes permanents prédéterminés.

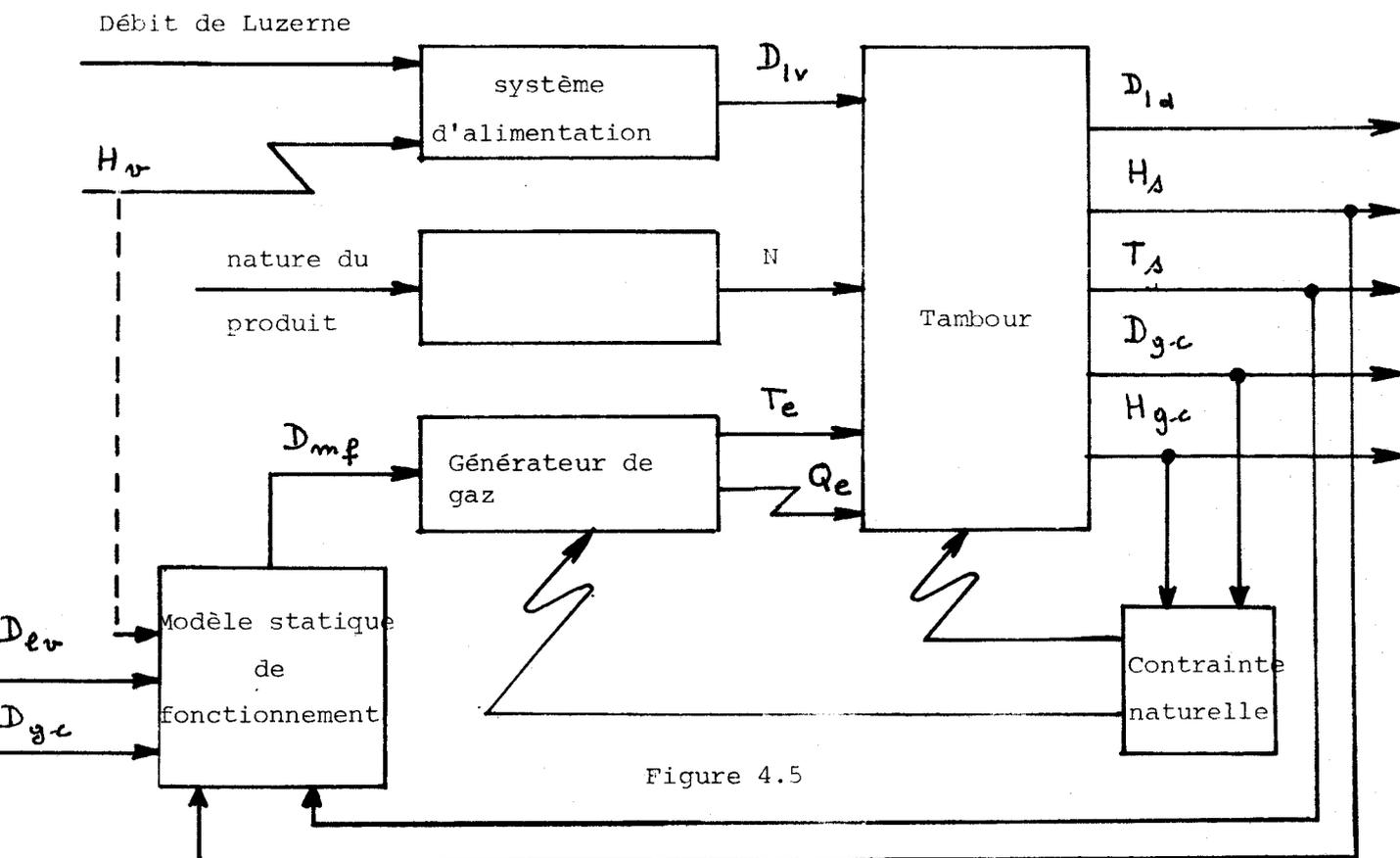
La mise en oeuvre en " temps réel " d'un tel modèle implique l'acquisition automatique de la valeur des grandeurs suivantes

- . débit de luzerne verte
- . débit de gaz rejetés à l'atmosphère
- . humidité du produit vert
- . humidité de la luzerne séchée
- . température des gaz en sortie tambour.

La commande en boucle ouverte proposée à partir du modèle statique conduit à prépositionner le débit de combustible en fonction des paramètres précédemment définis.

Celle-ci peut être représentée par le schéma général de la figure

(4.5).



4.3.2. - Remarques concernant la coordination des tâches :

Le modèle statique proposé permet d'ajuster les conditions initiales du séchage en fonction des conditions finales désirées et de l'état initial du produit pour un séchoir donné. Ceci entraîne les remarques suivantes :

- . nous avons vu que l'opérateur reste maître de la capacité de traitement et qu'il ajuste celle-ci en fonction de l'état de la récolte. Le débit de luzerne verte occupe par conséquent la hiérarchie la plus haute dans la stratégie de conduite des séchoirs.
- . l'humidité du produit vert est une variable aléatoire, elle est en effet soumise aux conditions de la météorologie, c'est une grandeur qui intervient dans les conditions initiales de l'opération de séchage. Toute variation de sa valeur doit être prise en compte immédiatement afin de réadapter les conditions initiales en fonction du but recherché.
- . la température des gaz à l'entrée du séchoir doit être adaptée à l'humidité du produit vert afin de limiter les pertes du feu, et par conséquent les pertes de qualité.

L'organisation de la commande du séchoir est ainsi représentée à la figure (4.6)

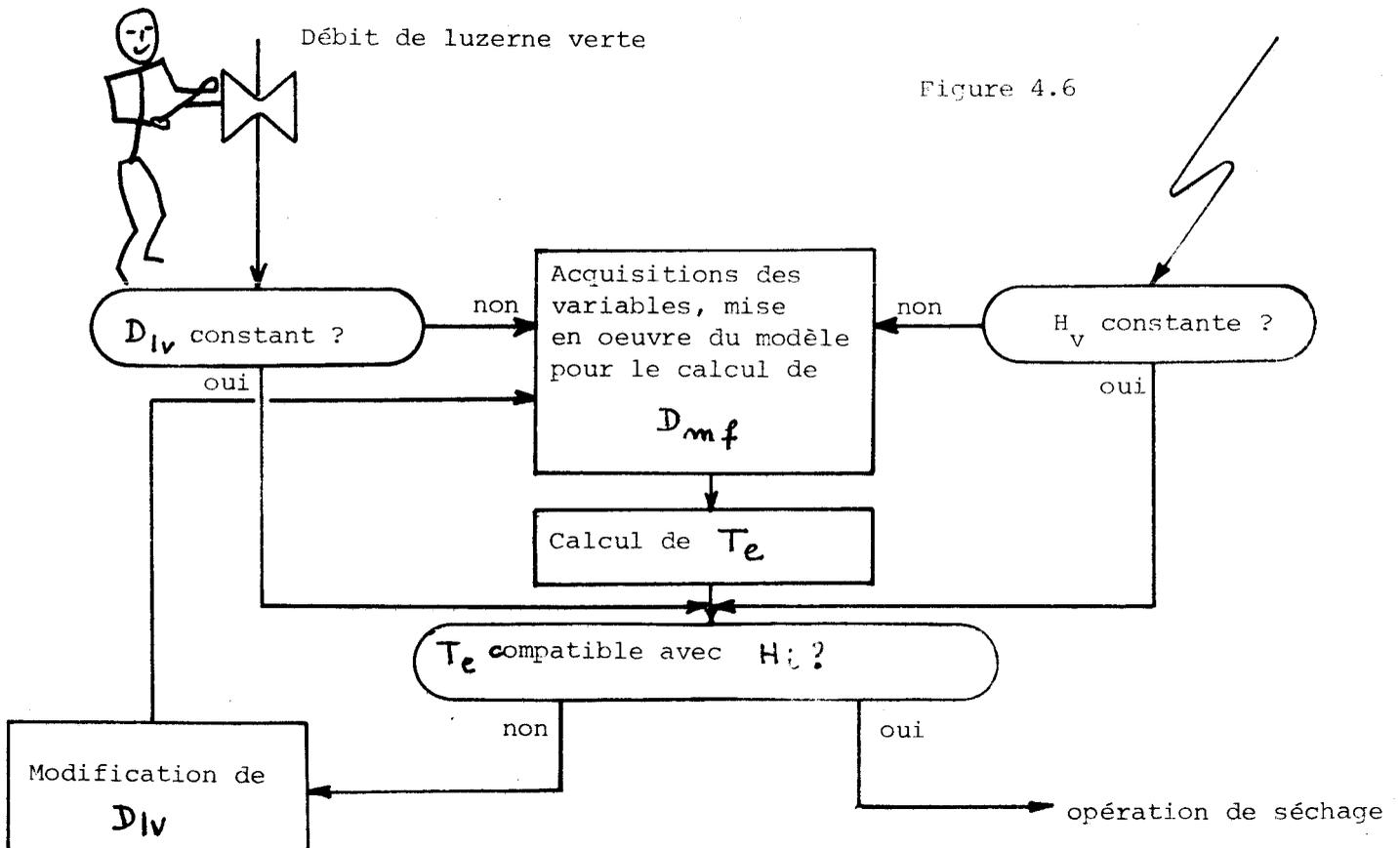


Figure 4.6

4.5 - Conclusion

La politique de conduite proposée utilise un modèle statique représentant le fonctionnement moyen de l'unité de deshydratation étudiée.

Ce modèle peut être obtenu à partir d'un bilan énergétique global et d'une campagne de mesures visant à identifier les pertes de l'installation en général et celles du générateur de gaz chauds en particulier.

L'utilisation d'un tel modèle en guide opérateur nécessite l'implantation sur le site d'un ensemble de mesures automatiques.

Température des gaz sortie générateur en fonction
de l'humidité de la luzerne verte pour des pertes
au feu Δms

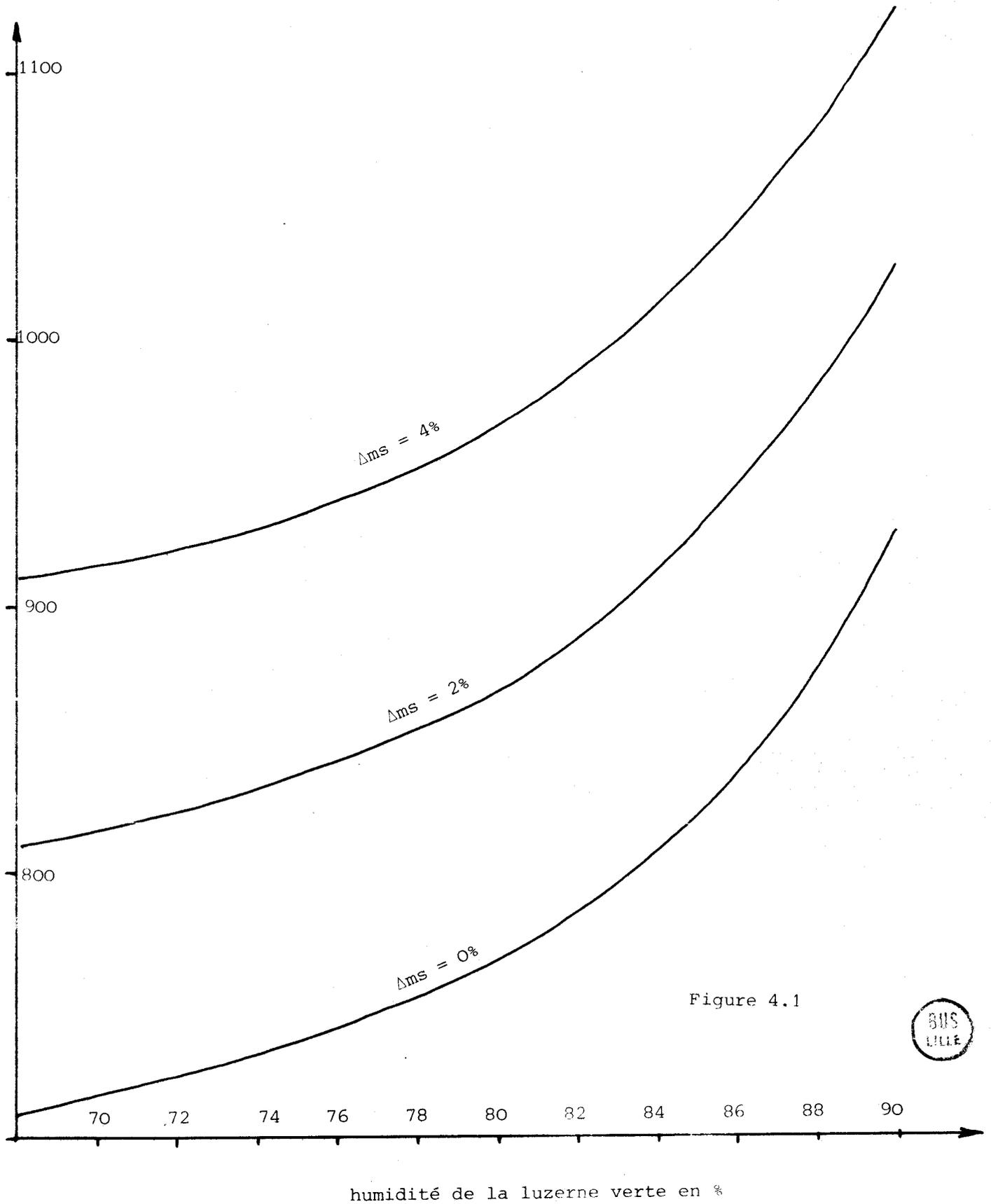


Figure 4.1



humidité de la luzerne verte en %

simulation : débit d'eau à évaporer constant avec les paramètres constants suivants :

$T_s = 110^\circ\text{C}$, $H_s = 16\%$, $P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $\varphi_a = 0.6$, $D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N}$,
 $T_{rf} = 116^\circ\text{C}$

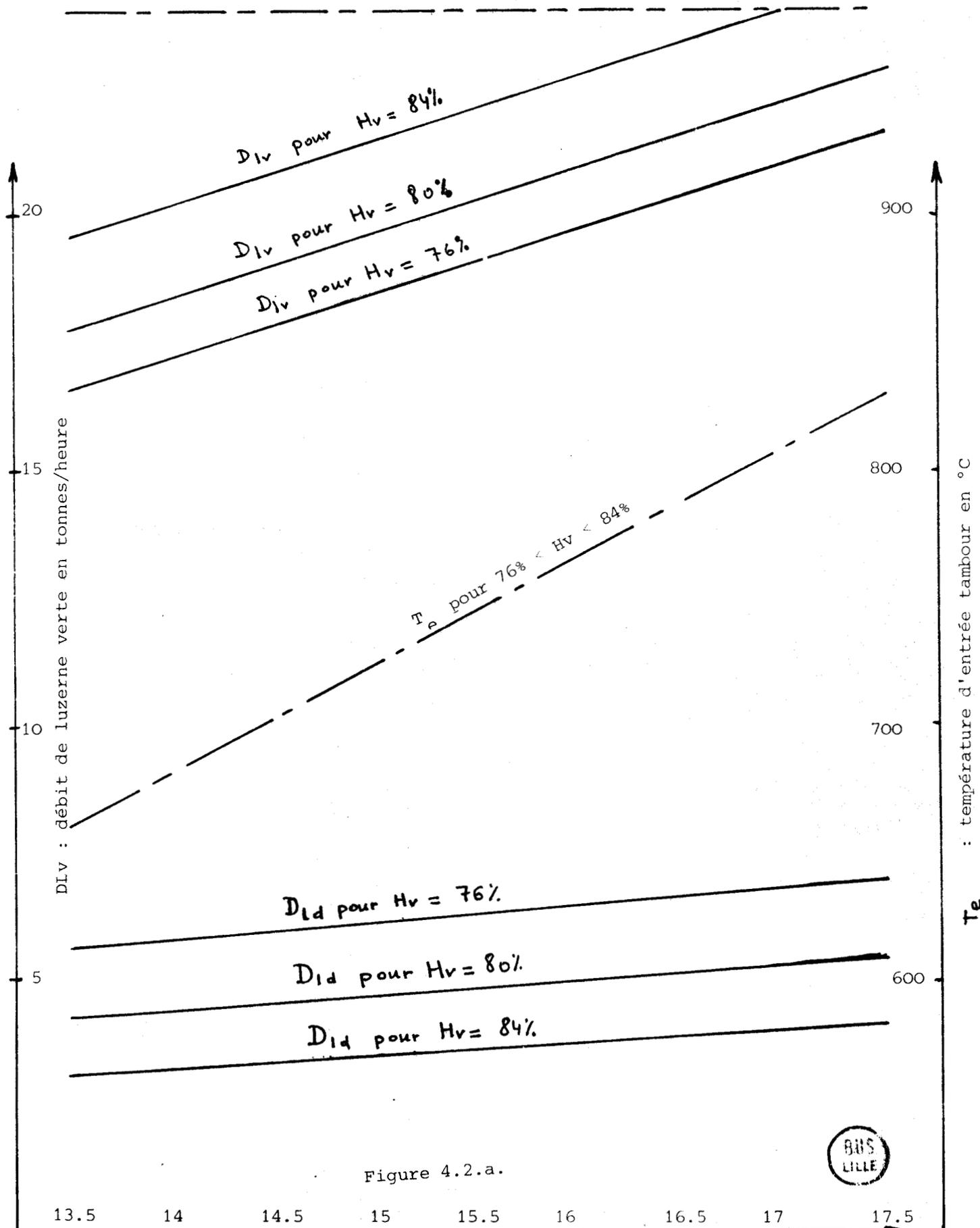


Figure 4.2.a.



W : Débit d'eau évaporée en tonnes/heure

Rendement et débit de combustible nécessaire pour des capacités évaporatoires constantes:

$$P_a = 760 \text{ mm Hg}, T_a = 26^\circ\text{C}, \varphi_a = 0.6, D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N},$$

$$H_s = 16\%, H_v = 80\%, T_{rf} = 116^\circ\text{C},$$

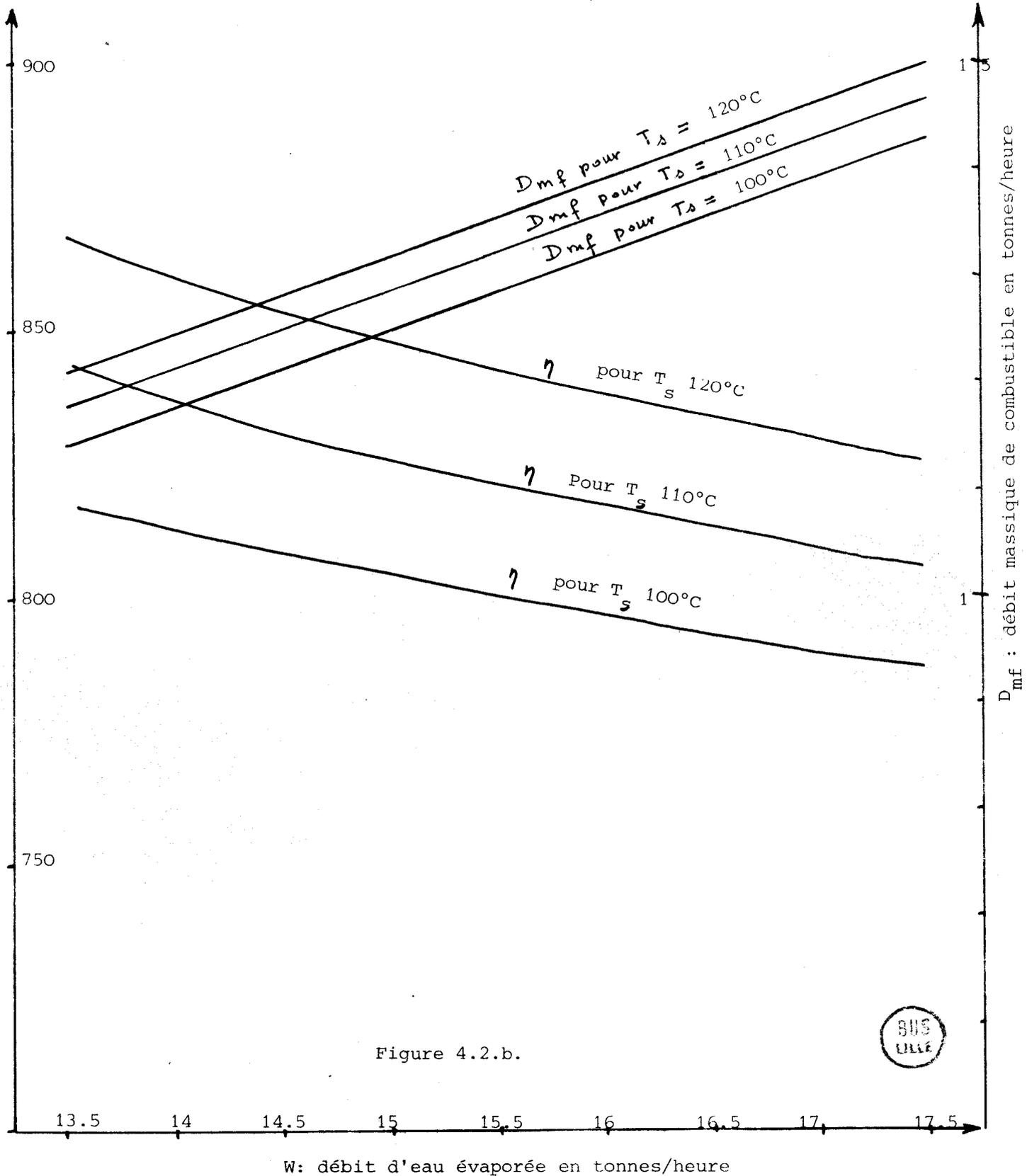


Figure 4.2.b.



Influence de la température des gaz sortie générateur en fonction de l'humidité du produit pour différentes capacités évaporatoires :

$P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $\phi_a = 0.6$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N}$, $H_s = 16\%$,

$t_{rf} = 116^\circ\text{C}$, $T_s = 110^\circ\text{C}$

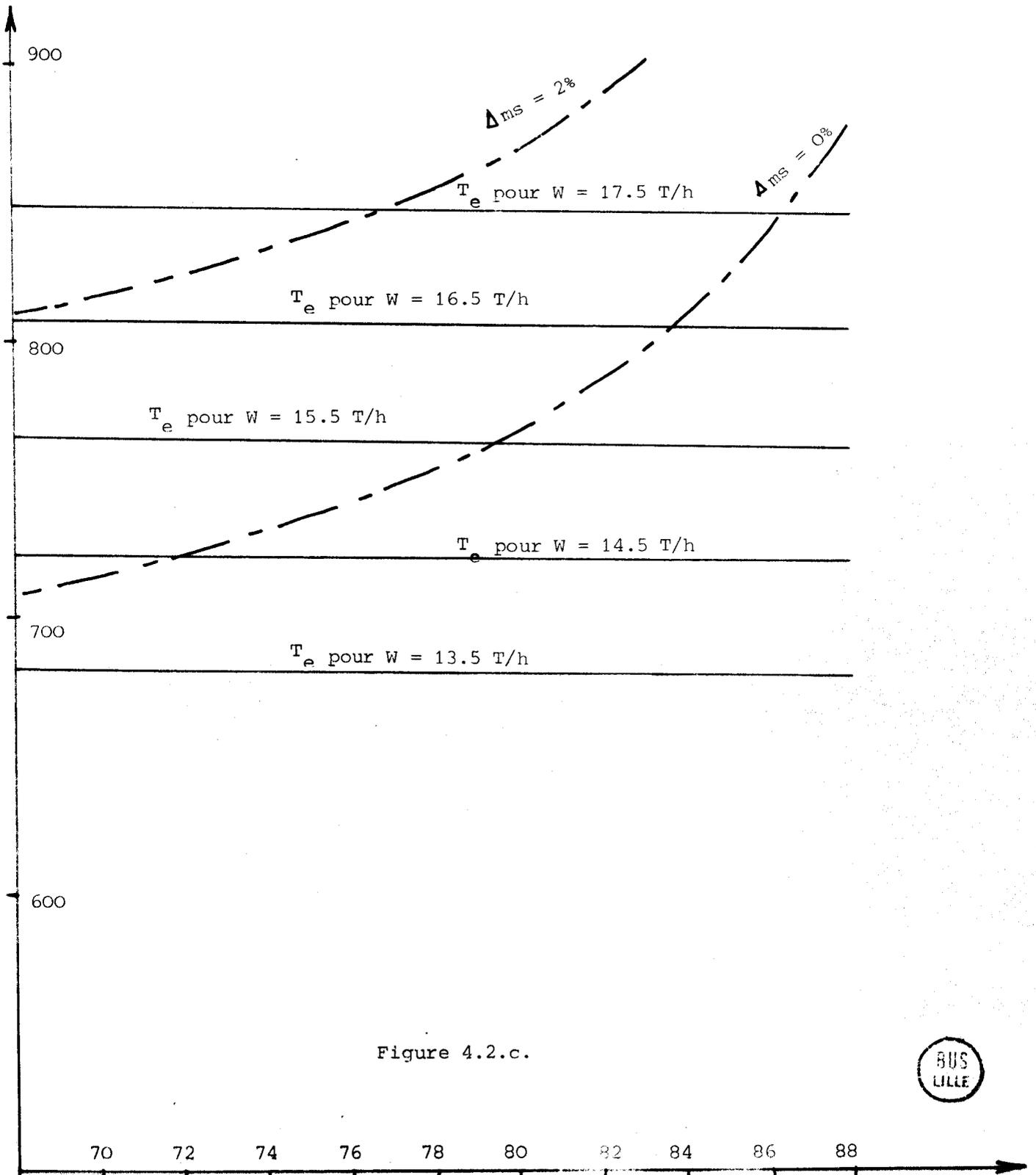


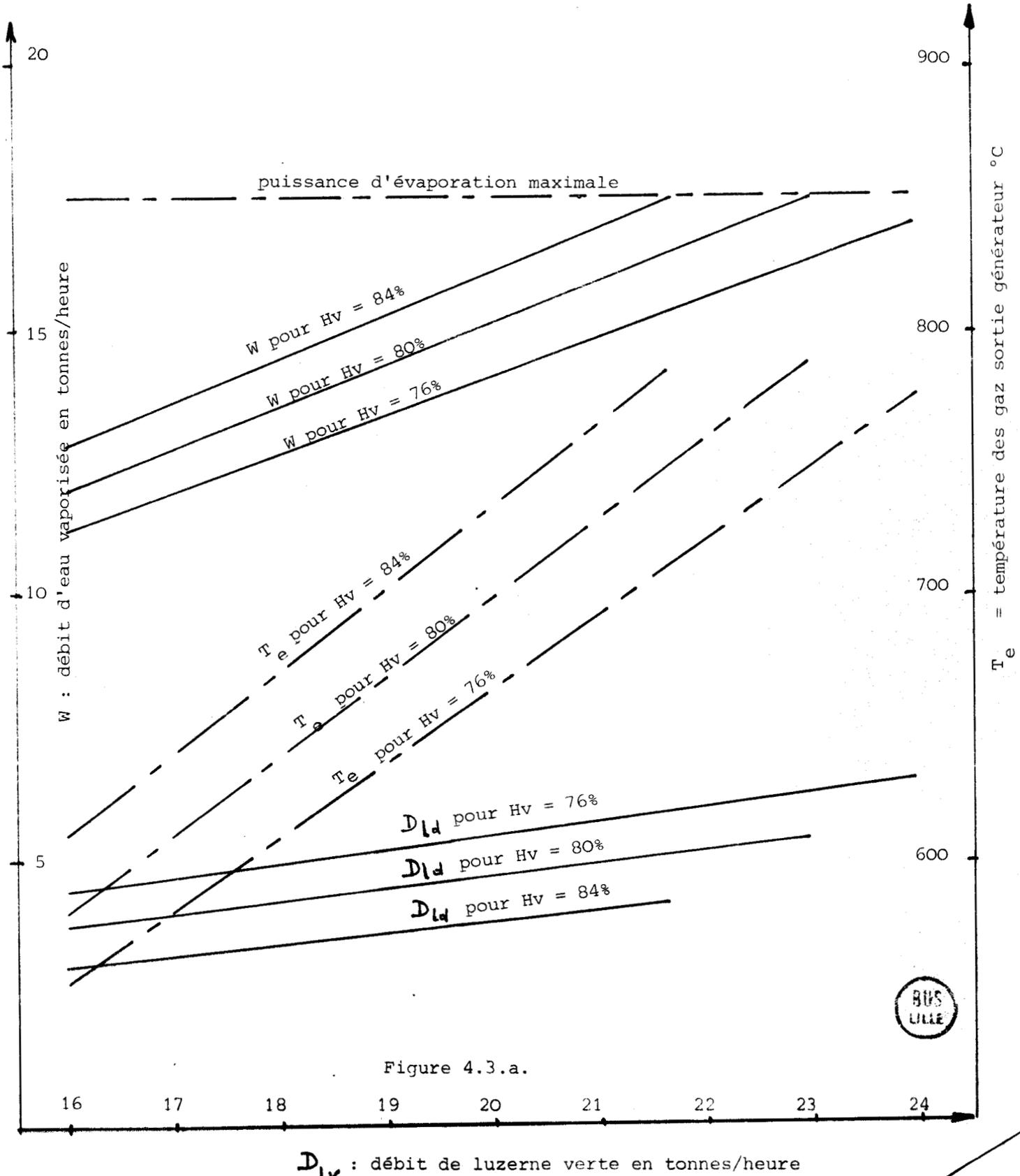
Figure 4.2.c.



Simulation : débit de luzerne verte constant avec les paramètres suivants :

$$T_s = 110^\circ\text{C}, H_s = 16\%, P_a = 760 \text{ mm Hg}, T_a = 26^\circ\text{C}, \varphi_a = 0.6,$$

$$D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N}, T_{rf} = 116^\circ\text{C}$$

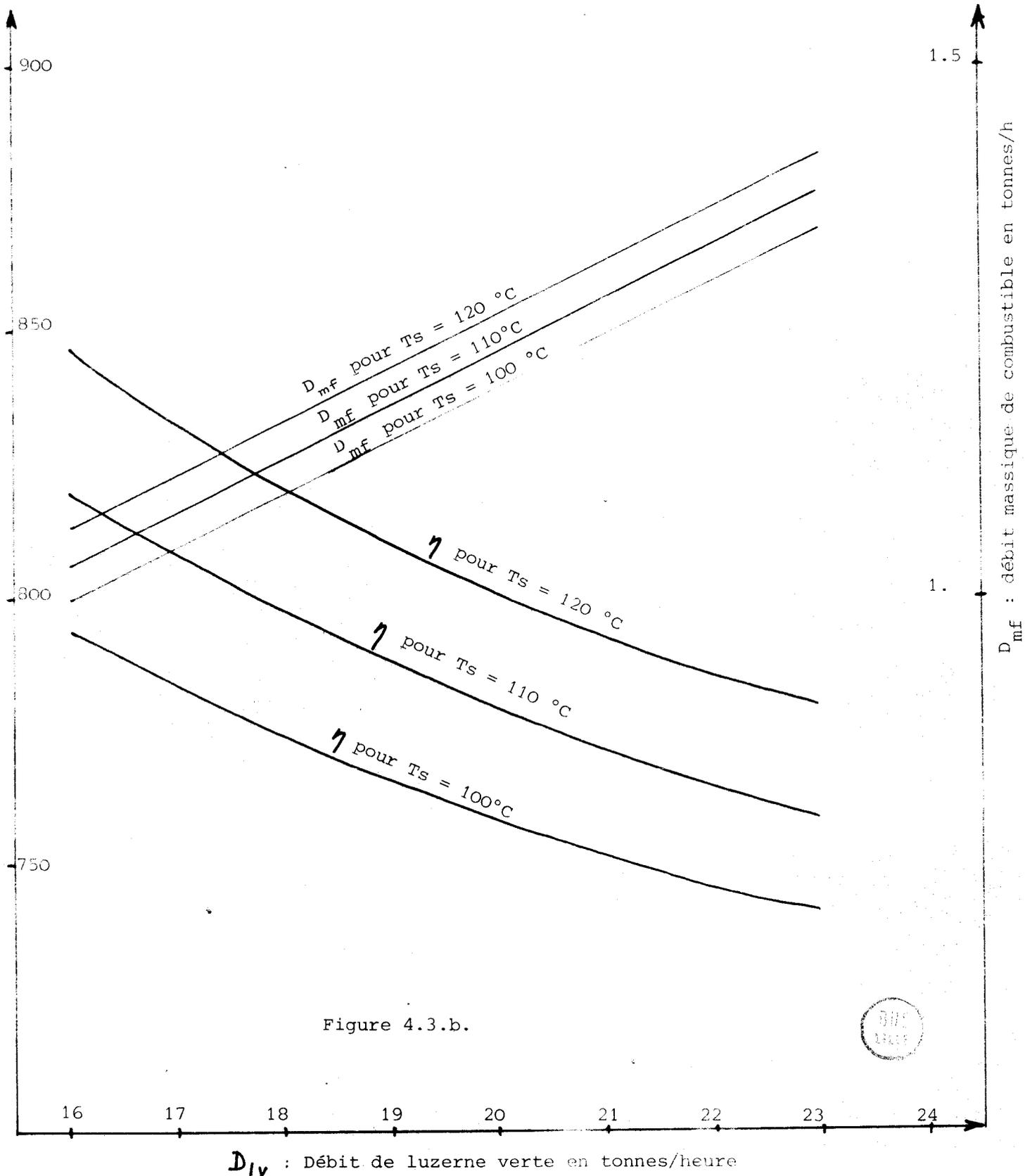


IV.17

Rendement et débit de combustible nécessaire pour des débits de luzerne verte constant.

$$P_a = 760 \text{ mm Hg}, T_a = 26^\circ\text{C}, \varphi_a = 0.6, D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N}$$

$$H_s = 16\%, H_v = 80\%, T_{rf} = 116^\circ\text{C}$$



Adaptation de la température des gaz sortie générateur de gaz chauds en fonction de l'humidité du produit vert et pour différents débit de luzerne verte

$P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $\varphi_a = 0.6$, $H_s = 16\%$, $T_{rf} = 116^\circ\text{C}$, $T_s = 110^\circ\text{C}$, $D_{gc} = 91205\text{m}^3\text{N}$

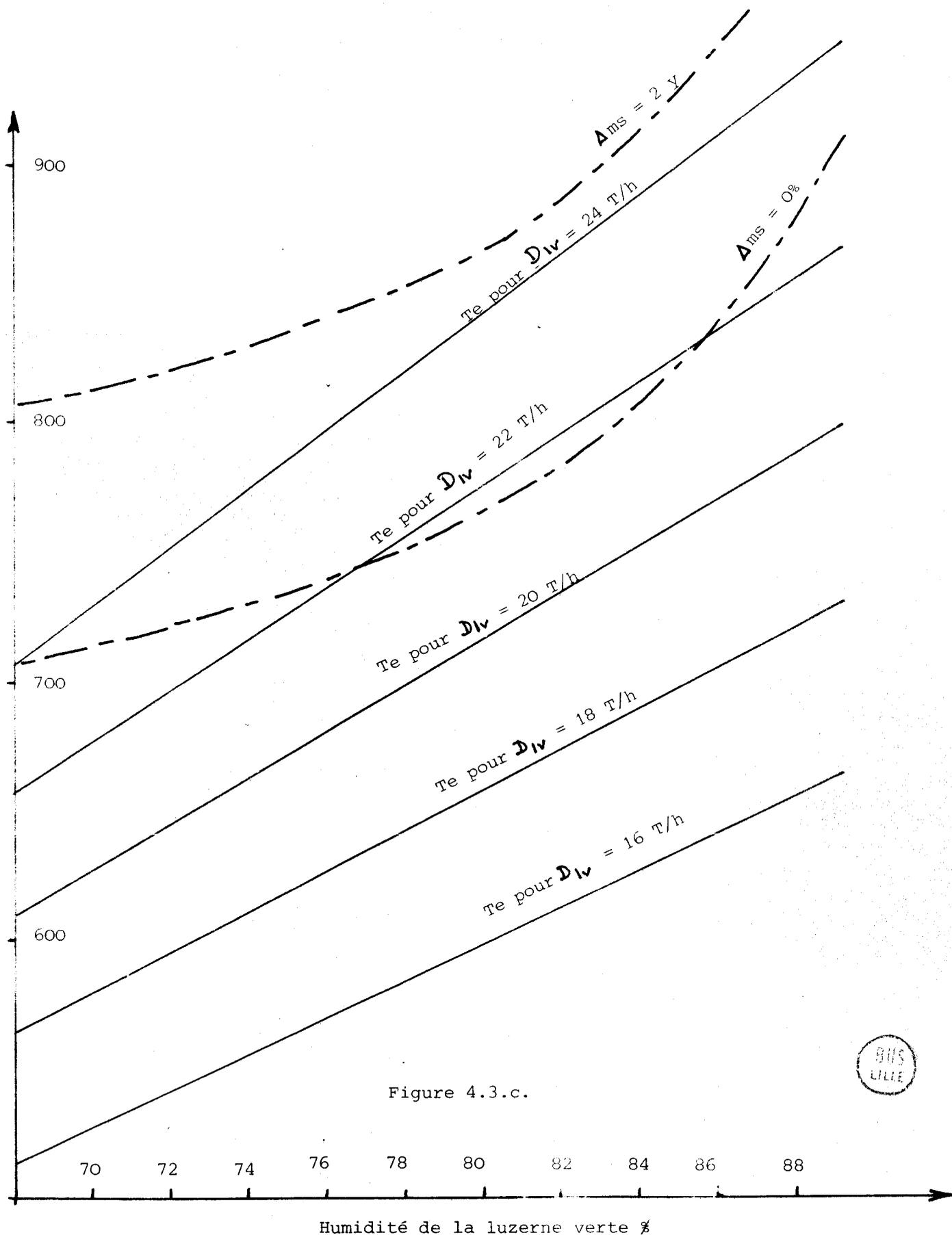


Figure 4.3.c.



Simulation débit de matière sèche constant avec les paramètres suivants :

$P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $H_s = 16\%$, $\varphi_a = 0.6$, $D_{gc} = 91205 \text{ m}^3\text{N}$, $T_{rf} = 116^\circ\text{C}$

$T_s = 110^\circ\text{C}$

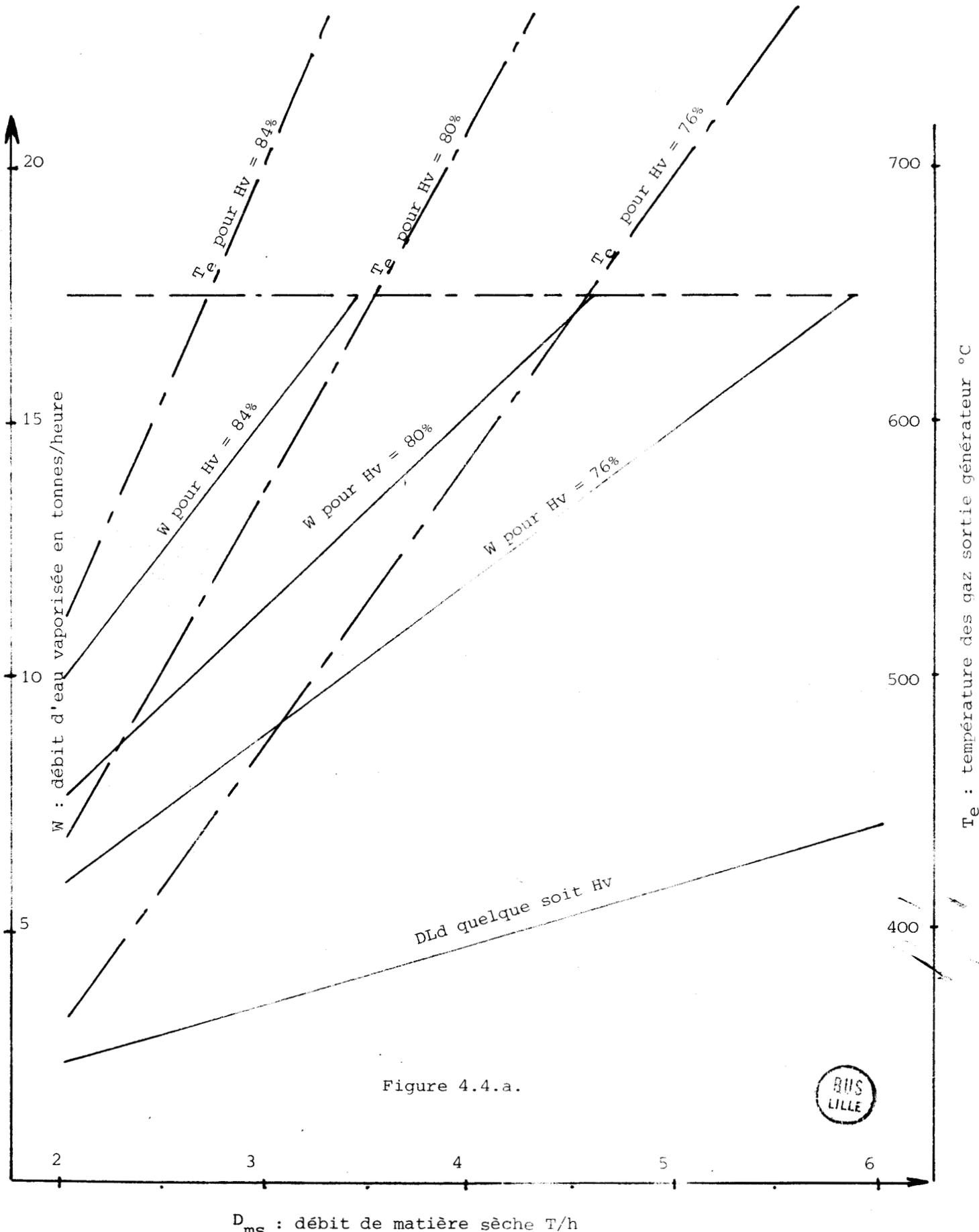


Figure 4.4.a.



Rendement et débit de combustible nécessaire pour des débits de matière sèche donnés avec les conditions suivantes :

$P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $\varphi_a = 0.6$, $D_{gc} = 91205 \text{ m3N}$, $H_s = 16\%$, $H_v = 80\%$

$T_{rf} = 116^\circ\text{C}$

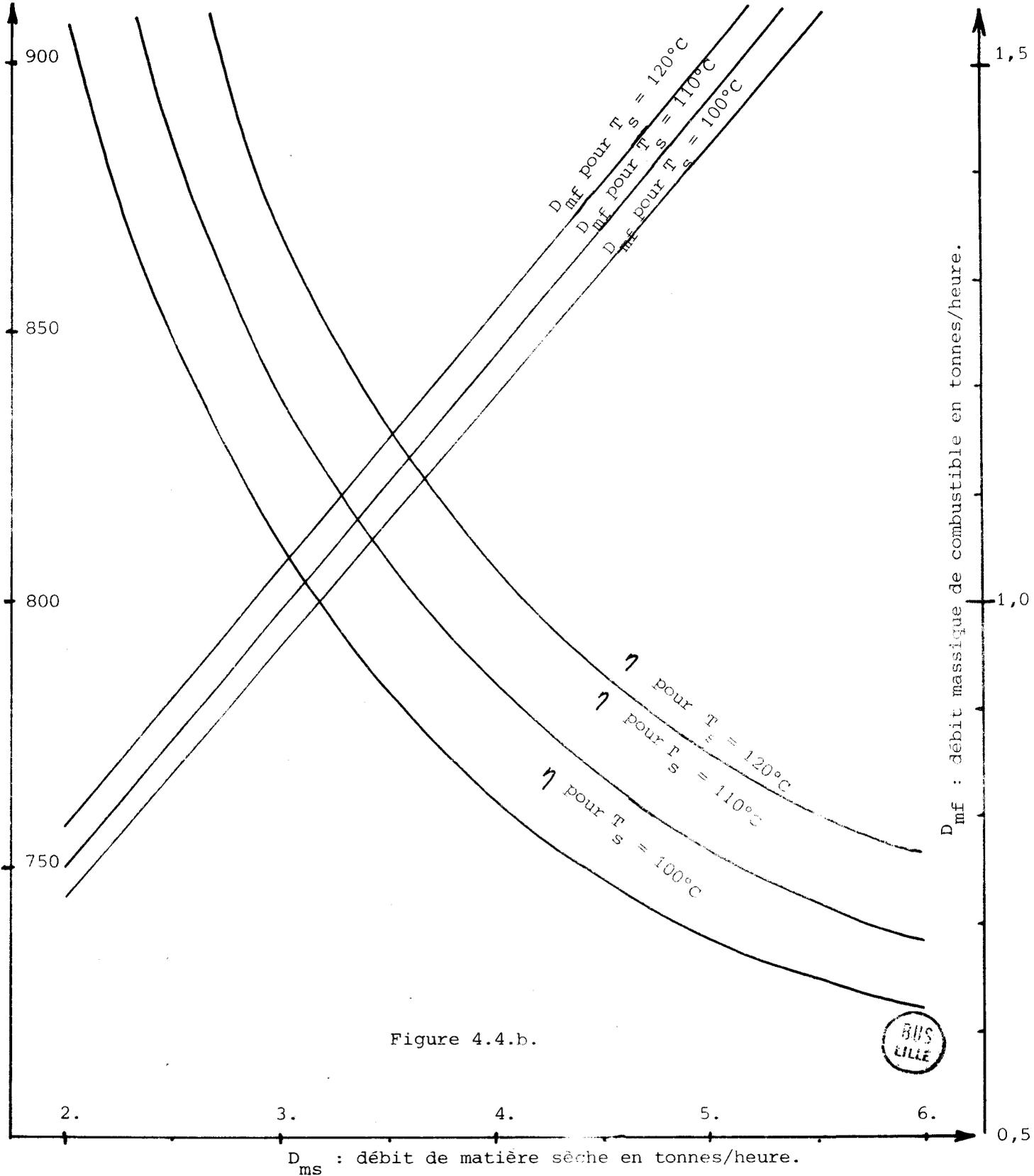


Figure 4.4.b.



Adaptation température des gaz sortie générateur en fonction de l'humidité du produit vert :

$P_a = 760 \text{ mm Hg}$, $T_a = 26^\circ\text{C}$, $\varphi_a = 0,6$, $T_s = 110^\circ\text{C}$, $H_s = 16\%$, $T_{rf} = 116^\circ\text{C}$

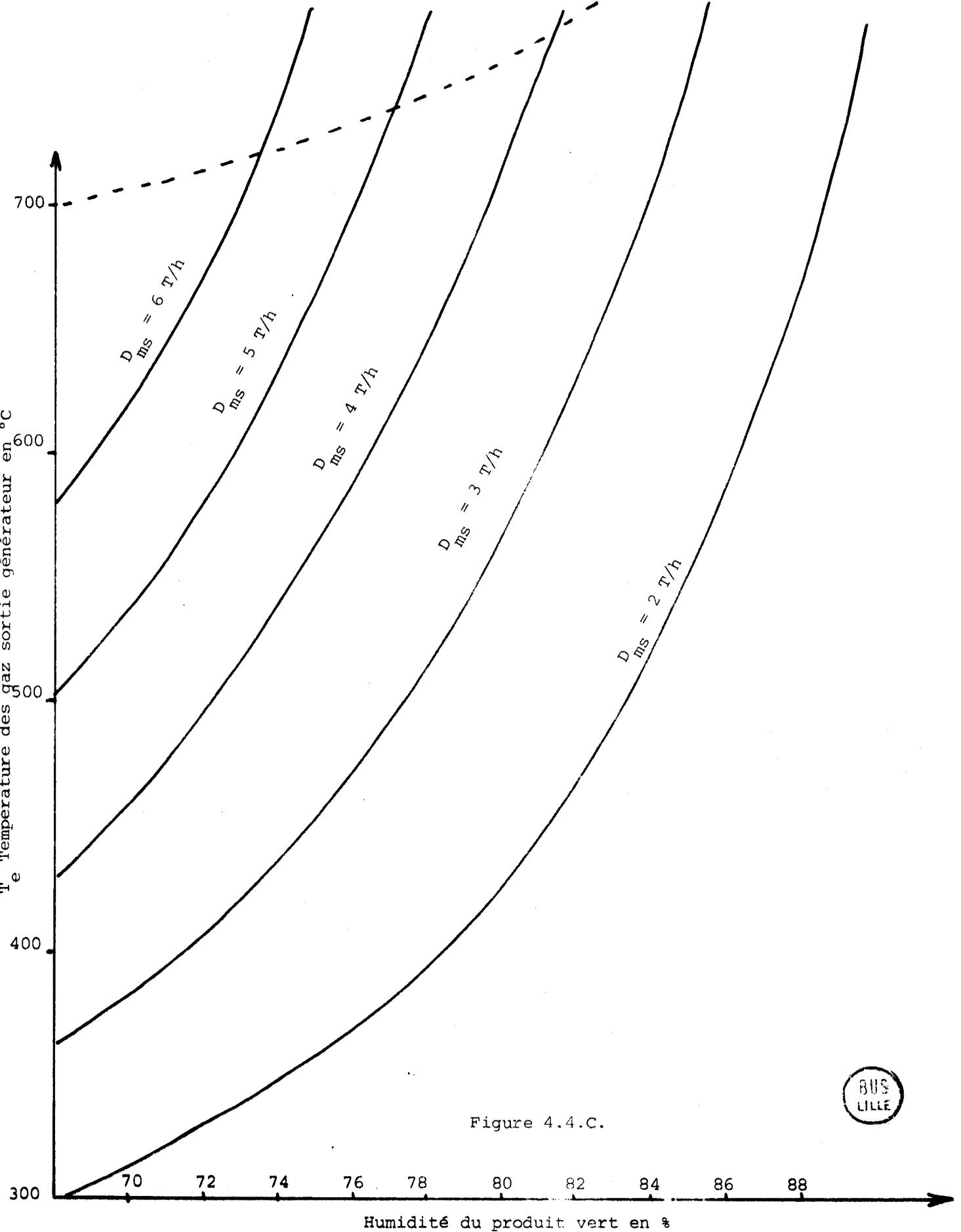


Figure 4.4.C.



CHAPITRE V

DEFINITION D'UN ENSEMBLE NUMERIQUE DE CONTROLE

V.1 - Introduction :

La raison principale qui a entraîné l'implantation d'un dispositif numérique est due aux difficultés rencontrées lors des expérimentations manuelles. Le Choix de la période d'échantillonnage, la rigueur d'exécution des relevés ont été des handicaps certains, car il n'était pas possible de conclure à partir de telles données. C'est pourquoi un système automatique d'acquisition de données a été implanté sur le site.

De plus la politique de commande défini précédemment, laisse entrevoir l'utilisation d'un calculateur numérique, plus souple et mieux adapté qu'un calculateur analogique.

V.2 - Présentation du système numérique :

Ce système assure le contrôle et la commande des organes manipulables implantés sur le processus. Il est constitué d'un calculateur numérique relié d'une part aux capteurs de mesures que nous allons définir et d'autre part à des organes de commande. Enfin il comporte un pupitre permettant la communication entre le conducteur du séchoir et le système.

Cette configuration assure donc deux fonctions principales :

- . acquisition de données
- . positionnement des actionneurs

On peut la schématiser comme suit figure 5.1.

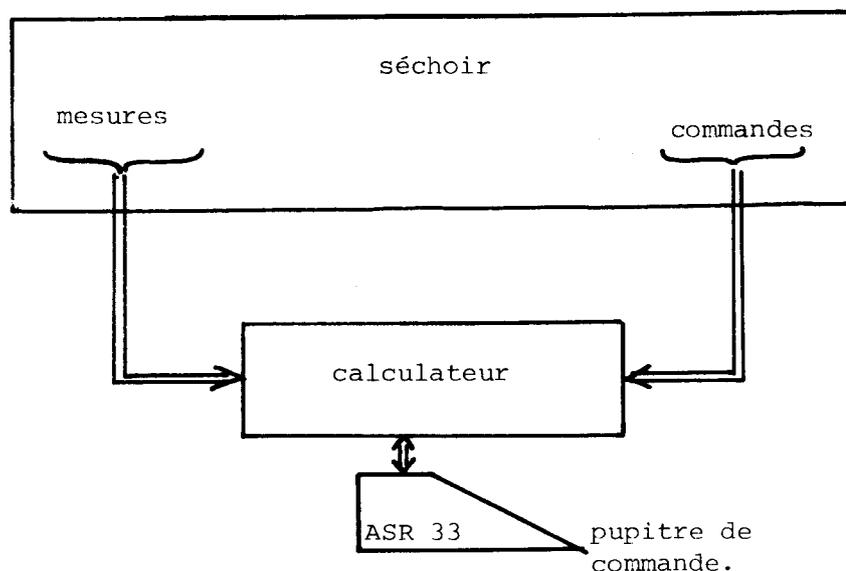


Figure 5.1

V.3 - Organisation de l'installation :

L'ensemble numérique implanté sur le site est centré sur un calculateur T 621 comportant des unités d'entrées sorties industrielles, un poste d'exploitation, et une baie de mesures. Les caractéristiques propres à chacun des sous systèmes sont détaillées dans la suite de cet exposé.

5.3.1. - Calculateur numérique :

C'est un calculateur industriel composé d'une mémoire centrale de 16 K octets ferrite. Il comporte huit niveaux d'interruption possédant chacun 126 registres de travail de type R.A.M.

Le bus est unique et les échanges unité centrale périphériques sont identiques à ceux entre l'unité centrale et la mémoire.

Le calculateur possède un système interne d'identification des pannes intempêtes suivantes :

- . défaut de bit de parité
- . défaut d'adressage mémoire
- . défaut d'alimentation

Ces dernières génèrent un appel sur le niveau le plus prioritaire et sont identifiées par une instruction spécialisée. Enfin en cas de coupure de courant, les batteries permettent de conserver les registres R.A.M. pendant 24 heures, et à la réapparition du courant le calculateur redémarre systématiquement à la même adresse.

5.3.2. - Programmation :

La combinaison des codes opérations avec les différents modes d'adressage permet d'obtenir 256 instructions. De plus le calculateur possède la particularité d'une instruction de type " Do ".

La programmation a été facilitée par l'emploi d'un macro-assembleur et d'une bibliothèque possédant les opérations mathématiques de base.

L'élaboration des programmes a été réalisée suivant le principe des interruptions prioritaires : le moniteur gère les interruptions de l'horloge temps réel et active les différentes tâches en fonction de la chronologie souhaitée.

5.3.3. - Equipements d'entrée/sortie :

Ils sont définis comme suit :

- . lecteur rapide de ruban perforé
- . télé imprimante A S R 33
- . horloge temps réel
- . cartes entrées/sorties numériques : relais, opto électriques
- . multiplexeur 16 voies
- . convertisseur analogique / digital avec résolution de 12 bits.

5.3.4. - Système de centralisation de mesures :

Un premier système d'acquisition de données avait été bati suivant le schéma classique :

- . conversion de la mesure sous une tension de 0-10 V.
- . multiplexeur
- . convertisseur analogique/numérique

Une telle structure résumée figure 5.2 a été abandonnée car elle laissait au calculateur les différentes taches suivant à exécuter :

- . activation multiplexeur , convertisseur
- . filtrage
- . linéarisation de données.

Ces différentes opérations grevaient le taux d'occupation de l'unité centrale, de plus l'information n'était pas directement utilisable, car elle demandait une intervention à partir de la télé imprimante. C'est pourquoi un système de centralisation a été défini.

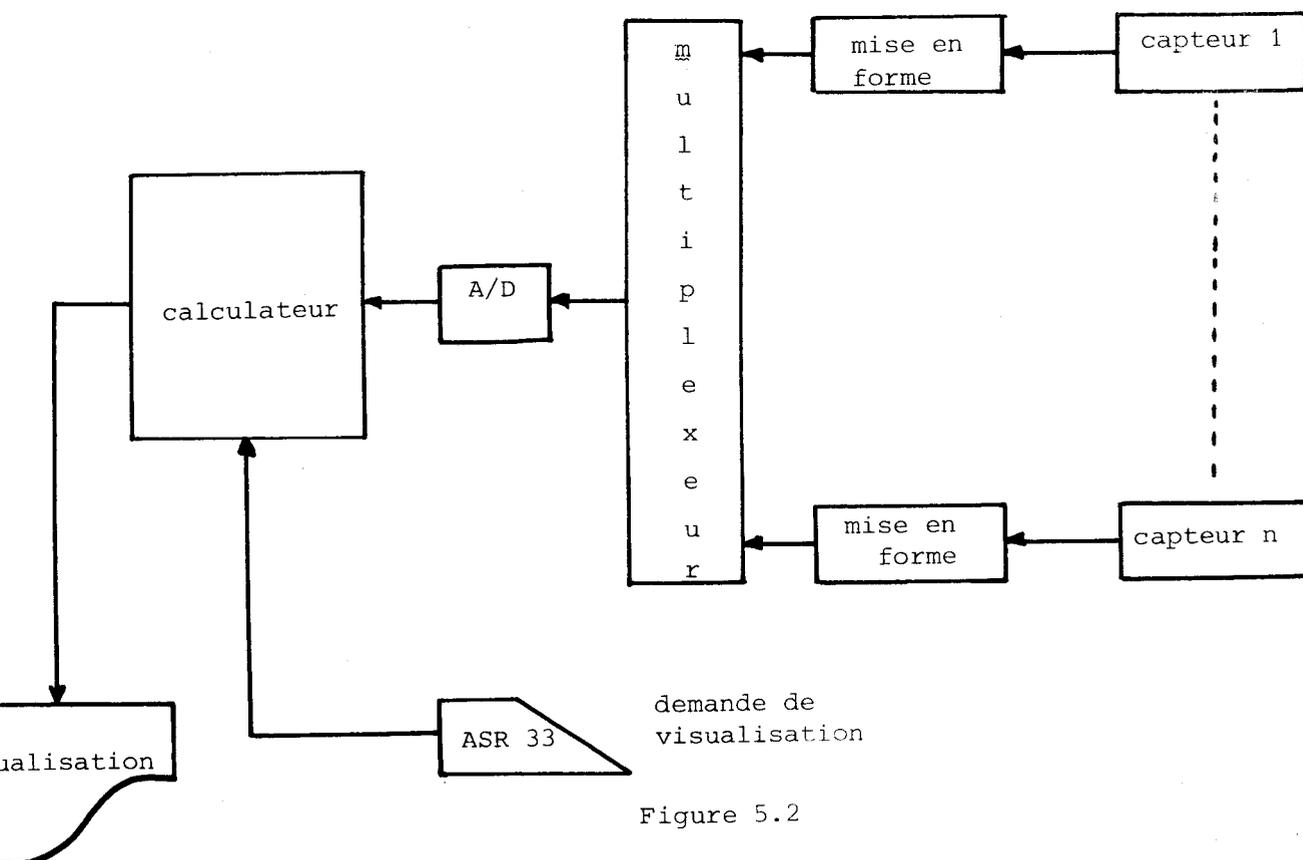


Figure 5.2

Le système actuel est constitué de deux éléments principaux :

- . le calculateur qui sert d'intermédiaire entre la baie de mesure et l'opérateur humain
- . la baie de mesure qui centralise les différents paramètres mesurés sur le séchoir.

L'intérêt d'un tel système repose sur le fait que toutes les informations issues du séchoir, et centralisées sur cette baie sont directement utilisables sous forme numérique en effet les différents traitements (filtrage linéarisation..) sont effectuées par cette baie. Ce qui permet au calculateur de saisir des données directement exploitables. L'échange entre le calculateur et la baie de mesure se fait par deux cartes, une d'entrée l'autre de sortie, le calculateur envoie le numéro de voie sélectionnée, la baie transmet le contenu de cette voie. Ce système est schématisé figure 5.3.

5.3.5. - Système de commande des actionneurs :

Les trois organes commandables sur le séchoir sont les suivants :

- . vanne du débit de combustible
- . vitesse de rotation de tambour
- . vitesse de défilement du tapis d'alimentation.

Ces commandes se font par tout ou rien, elles sont ramenées sur la baie de mesure ce qui permet d'actionner ces différents organes à partir du calculateur. L'organisation de l'installation est schématisée figure 5.3.

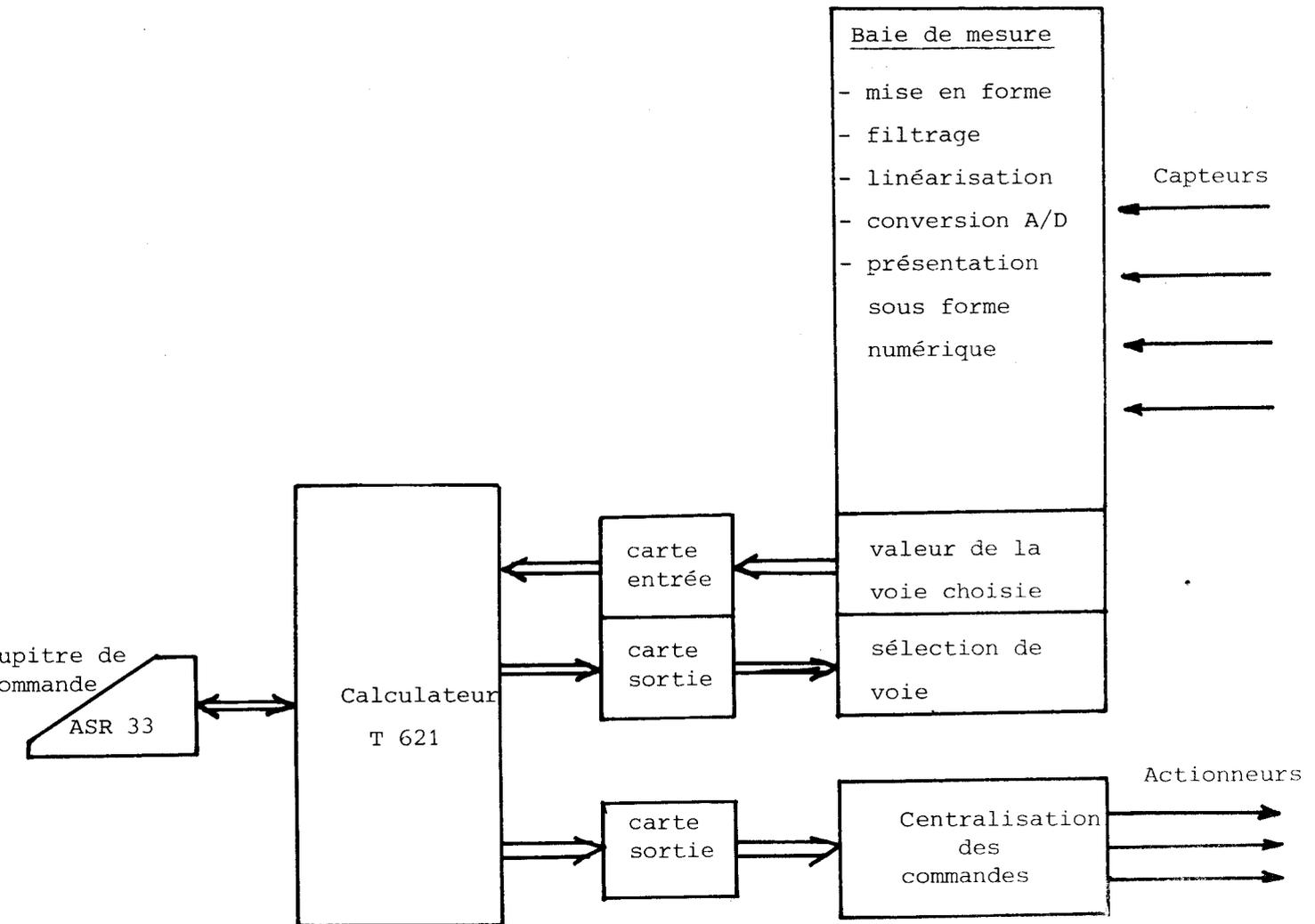


Figure 5.3

V.4 - Acquisition de données :

Avant de mettre en oeuvre la structure de commande, il convient de préciser qu'une automatisation ne peut et ne doit être envisagée que lorsque l'information nécessaire est disponible, fidèle et précise.

5.4.1. - Définition de l'information mesurée :

Les paramètres mesurés sur le site doivent être suffisants pour la mise en oeuvre de la politique de commande et la vérification du modèle statique évoqué précédemment.

Dans ce sens les grandeurs suivantes seront mesurées à savoir :

- . débit volumétrique de combustible
- . température des gaz en sortie générateur
- . vitesse de défilement du tapis d'alimentation en produit à sécher
- . débit massique de luzerne verte
- . vitesse de rotation du tambour
- . température des gaz en sortie tambour
- . température sèche et humide des gaz dans la cheminée
- . humidité des feuilles et des tiges séchées
- . humidité du produit vert

Parmi ces paramètres, certains sont accessibles directement par l'intermédiaire de capteurs, d'autres le sont indirectement en particulier les humidités du produit séché et du produit vert sur lesquels nous allons revenir.

5.4.2. - Elaboration de l'information directement accessible :

Cette étape consiste à choisir parmi les capteurs existants sur le marché, ceux qui répondent le mieux aux conditions exigées sur le site (Annexe B). Cette mise en oeuvre est souvent difficile et comporte les différentes phases suivantes :

- . choix des capteurs : il convient d'adapter la gamme de fonctionnement réel avec celles proposées par les constructeurs, de plus il ne faut oublier les conditions d'exploitation (atmosphère poussiéreuse, oxydante ...)
- . emplacement des capteurs : implique le choix approprié de la mise en place de ceux-ci, en effet chaque capteur effectue une mesure ponctuelle qui doit en fait refléter la tendance moyenne.
- . transport de l'information : c'est souvent la phase la plus laborieuse en effet elle consiste à transporter l'information du site vers la centralisation de données, et ce, en supprimant les parasites.

- . exploitation de l'information : dans notre cas le traitement est effectué par la baie de mesures.

5.4.3. - Capteur d'humidité de produit séché :

Ce capteur n'existait pas sur le marché, il nous a donc été nécessaire de le développer et de le rendre opérationnel, ceci grâce à la Coopération du Laboratoire de mesures automatiques du Professeur LEBRUN, qui avait développé un capteur pour la mesure d'humidité dans la levure.

Ce capteur se présente sous la forme d'une capacité co axiale (figure 5.4) composée d'un tronçon de canalisation métallique qui constitue l'électrode extérieure et d'un conducteur de diamètre approprié, maintenu au centre de cette canalisation. Ce système présente en fonction des caractéristiques diélectriques du produit qui le traverse des variations de capacité et de conductance.

De façon générale, un système électronique assure la séparation des grandeurs variables (capacité et conductance) et relie les variations d'humidité du produit aux variations de capacité du capteur. La fréquence délivrée par le signal est donc fonction de l'humidité du produit, une visualisation numérique permet son exploitation avec une précision suffisante (0.3%).

Il est a noté qu'une telle mesure dépend de la température du produit, on introduit alors une correction de température, cette dernière est mesurée par une sonde thermométrique placée sur le capteur.

L'humidimètre peut donc être décomposé en trois parties distinctes :

- . le capteur et son électronique que nous venons de présenter
- . le dispositif de commande
- . le dispositif d'exploitation de l'information.

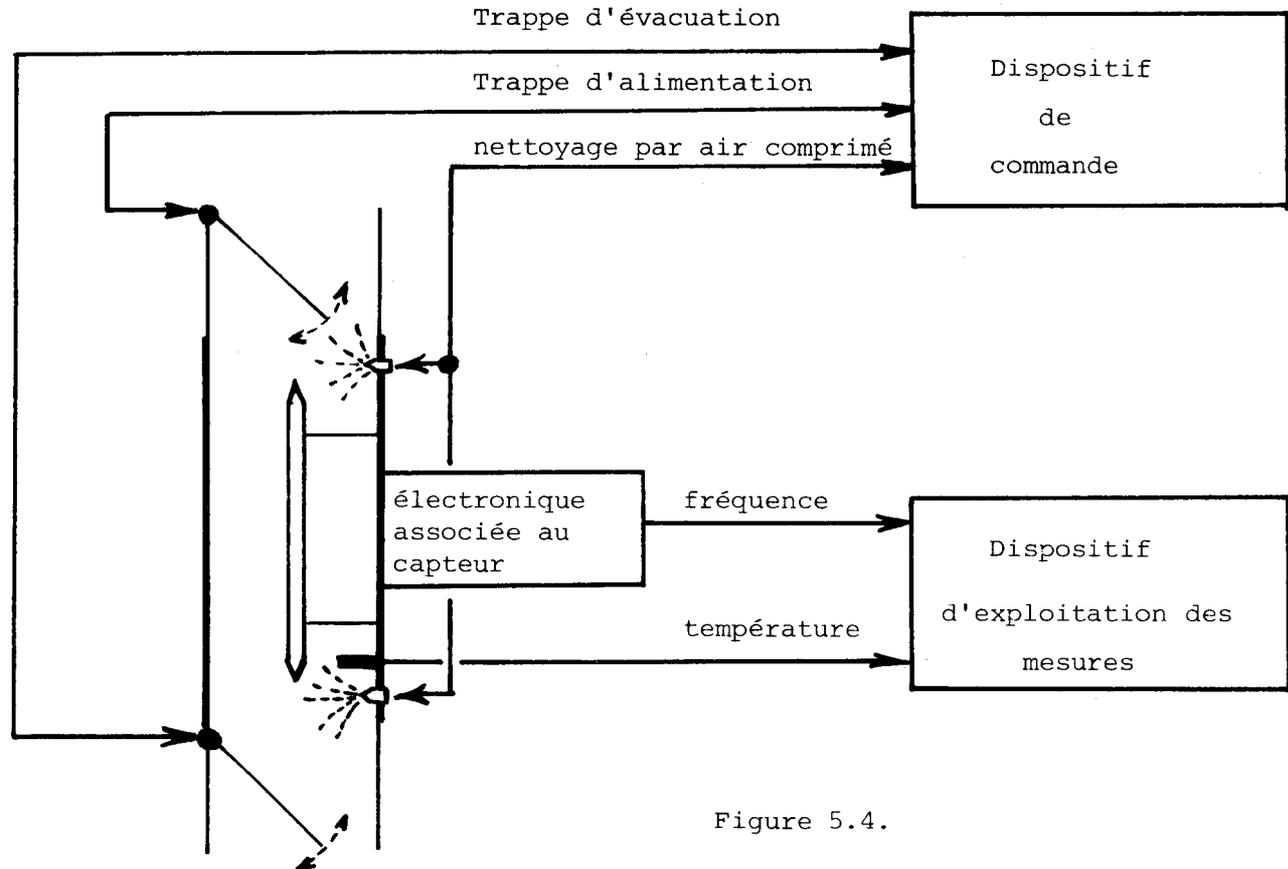


Figure 5.4.

5.4.3.1. - Le dispositif de commande :

L'obtention d'une mesure précise nécessite une excellente reproductibilité du remplissage de la cellule, en particulier dans le cas d'une farine le tassement à un rôle important.

Cette condition est satisfaite en utilisant un dispositif de commande de remplissage et d'évacuation de la cellule. Ce dispositif est constitué d'un jeu de trappe l'une assurant le remplissage de la cellule l'autre la retenue et l'évacuation du produit de la cellule. L'obtention d'une mesure s'effectue suivant le cycle suivant :

- On s'assure que la cellule est vide et propre, ceci s'obtient en comparant la fréquence lue à celle du tarage à vide, qui est également fonction de la température de la cellule. (figure 5.5) si la cellule n'est pas vide on envoie de l'air comprimé à l'intérieur de la cellule pour la nettoyer jusqu'à ce que la fréquence lue atteigne celle de référence de tarage. Dans cet état la trappe supérieure est fermée celle inférieure est ouverte.

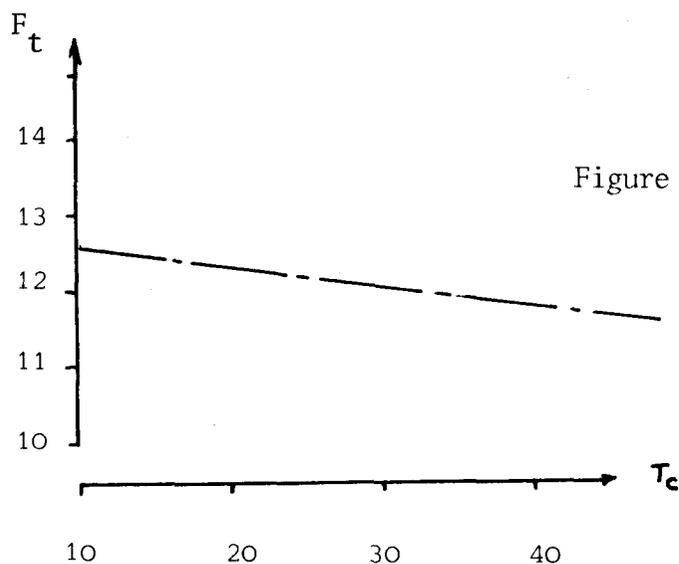


Figure 5.5

F_t Fréquence de tarage de la cellule vide en MHz

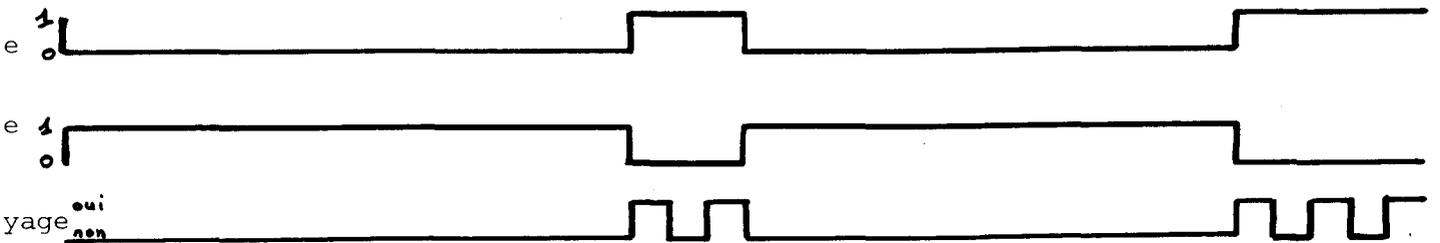
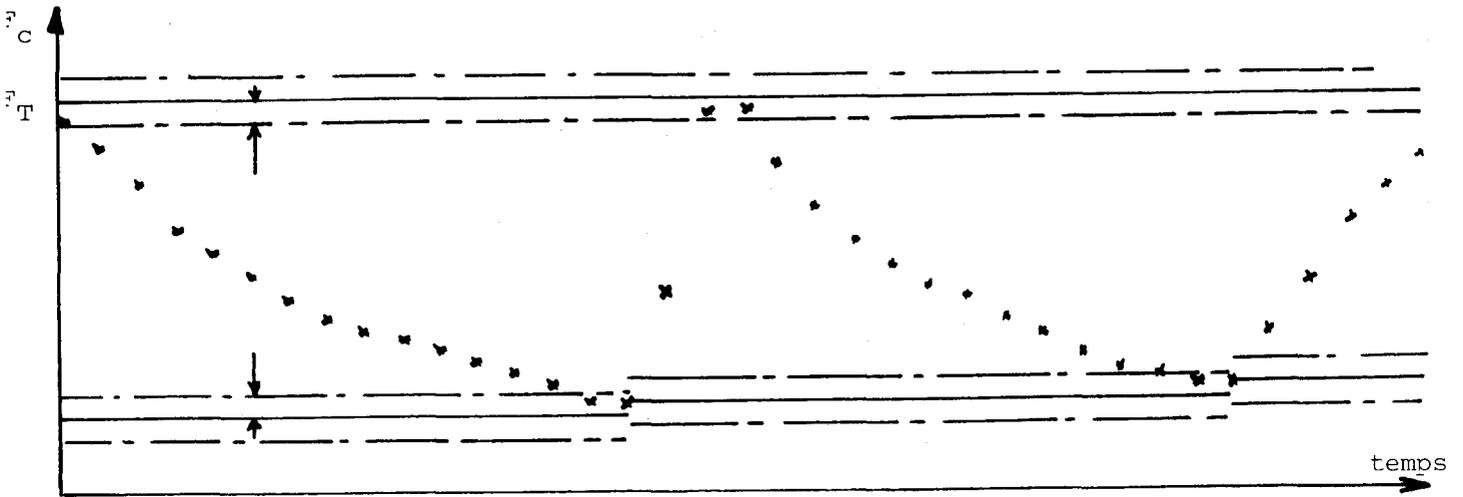
T_c température de la cellule de mesure

- Quand la cellule est vide, on ouvre la trappe du haut pendant un temps ΔT , ce qui permet d'éliminer le bouchon de produit au dessus de la trappe d'alimentation qui pourrait ainsi fausser la mesure. Cette temporisation passée on ferme la trappe du bas pour effectuer le remplissage de la cellule.

- Pendant le remplissage la fréquence délivrée diminue proportionnellement au remplissage pour se stabiliser lorsque la cellule est pleine. On vérifie que cette cellule est pleine en comparant la fréquence ainsi mesurée à la précédente. Si la mesure est incluse dans le voisinage de la précédente alors la cellule est pleine sinon on attend la fin du remplissage. Ce test permet d'éviter de prendre des mesures inexactes dues aux irrégularités d'alimentation.

- La cellule pleine on mesure la fréquence délivrée ainsi que la température. On ferme ensuite la trappe d'alimentation et on ouvre celle d'évacuation en attendant que la cellule soit vide, et on recommence ainsi le cycle. Ce dernier est schématisé figure 5.6.

Un tel dispositif permet d'obtenir une valeur d'humidité du produit séché toutes les trente secondes.



F_C Δ fréquence lue au capteur
 F_T Δ fréquence de tarage à vide

Fonctionnement des trappes :

- 0 : ouverte
- 1 : fermée

Figure 5.6

5.4.3.2. - Dispositif d'exploitation de la mesure :

L'étalonnage de l'humidimètre est obtenu par comparaison avec des humidités obtenues par étuve. On obtient ainsi un certain nombre de couples de mesures fréquence.-température et leur correspondant en humidité du produit. Il est alors possible de tracer un abaque donnant la relation entre humidité du produit, fréquence et température issues du capteur. (figure 5.7) A partir de ces points il est alors possible d'obtenir une relation expérimentale du type :

$$H_S = f_S (F_c, T_C)$$

H_S Δ humidité du produit séché

$F_c \triangleq$ fréquence fournie par le capteur

$T_c \triangleq$ température fournie par le capteur

Il convient de remarquer que cet étallonnage est valable pour un produit donné.

5.4.3.3. - Exploitation du capteur :

Dans notre cas le dispositif de commande est élaboré par le calculateur ainsi que l'exploitation de la mesure qui permet d'obtenir une mesure directement utilisable . Le principe de l'exploitation du capteur est schématisé figure 5.8.

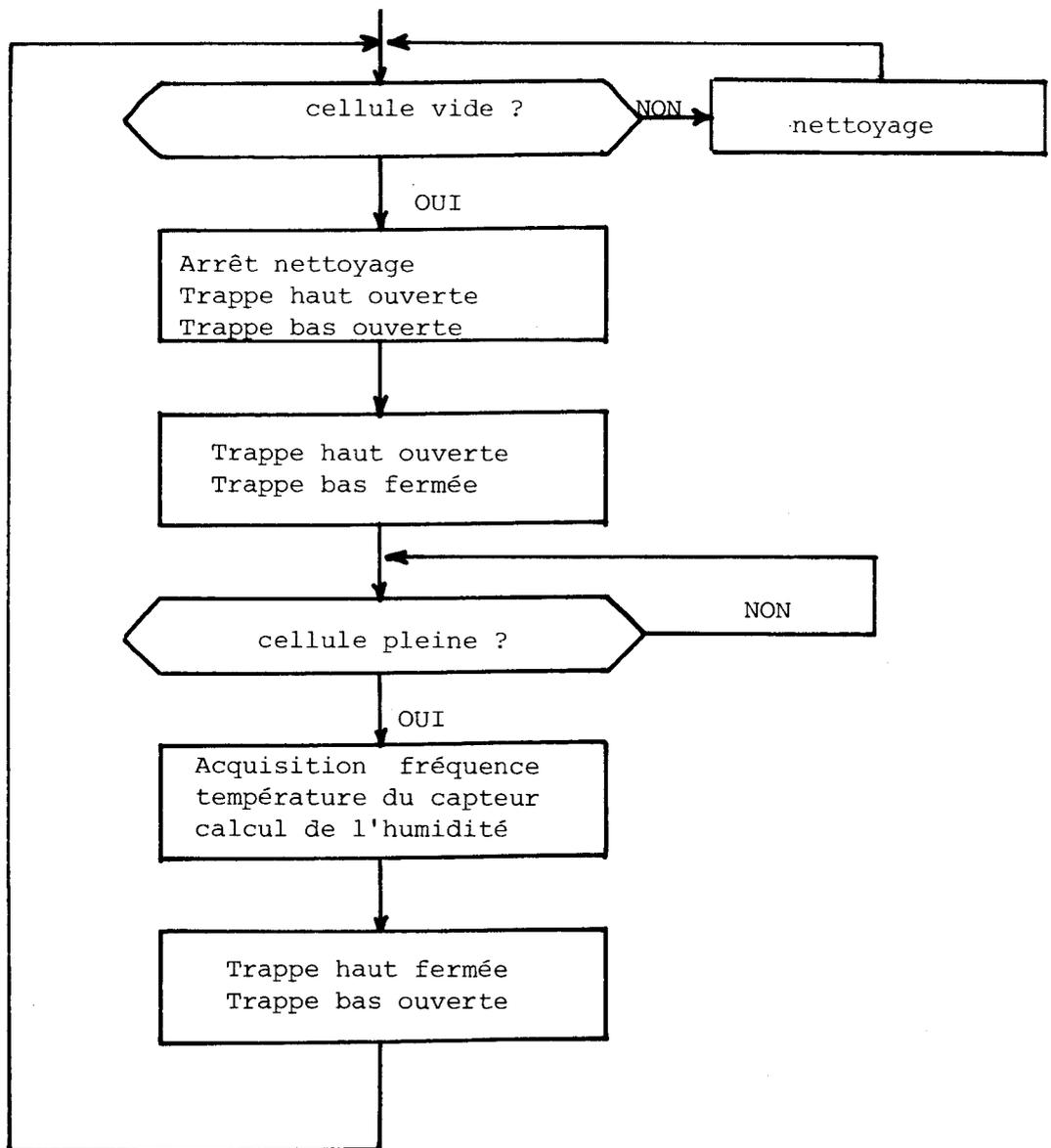


Figure 5.8

5.4.4. - Estimateur d'humidité du produit vert :

Les systèmes existants sur le marché à l'heure actuelle pour mesurer l'humidité d'un produit tel que la luzerne verte sont difficilement exploitables en temps réel d'une part et leur technologie en font des capteurs extrêmement onéreux. Une étude a donc été entreprise dont le but était d'obtenir par des mesures indirectes une estimation de la valeur de l'humidité du produit vert.

L'idée de base est la suivante : pour une vitesse de défilement du tapis et pour une humidité du produit vert nous obtenons un débit de luzerne verte, si nous modifions la vitesse du tapis nous obtiendrons un autre débit soit :

$$5.1 \quad g (V_t + d V_t) = D_{lv} + d D_{lv}$$

ou encore :

$$5.2 \quad g (V_t + d V_t) = D_{ms} + d D_{ms} + W + d W$$

L'étude a consisté à étudier l'existence ou non d'une corrélation entre la vitesse de défilement du tapis et le débit de matière sèche ou la quantité d'eau contenue dans cette luzerne. On peut résumer cette étude par la formulation suivante :

$$\exists ?_{g1} \quad \text{tel que} \quad D_{ms} = g_1 (V_t)$$

5.3

$$\exists ?_{g2} \quad \text{tel que} \quad W = g_r (V_t)$$

Une première étude permis de conclure qu'il n'existait pas de corrélation entre la vitesse de défilement du tapis et la quantité d'eau contenue dans la luzerne. Par contre la seconde nous a permis d'établir qu'il existe d'après les résultats expérimentaux une corrélation linéaire entre la vitesse du tapis et le débit de matière sèche soit encore :

$$5.4 \quad D_{ms} = c V_t + d$$

c,d : coefficients de régression.

Il convient toutefois de remarquer que ces coefficients dépendent de la coupe de la luzerne et de la nature de celle-ci; mais en fait les résultats expérimentaux (figure 5.8) permettent d'établir que la dispersion est faible.

5.4.4.1. - Mise en oeuvre pratique de l'estimateur d'humidité :

A partir de la relation précédemment établie, et de la mesure du débit de luzerne verte nous constatons donc qu'il est possible d'estimer l'humidité du produit vert, en effet le débit de luzerne verte est donné par l'expression suivante :

$$5.5 \quad D_{lv} = D_{ms} + W + E_r = D_{ms} + E_t$$

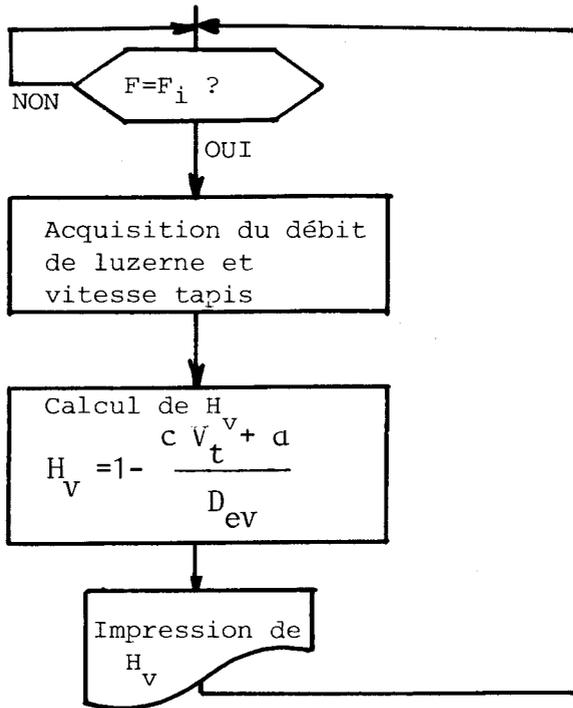
l'humidité est défini par la relation :

$$5.6 \quad H_v = \frac{E_t}{D_{lv}} = \frac{D_{lv} - D_{ms}}{D_{lv}}$$

En remplaçant l'expression du débit de matière sèche par son expression 5.4 on obtient alors :

$$5.7 \quad \tilde{H}_v = 1 - \frac{c V_t + d}{D_{lv}}$$

l'estimation de l'humidité du produit vert est schématisée par la figure 5.10



F_i fréquence de scrutation

Figure 5.10

V.5 - Commande de positionnement des actionneurs :

Après avoir précisé les moyens mis en oeuvre à l'élaboration de l'information nécessaire à la politique de commande, il nous reste à présenter la commande des différents actionneurs existants sur les séchoirs à savoir :

- . vanne du débit de combustible
- . motovariateur de la vitesse du tapis d'alimentation
- . motovariateur de la vitesse de rotation du tambour

Comme nous l'avons vu les commandes existantes se font par tout ou rien avec deux sens de variations, " plus vite " ou " moins vite " .

La méthode choisie pour la commande du positionnement des actionneurs consiste à partir de la valeur de l'écart de définir le sens de variation, et à partir de la valeur absolue de l'écart, définir l'un des deux modes d'actions suivants : commande " tout " - commande modulée.

Le schéma 5.11 résume la méthode :

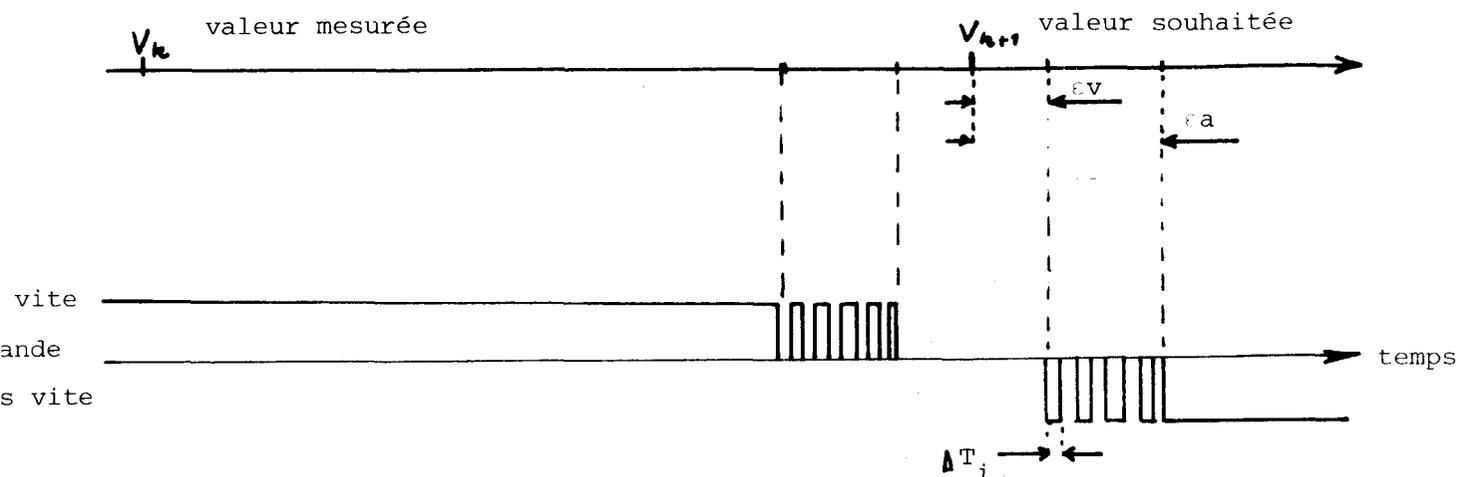


Figure 5.11

Il faut remarquer que pour une telle commande nous avons choisi :

ϵ_v Δ fluctuations maximales de la mesure. (variance)

ϵ_a Δ écart minima de sorte qu'il n'y ait pas de dépassement de la valeur de référence pour une commande " tout " et sans commande modulée.

ΔT_i Δ largeur de la modulation de commande, fonction de l'inertie du système

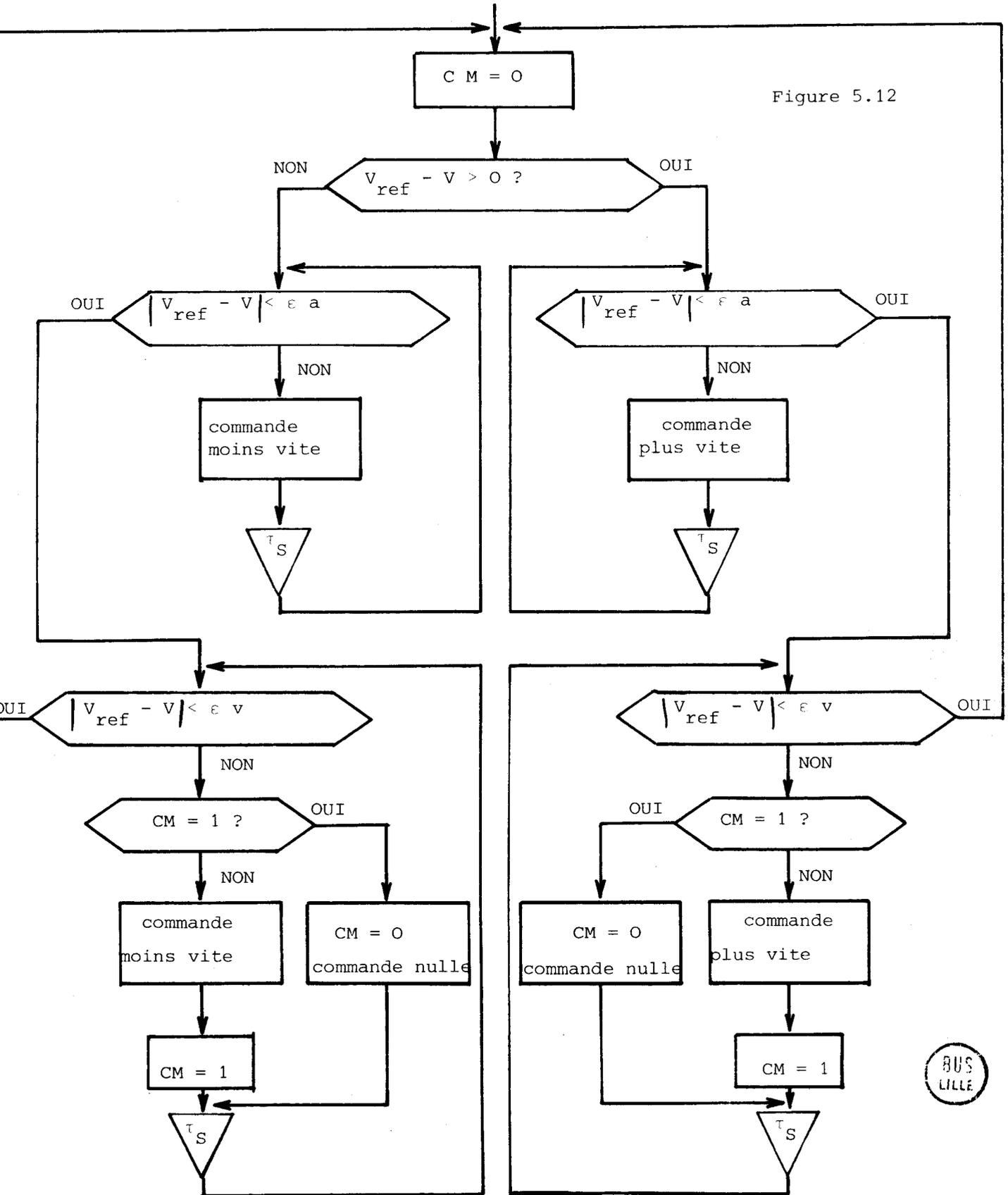
$\epsilon_v, \epsilon_a, \Delta T_i$ sont fonction des caractéristiques propres au système à positionner.

Dans notre cas nous avons été amené à définir une commande uniquement modulée pour le positionnement de la vitesse de rotation de tambour car ce système ne possède pas d'inertie.

Une commande mixte pour le positionnement de la vanne du débit de combustible ceci à cause du jeu dans les bielles, qui entraîne un retard d'action au démarrage.

Une commande " tout ou rien " pour la variation de la vitesse du tapis d'alimentation à cause de la grande inertie de ce système.

A titre d'exemple l'organisation du programme de positionnement de débit de combustible est résumé figure 5.12



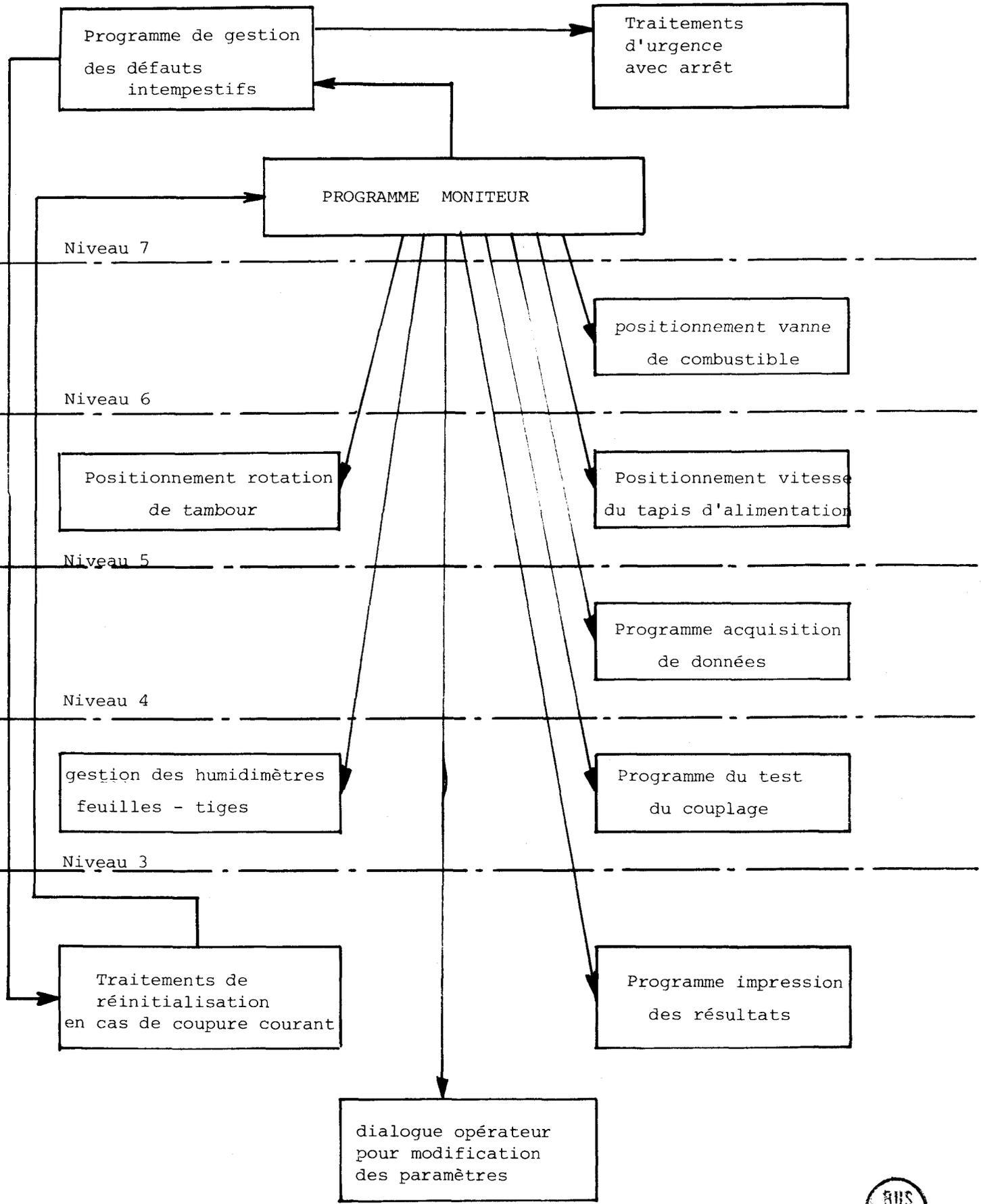
BUS LILLE

V.6 - Mise en oeuvre du programme de contrôle :

Le système implanté sur le site permet l'acquisition de données avec mémorisation sur bande perforée, le positionnement des différents actionneurs de plus il est conversationnel et permet de modifier les paramètres suivants :

- . fréquence d'acquisition des mesures dont la période minimale est de 100 ms.
- . fréquence d'impression des mesures sur bande perforée, cette dernière doit être au moins égale ou supérieure à celle d'acquisition, de plus les valeurs mémorisées sur bande perforée sont les valeurs moyennes. Les différentes acquisitions pendant la période séparant deux impressions. La période minimale est de 5 secondes à cause du temps d'impression des résultats sur la télé imprimante.
- . fréquence de strutation de l'humidimètre dont la période minimale est de 100 ms.
- . voisinages $\{\epsilon_v\}$ correspondant aux variances des différents paramètres manipulables :
 ϵ_{vF} pour le débit de combustible, ϵ_{vN} pour la rotation de tambour et ϵ_{vV} pour la vitesse du tapis
- . voisinage ϵ_{vF} correspondant à la stabilité de la mesure de fréquence pour l'humidimètre.

Le programme est constitué d'un noyau central qui gère les différentes tâches à exécuter, il est représenté à la figure (5.13)



Niveau 0

Figure 5.13



5.6.1. - Présentation des différentes tâches :

Nous définissons la tâche comme un ensemble d'instructions élémentaires nécessaires à la réalisation d'un but bien défini.

a) Tâche acquisition de données :
.....

elle consiste à faire l'acquisition des voies de mesures, a stocker cette information dans une table et comptabiliser le nombre d'acquisition de chaque donnée.

b) Tâche test du couplage :
.....

afin de tester si le couplage n'est pas défaillant on teste périodiquement deux voies de référence l'une à zéro l'autre à un. Lorsqu'il n'y a pas concordance on fait imprimer un message de défaut couplage.

c) Tâche impression des résultats :
.....

elle consiste à aller chercher le contenu de chaque réservation de voie dans une table, à calculer la mesure moyenne à l'imprimer sur la télé imprimante.

d) Positionnement des actionneurs :
.....

ces trois tâches consistent à positionner chaque actionneur aux valeurs de référence, et à les y maintenir

e) Tâche humidimètre :
.....

elle gère le capteur d'humidité d'après le cycle précédemment défini afin d'obtenir une mesure de fréquences et de température.

f) Tâche dialogue :
.....

Celle-ci permet à l'opérateur de modifier des fréquences ou des voisinages de sensibilité, toutes ces modifications sont introduites au clavier de la télé imprimante.

g) Tâche gestion des défauts intempestifs :

deux aiguillages sont possibles : l'arrêt du calculateur s'il existe un défaut de parité mémoire permanent et par conséquent une panne de mémoire centrale. La mise en attente en cas de panne de courant avec sauvegarde du contexte.

h) Tâche de réinitialisation :

en cas de réapparition du courant on relance les tâches dans le même contexte qu'avant cette coupure. Ceci permet d'éliminer les arrêts calculateurs et les redémarrages de programme.

5.6.2. - Organisation de l'exécution des tâches :

La programmation est basée sur le principe des interruptions prioritaires, celles-ci sont interprétées et gérées par un programme de gestion des priorités : le superviseur. Ce moniteur gère donc tous les programmes fonctionnels que l'on peut dissocier en deux classes :

- . tâches périodiques
- . acquisition de données
- . surveillance du couplage
- . impression des résultats
- . gestion des humidimètres
- . gestion du positionnement des actionneurs.
- . tâches non périodiques
- . les demandes de modification par l'intermédiaire du clavier
- . les traitements d'alarmes

De plus la conception même du calculateur est intéressante. En effet la gestion des niveaux d'interruption et le lancement des niveaux en fonction de leur hiérarchie est automatique.

L'attribution du niveau de priorité est directement lié à l'importance de la tâche. Dans notre cas nous avons opéré de la manière suivante :

- niveau 7 : programme superviseur et tâche de gestion des défauts intempestifs.
- niveau 6 : positionnement de la vanne de combustible, en effet c'est un élément qu'il faut contrôler impérativement.
- niveau 5 : positionnement de la vitesse de défilement du tapis d'alimentation et de la vitesse de rotation tambour
- niveau 4 :. humidimètre feuilles-tiges
- niveau 3 : acquisition de données et test de couplage
- niveau 0 : dialogue opérateur-calculateur

Impression des données sur bande perforée
Traitement de réinitialisation après réapparition du courant.

Dans ce dernier cas, le système d'attribution des priorités a perdu son contexte, le calculateur redémarre donc sur le niveau 0.

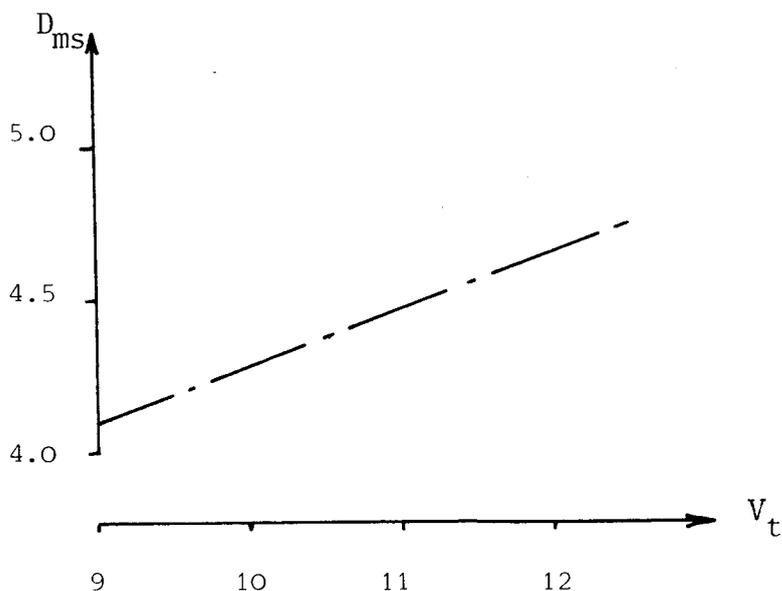
Dans un tel contexte le niveau le plus prioritaire est le septième, c'est également sur ce dernier qu'est connectée l'horloge temps réel qui sert de référence dans le cadencement des différentes tâches.

V.7 - Conclusion :

Nous venons de présenter le système d'acquisition de données et de positionnement de point de consigne qui permet donc l'acquisition de données mémorisées sur bande perforée, dont le but est d'améliorer notre connaissance du procédé par des traitements hors ligne.

Ce système est souple car il permet de conduire le séchoir à partir de la console et des renseignements fournis par la baie de mesures. Il nous a notamment servi à effectuer une conduite assistée, dont le but était d'étudier l'évolution du système soumis aux grandeurs d'entrée, la régulation du constructeur étant déconnectée.

Le système de contrôle est opérationnel, il nous faut maintenant présenter l'évolution possible de nos recherches sur un tel système qui sera le but du prochain chapitre.



D_{ms} Débit de matière sèche en tonnes/heure
 V_t tension de la génératrice tachymétrique du tapis d'alimentation en volt

figure 5.7

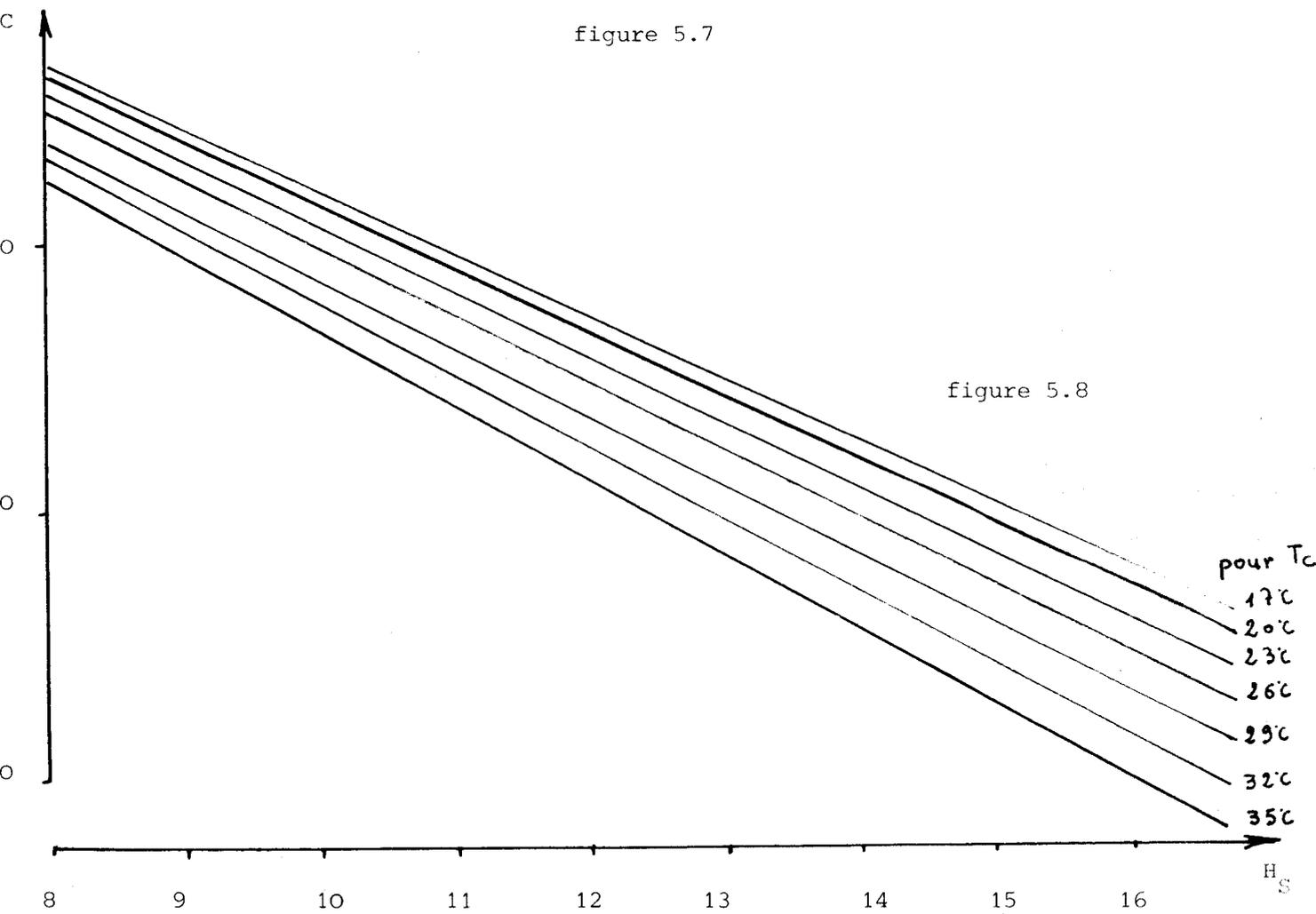


figure 5.8

F_C fréquence fournie par le capteur en MHz
 H_S humidité du produit séché en %
 T_C température du capteur



CHAPITRE VI

PROPOSITION DE CONDUITE ET DE CONTROLE
DES SECHOIRS A TAMBOUR ROTATIF.

VI.1 - Introduction :

Les résultats de l'analyse du processus menée par décomposition en sous systèmes et associée à la modélisation et aux résultats obtenus par simulation à partir du modèle statique intégrant les contraintes naturelles du système nous ont permis d'élaborer une politique de commande générale applicable aux séchoirs à tambour rotatifs.

Le but de ce chapitre est de présenter l'application de cette politique de commande à un séchoir de type industriel. Pour la réalisation de tels objectifs nous avons envisagé l'automatisation des séchoirs en deux étapes que nous allons développer ci-après :

- commande assistée par ordinateur numérique
- commande automatique par ordinateur numérique

Le principe fondamental de ces deux réalisations est schématisé figure 6.1

Il comporte deux aspects essentiels :

- boucle de tendance
- contrôle de l'état des grandeurs de sortie du séchoir.

La boucle de tendance permet de prépositionner le débit de combustible à son régime nominal en fonction de l'état des variables de commande à l'entrée du séchoir et pour des valeurs des variables de contrôle données en sortie du séchoir. De plus on vérifie systématiquement si l'adaptation de la température des gaz à l'entrée du séchoir par rapport à l'humidité du produit vert est vérifiée, si cette relation ne l'est pas on repositionne le débit de luzerne à sa valeur nominale.

Le contrôle de l'état des grandeurs de sortie du séchoir est plus complexe, afin d'assurer un meilleur rendement thermodynamique et qualitatif, nous avons deux variables à contrôler soit :

la température des gaz à la sortie du séchoir, celle-ci doit être incluse dans le domaine suivant $[100 T_{sm}]$ définie précédemment si elle s'en écarte il faut donc agir sur le débit de luzerne qui est trop (ou pas assez) élevé. Ceci afin d'assurer un meilleur rendement de l'installation.

L'humidité du produit séché : doit être également incluse dans un domaine de variation admissible si elle s'en écarte une action sur le débit de combustible est nécessaire

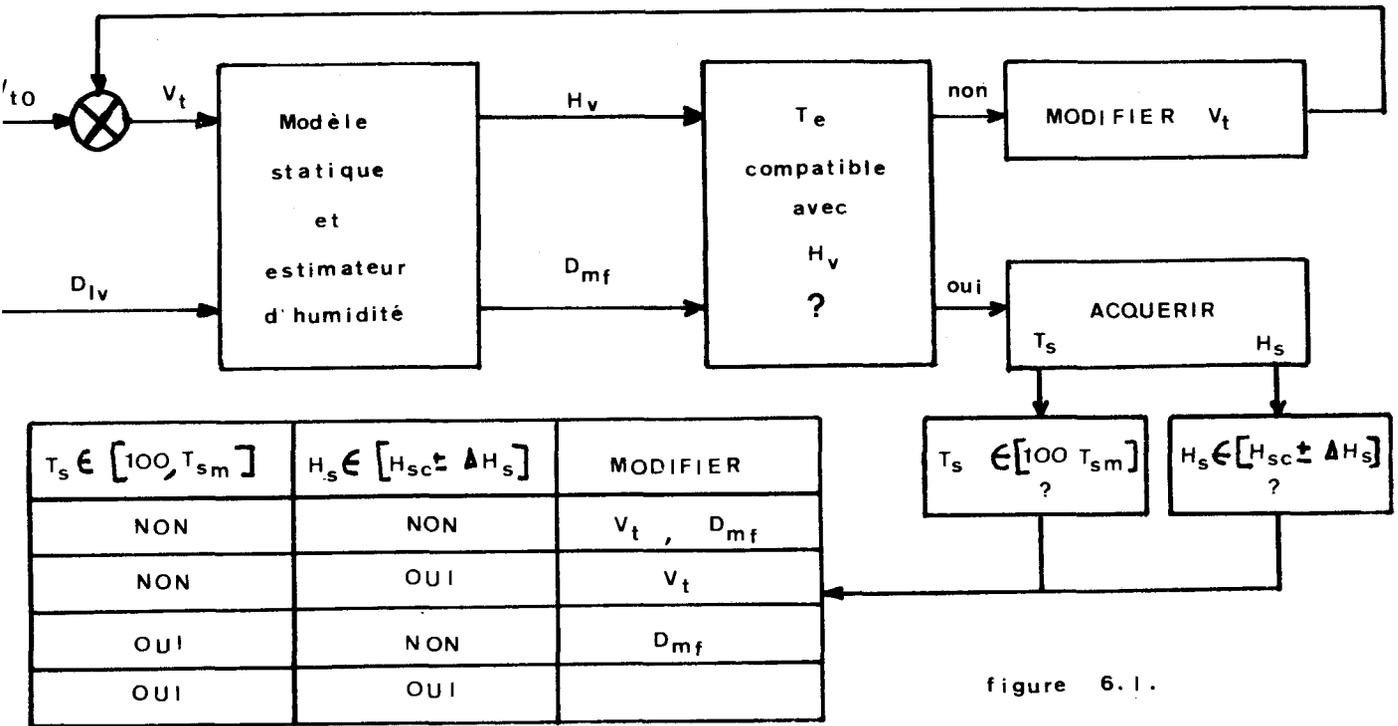


figure 6.1.

VI.2 - Commande assistée par ordinateur :

Le but à atteindre est de réduire au minimum, compatible avec la bonne exploitation et la sécurité, les équipements spécifiques à la régulation à partir du ordinateur. De plus le programme d'exploitation doit se présenter sous une forme modulaire facilement adaptable à une installation quelconque. La question qui a été posée est donc : est-il nécessaire de confier la conduite et le contrôle d'un séchoir à un automatisme complet qui se substituera à l'opérateur humain, ne serait-il pas suffisant de se limiter aux parties complexes de l'installation?

Le choix de la commande assistée doit donc permettre à l'opérateur humain de mieux connaître le procédé et de mieux le conduire. De plus, la fonction visualisation continue de l'état du séchoir lui permet de reprendre le contrôle, sans incidents, en cas de panne de ordinateur.

Toutes ces réflexions nous ont permis d'élaborer une méthodologie de conduite résumée sur la figure 6.2 qui se décompose en deux parties distinctes :

- boucle de tendance qui tient compte du comportement physique du système et permet de palier les variations contrôlées (vitesse tapis) ou incontrôlées (humidité) de certains paramètres d'entrée.

. boucle de régulation sur l'humidité du produit séché par contre réaction classique.

La boucle de tendance est mise en oeuvre par le calculateur, elle nécessite une surveillance accrue ainsi que des opérations très fastidieuses à effectuer par l'opérateur humain.

La régulation de l'humidité du produit séché sera assurée par l'opérateur humain qui effectuera les réglages préconisés par le calculateur.

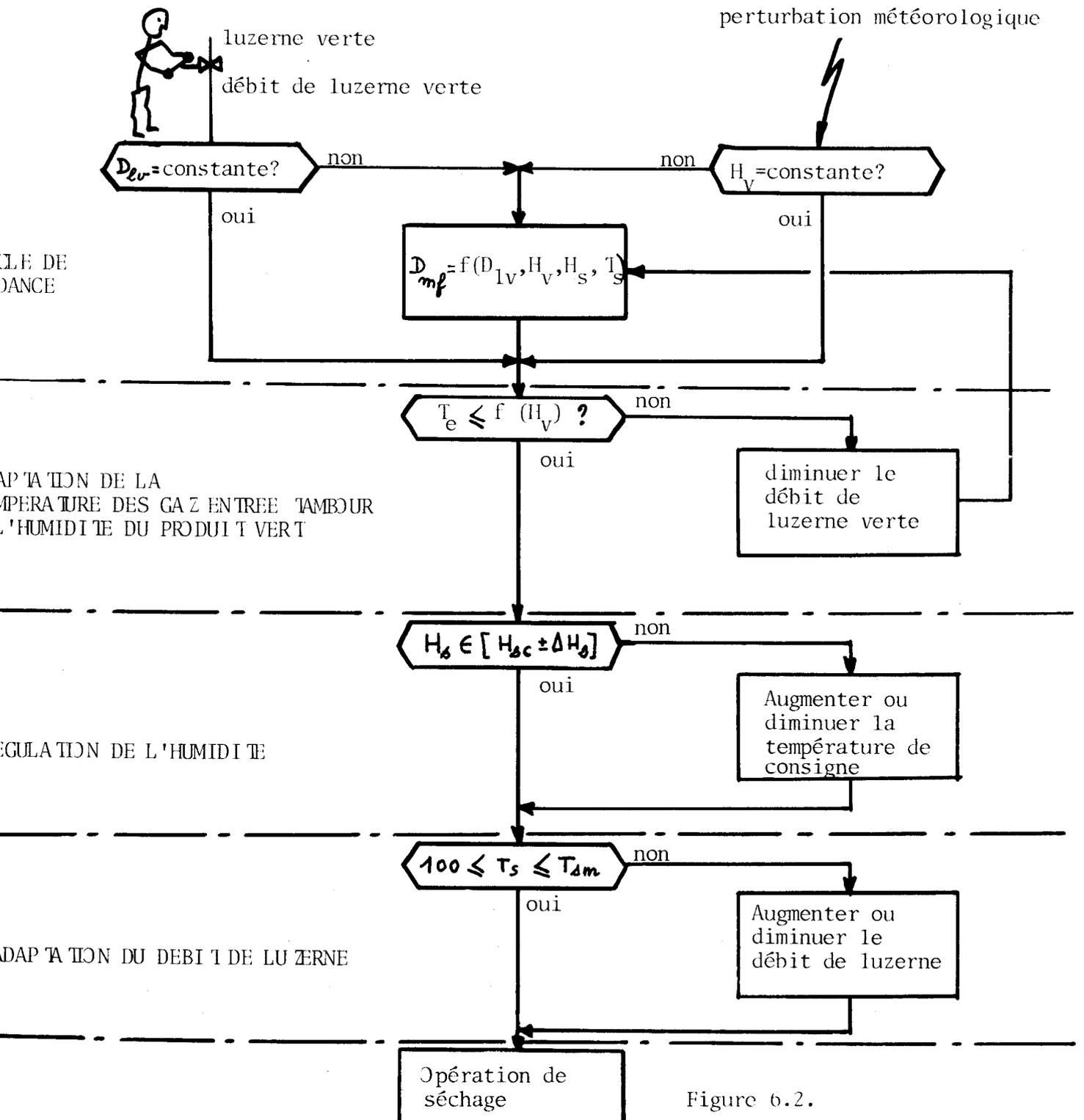


Figure 6.2.

6.2.1. - Boucle de tendance :

Le débit de luzerne verte est essentiellement fonction de la vitesse du tapis et de l'humidité du produit vert.

$$6.1 \quad D_{lv} = D_{ms} + E_t$$

D_{lv} $\underline{\Delta}$ débit de luzerne verte

D_{ms} $\underline{\Delta}$ débit de matière sèche

E_t $\underline{\Delta}$ débit d'eau contenu dans la luzerne

Nous avons vu précédemment qu'il existe une corrélation entre la vitesse du tapis d'alimentation en produit vert et le débit de matière sèche, de la forme suivante :

$$6.2 \quad D_{ms} = c V_t + d$$

V_t $\underline{\Delta}$ vitesse de défilement du tapis d'alimentation

c, d $\underline{\Delta}$ coefficients de régression

Les variations du débit de luzerne verte ont donc deux origines distincts à savoir :

- . changement de vitesse du tapis
- . variation d'humidité du produit vert

En règle générale les variations de la vitesse de défilement du tapis d'alimentation en produit vert sont commandés par des soucis de changements de niveau de production, alors que les modifications de l'humidité du produit vert dépendent essentiellement des conditions climatiques et géographiques.

V_t : est une grandeur de commande

H_v : est une perturbation mesurable

Le but du séchage est d'obtenir un produit séché à 16% d'humidité en sortie tambour sous une température T_s minimale ceci doit être atteint quelle que soit la valeur de H_v .

6.2.1.1. - Utilisation d'un modèle de tendance :
.....

La modélisation du séchoir précédemment effectuée nous a permis d'établir une relation générale définie comme suit :

$$6.3. F (D_{lv}, H_V, H_S, D_{mf}, T_S, P_a, \varphi_a, t_a) = 0$$

Ceci pour un débit de gaz de cheminée D_{gc} donnée.

Les résultats de simulation nous ont permis de négliger les conditions de pression de température et d'hygrométrie de l'air ambiant et de les fixer à des valeurs moyennes. Ce qui nous permet d'obtenir un modèle simplifié de la forme :

$$6.4. F_S (D_{lv}, H_V, H_S, D_{mf}, T_S) = 0$$

C'est donc à partir des résultats de simulation que nous avons défini une relation (6.5.) qui permet de connaître le débit de combustible nécessaire à l'opération de séchage en fonction de l'humidité du produit vert, du produit séché du débit de luzerne verte et de la température des gaz en sortie tambour, soit :

$$6.5. D_{mf} = f (D_{lv}, H_V, H_S, T_S)$$

D_{lv} \triangleq débit de luzerne verte : il est mesurée à partir d'une bande peseuse située avant l'introduction du produit vert dans le tambour.

H_S \triangleq humidité du produit séché, elle est mesurée à partir de l'humidimètre géré par le calculateur et présenté précédemment

T_S \triangleq température des gaz en sortie tambour, elle est mesurée par sonde platine.

En ce qui concerne l'humidité du produit vert nous allons présenter les résultats obtenus à partir de l'estimateur.

6.2.1.2. - Estimateur d'humidité du produit vert :
.....

Comme nous l'avons déjà dit il existe une relation entre vitesse du tapis d'alimentation, débit de luzerne verte et humidité du produit vert, de la forme :

$$6.6. \quad \tilde{H}_V = 1 - \frac{c V_t + d}{D_{lv}}$$

L'expérience a montré que les coefficients de regression a,b, demeurent valables pendant la durée d'une coupe. Toutefois l'estimation d'un tel paramètre qui est primordiale pour la bonne conduite du séchoir nous a amené à introduire un terme correctif afin d'améliorer la qualité de l'estimation.

$$6.7. \quad H_V = \tilde{H}_V + \Delta \tilde{H}_V$$

$\Delta \tilde{H}_V$ terme correctif obtenu par comparaison entre l'humidité affichée par l'estimateur et l'humidité obtenue à l'étuve. Cette réactualisation est effectuée par l'opérateur humain.

A titre d'exemple on compare les évolutions de l'humidité fournie par l'estimateur et leur valeur donnée par l'étuve. (figure 6.3.)

6.2.2. - Régulation de l'humidité du produit :

Comme nous l'avons vu le rôle de la boucle de tendance est d'essayer d'adapter la quantité de combustible à fournir en fonction du débit de luzerne verte, de l'humidité du produit vert, de la température des gaz de sortie tambour et de l'humidité du produit séché. Mais compte tenu des approximations effectuées sur le modèle (6.5.) il peut être nécessaire d'introduire une boucle de contre-réaction afin de compenser les imprécisions du modèle et les perturbations qui agissent sur le système.

Cette compensation s'effectuera par l'intermédiaire de l'opérateur humain qui exécutera les consignes définies par le calculateur, en ayant toutefois le choix des gains à attribuer à ces modifications ainsi que les délais d'action.

6.2.2.1. - Régulation d'humidité du produit séché :

.....

Il faut noter que l'humidimètre fonctionne sur farine de tiges ou farine de feuilles et que l'humidité de référence est choisie de façon à obtenir un taux d'humidité de 11% dans les granulés après leur sortie du refroidisseur. L'humidité à l'emplacement du capteur a donc été choisie à 13% afin de tenir compte de la remarque précédente.

Compte tenu de la dépendance qui existe entre la température de sortie du tambour et l'humidité du produit séché deux cas sont possibles :

- a) l'humidité du produit séché est inférieure au seuil H_{S0} ce qui signifie que la température des gaz en sortie tambour est trop élevée, le calculateur donne alors l'ordre de diminuer la température de consigne des gaz en sortie tambour.
- b) l'humidité du produit séché est supérieure au seuil H_{S1} il nous faut donc augmenter la température de consigne des gaz en sortie tambour. Cette première boucle de régulation nous permet donc de maintenir l'humidité du produit séché dans la gamme souhaitée.

$$6.8 \quad H_S \in [H_{S0} + \Delta H_S]$$

Afin d'éviter des oscillations dans la régulation ΔH_S est choisi supérieur à la variance de H_S afin d'obtenir un fonctionnement stable.

6.2.1.3. - Régulation de température des gaz en sortie tambour :
.....

Elle est assurée par un régulateur de type P.I. installé par le constructeur. La consigne est affichée manuellement par l'opérateur. Comme nous l'avons défini l'objectif de l'automatisation des séchoirs est de maintenir une consommation minimale en énergie c'est pourquoi nous imposons à la température de sortie de se situer dans un intervalle $(100^\circ, T_{\Delta m})$ avec $T_{\Delta m}$ le plus proche de 100°C .

Si la température de sortie sort de cette plage de consigne deux cas sont possibles :

- a) la température des gaz en sortie tambour est supérieure à la borne $T_{\Delta m}$: ce qui signifie que le débit de luzerne verte est trop élevé compte tenu des caractéristiques mécaniques du séchoir et que pour obtenir une humidité du produit séché H_S comprise dans la plage $(H_{\Delta c} \pm \Delta H_{\Delta})$ il nous faut obtenir des gaz en sortie tambour supérieurs à $T_{\Delta m}$. L'ordre genere par le calculateur sera donc de diminuer le débit de luzerne verte.

b) la température des gaz en sortie tambour est inférieure à 100°C : nous nous trouvons dans le cas inverse il faut donc augmenter le débit de luzerne verte.

6.2.1.4. - Surveillance de la température des gaz à l'entrée du tambour :
.....

Les travaux effectués par l'E.N.S.I.A. ont permis d'établir qu'il existe un seuil de compatibilité entre la température des gaz à l'entrée du tambour et l'humidité du produit vert. A partir de l'estimation de l'humidité du produit vert il suffit donc de comparer la température de fonctionnement du séchoir avec le seuil limite compatible.

Un seul cas est possible puisque c'est l'opérateur qui fixe l'allure de fonctionnement du séchoir : la température des gaz est supérieure au seuil, ceci est dû à un débit de luzerne verte trop important, il faut donner l'ordre de le diminuer.

6.2 - Organisation du programme de conduite :

Le programme de conduite assistée est résumé par la figure 6.3. il est composé des tâches suivantes :

niveau 7 : le plus prioritaire, il comporte le moniteur qui gère les différentes tâches et les cadencements. De plus il effectue les traitements appropriés en cas de défauts intempestifs ou de coupure de courant.

niveau 6 : il est activé par le niveau 5. Cette tâche consiste à positionner le débit de combustible au débit calculé par la boucle de tendance. Cette tâche se désarme automatiquement dès que le débit de référence est atteint.

niveau 5 : tâche boucle de tendance, elle surveille constamment les évolutions du débit de luzerne verte et de l'humidité du produit vert et calcule le nouveau débit de combustible à afficher en cas de modifications d'un de ces paramètres. De plus on vérifie si l'adaptation de la température des gaz à l'entrée du séchoir est compatible avec l'humidité du produit vert

niveau 4 : Cette tâche vérifie systématiquement si la température des gaz de sortie tambour est dans la plage de consigne. Sinon il fait imprimer le commentaire adéquat (augmenter ou diminuer le débit de luzerne verte)

niveau 3 : Cette tâche comprend la gestion de l'humidimètre et l'exploitation des indications en vue d'obtenir la valeur de l'humidité. De plus on vérifie si celle ci est dans la plage souhaitée sinon on imprime le commentaire approprié. (augmenter ou diminuer la température de consigne).

niveau 0 : Il sert à faire les impressions de commentaire, ou de valeur de certains paramètres. Il permet de relancer le programme après une coupure de courant, enfin il sert au dialogue homme-machine.

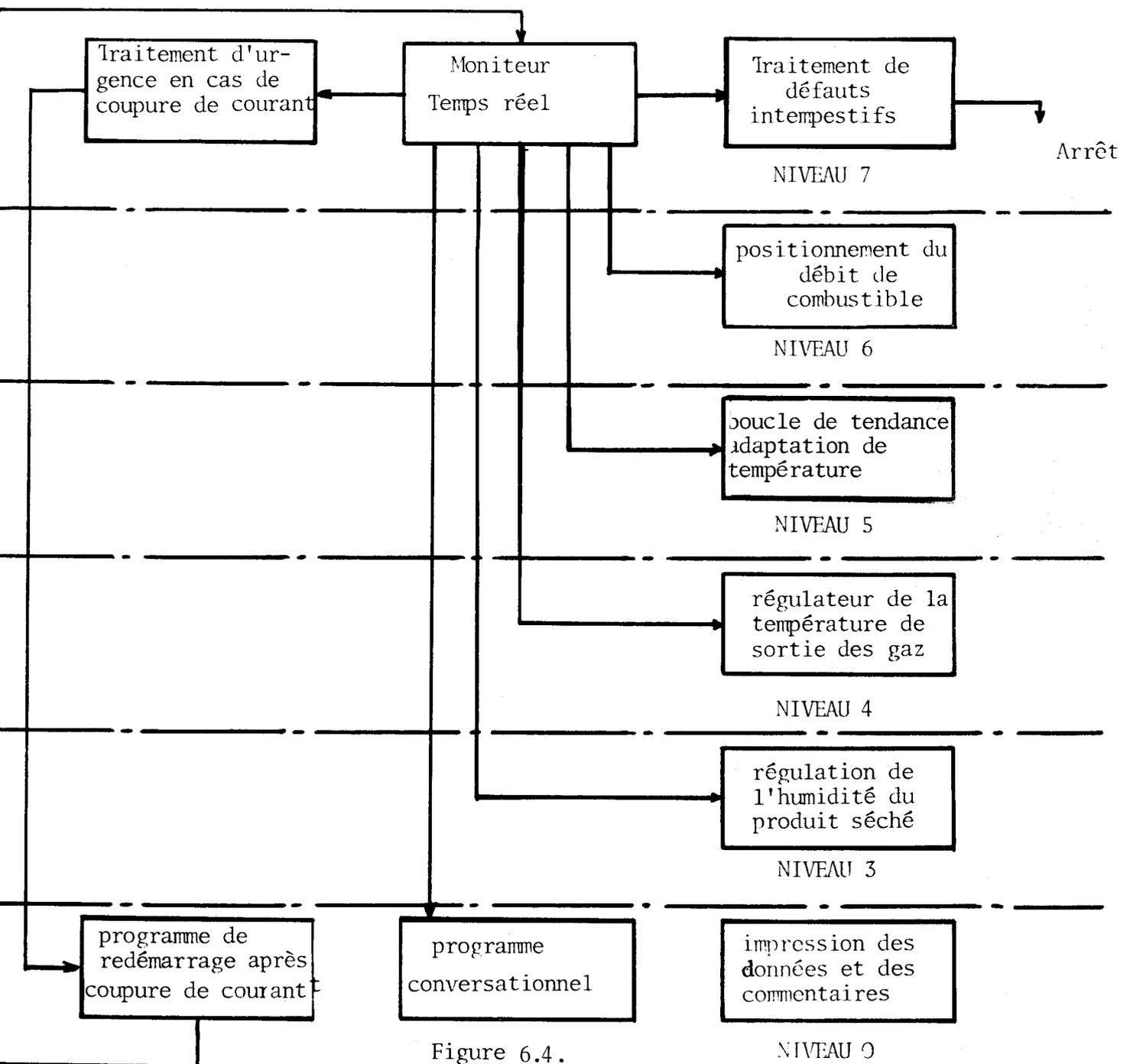


Figure 6.4.

NIVEAU 0

VI.3. - Commande automatique par ordinateur numérique :

Cette solution consiste à confier à un automatisme complet la conduite et le contrôle des séchoirs. Dans notre cas le rôle est assurée par un ordinateur numérique. Cette conduite ne nécessite l'intervention de l'opérateur humain qu'au niveau supérieur, c'est-à-dire à la détermination de la valeur de référence de l'humidité du produit séché, aux choix des différentes plages de consigne pour l'humidité du produit sec, pour la température des gaz en sortie tambour.

La mission confiée au ordinateur consiste donc à assurer le contrôle et la conduite du séchoir, de plus afin de s'assurer du bon fonctionnement il doit délivrer l'information nécessaire à l'opérateur humain afin que celui-ci s'assure du bon fonctionnement du système automatique.

Un tel automatisme doit pouvoir intégrer les décisions que l'opérateur humain prenait lors de la commande assistée par ordinateur. Une telle structure peut être schématisée par la figure 6.5

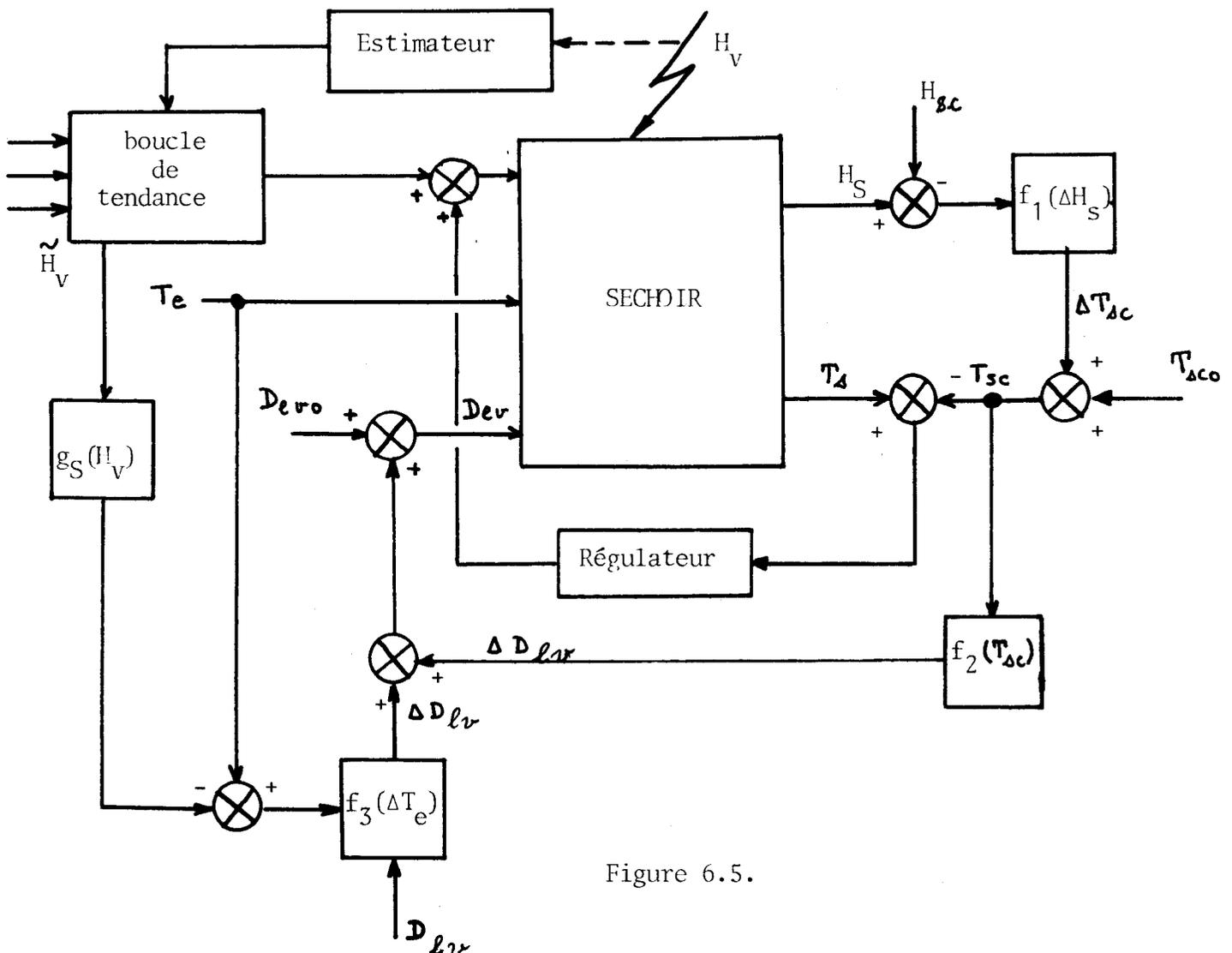


Figure 6.5.

Les relations f_i représentent les gains des actions effectuées par l'opérateur humain, afin que les modifications apportées repositionnent le système dans la zone de fonctionnement souhaitée.

A titre d'exemple la relation $f_1 (\Delta H_s)$ a été obtenue par expérimentation. Elle résume le fait que la température des gaz à la sortie du séchoir et l'humidité du produit séché sont dépendantes. Elle relie donc les modifications de température de consigne des gaz à la sortie séchoir à apporter afin de repositionner l'humidité du produit séché dans la plage de consigne souhaitée.

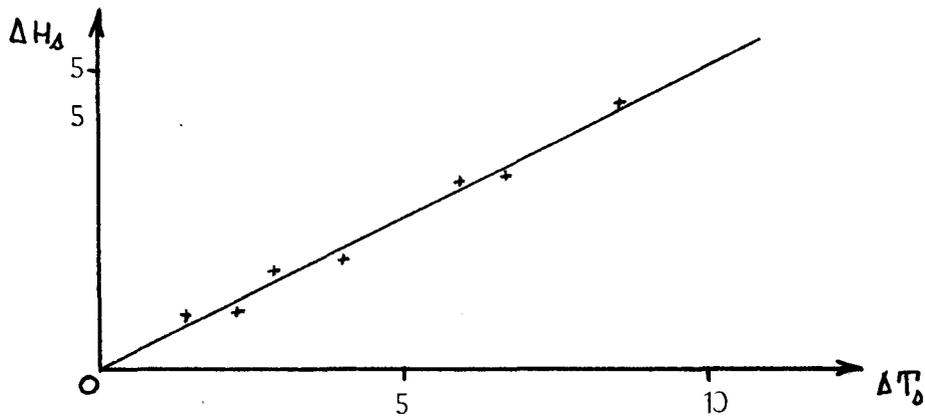


Figure 6.6.

La relation $f_2 (\Delta T_{SC})$ doit fournir la variation de débit de luzerne verte nécessaire à apporter afin que la température des gaz de sortie du tambour soit de nouveau incluse dans le domaine $(100, T_{dm})$.

La relation $f_3 (\Delta T_e)$ doit vérifier s'il y a compatibilité entre la température des gaz à l'entrée du tambour et l'humidité du produit vert donné à partir de l'estimateur.

Il convient de remarquer que ces relations sont incluses dans la relation générale 6.5.

$$6.9. \quad f (D_{mf}, D_{lv}, T_s, H_s, H_v) = 0$$

Il suffit de résoudre cette équation par rapport à la variable souhaitée; il convient cependant de remarquer que cette relation dépend du séchoir utilisé, en effet cette relation ne peut être utilisée qu'après avoir identifié les termes C_{rc}, Q_g .

En ce qui concerne la relation $g_s(H_v)$, c'est celle définie par l'ENSIA qui fournit le seuil de température du dessus duquel il y a des pertes au feu si toutefois la température des gaz à l'entrée du tambour la dépasse.

6.3.1. - Régulation de la température des gaz de sortie tambour.

C'est en fait le problème posée par l'automatisation des séchoirs, il est résumé par la figure 6.7.

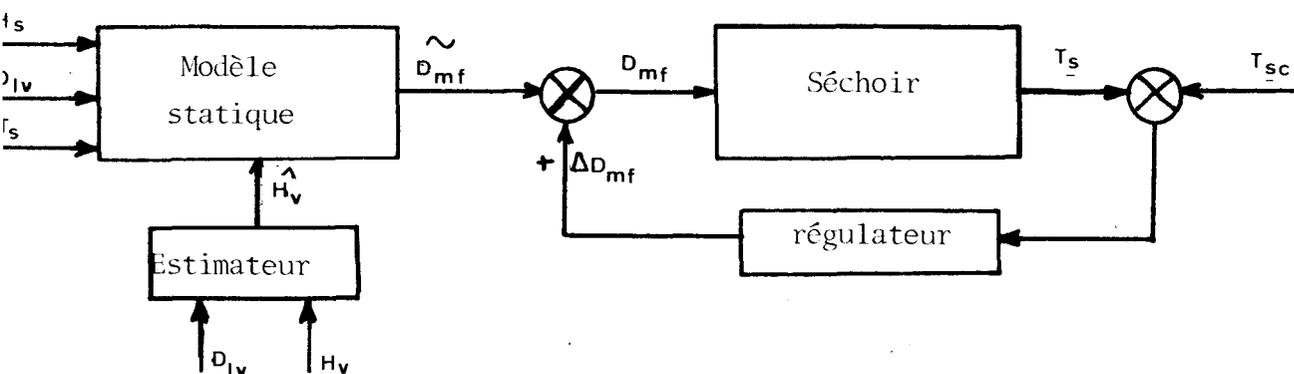


Figure 6.7.

Le régulateur doit remplir un cahier de charge important à savoir :

- il doit palier les imperfections du modèle statique qui prépositionne le débit de combustible à son régime nominal.
- il doit compenser les perturbations agissant sur le système
- il doit assurer une régulation des gaz de sortie assurant une variance minimale à l'humidité du produit séché
- enfin il doit pouvoir repositionner la température des gaz de sortie du tambour aux nouvelles valeurs de la température de consigne générée à partir des variations de l'humidité du produit séché.

Afin d'élaborer un régulateur entre le débit de combustible et la température des gaz de sortie du tambour nous avons effectué l'identification de la transmittance $D_{mf} - T_s$ par la méthode des moindres carrés et la méthode de la matrice instrumentale.

La figure 6.8. résume l'évolution des performances et des coefficients de la transmittance par la méthode des moindres carrés récursifs pour le modèle suivant :

$$6.10 \quad T_{\Delta}(k) + a_1 T_{\Delta}(k-1) + a_2 T_{\Delta}(k-2) = b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2)$$

Les figures 6.9, 6.10 résument l'évolution des performances et des coefficients de la transmittance par la méthode des moindres carrés récursifs

$$6.11 \quad T_{\Delta}(k) + a_1 T_{\Delta}(k-1) + a_2 T_{\Delta}(k-2) = b_1 u(k-2) \text{ pour } \tau = 1,2.$$

Les figures 6.11 et 6.12 résument l'évolution des performances et des coefficients de la transmittance 6.12 mais par la méthode de la matrice instrumentale.

Au vue des résultats il semble donc qu'un premier ordre avec ou sans retard serait suffisant comme transmittance entre le débit de combustible et la température des gaz de sortie du tambour.

C'est donc à partir de ce modèle qu'un régulateur entre le débit de combustible et la température de sortie a été implanté.

CONCLUSION :

Ces deux conduites ont été implantées sur le site. La conduite assistée a donné entière satisfaction quand à la conduite automatique, elle est en cours d'expérimentation et semble donner satisfaction néanmoins au niveau du régulateur des améliorations seraient à apporter, en effet le modèle utilisé pour le calcul du régulateur à variance minimale n'est valable que pour un état d'entrée donné or le débit de produit fluctue, il serait donc intéressant d'appliquer un régulateur auto ajustable afin de pouvoir comparer les performances par rapport aux régulateurs classiques de type P,I,D. Dans ce sens une étude est à envisager du point de vue application et devrait aboutir dans un avenir très proche.

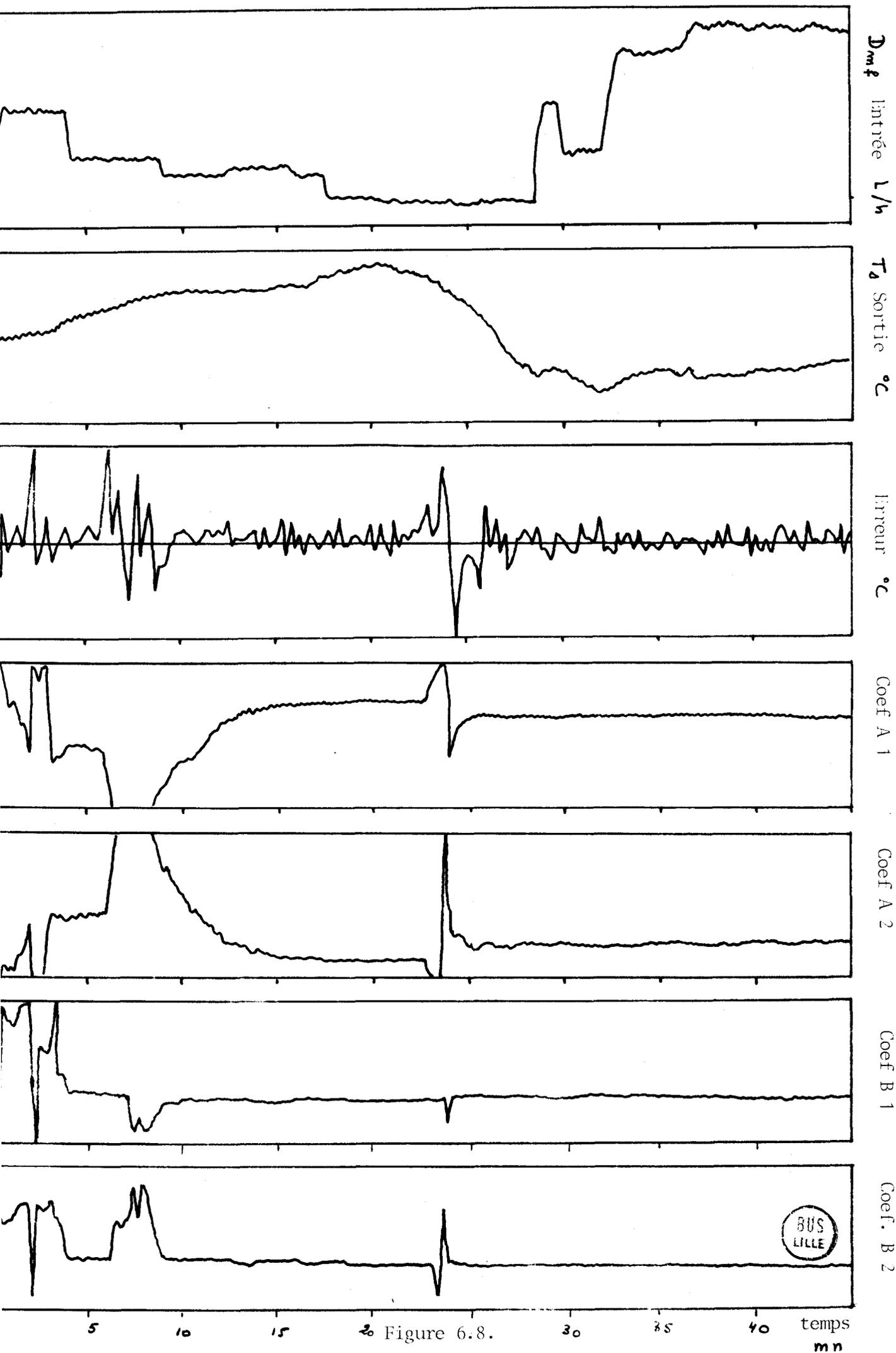


Figure 6.8.

BUS
LILLE

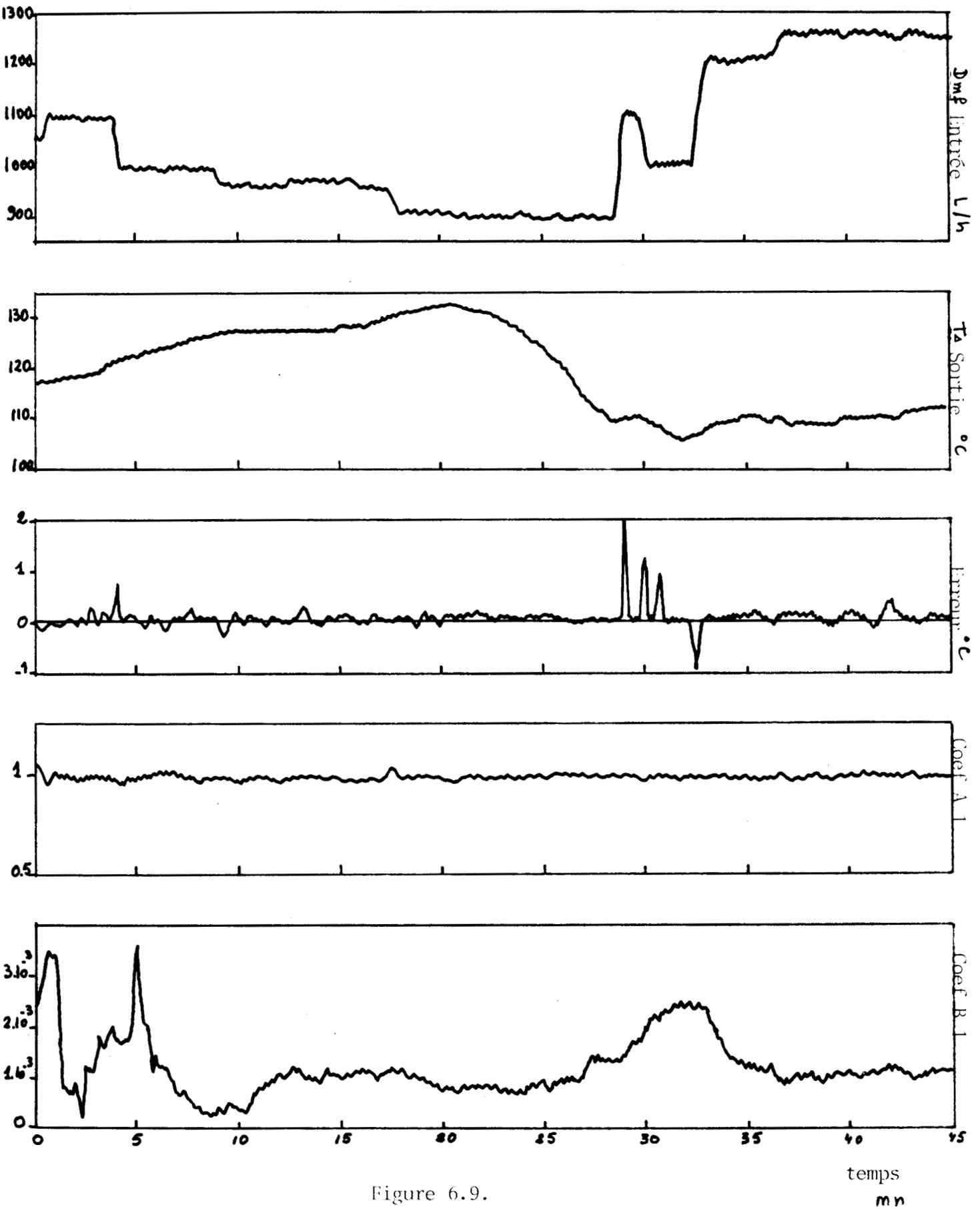


Figure 6.9.



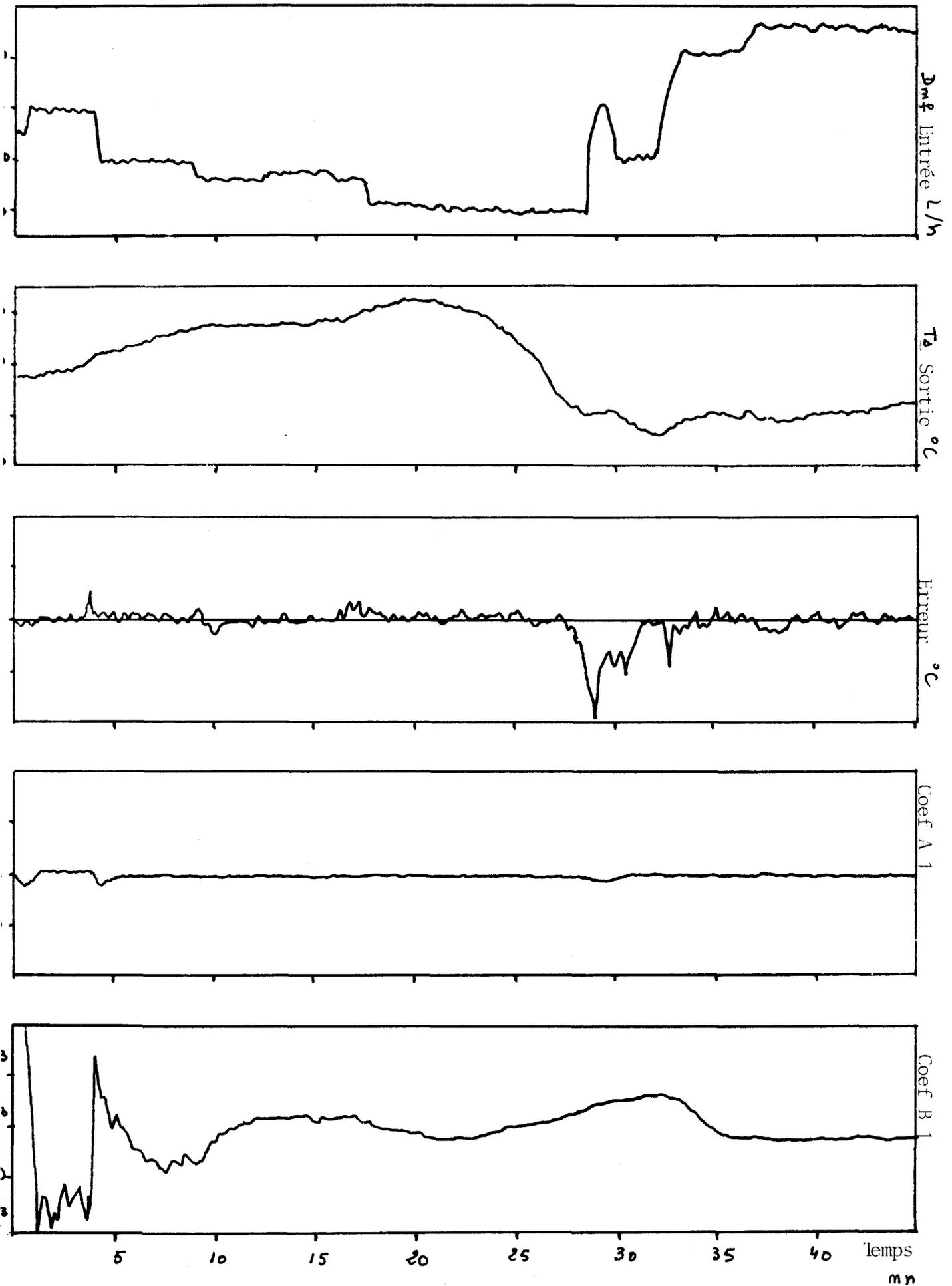


Figure 6.10



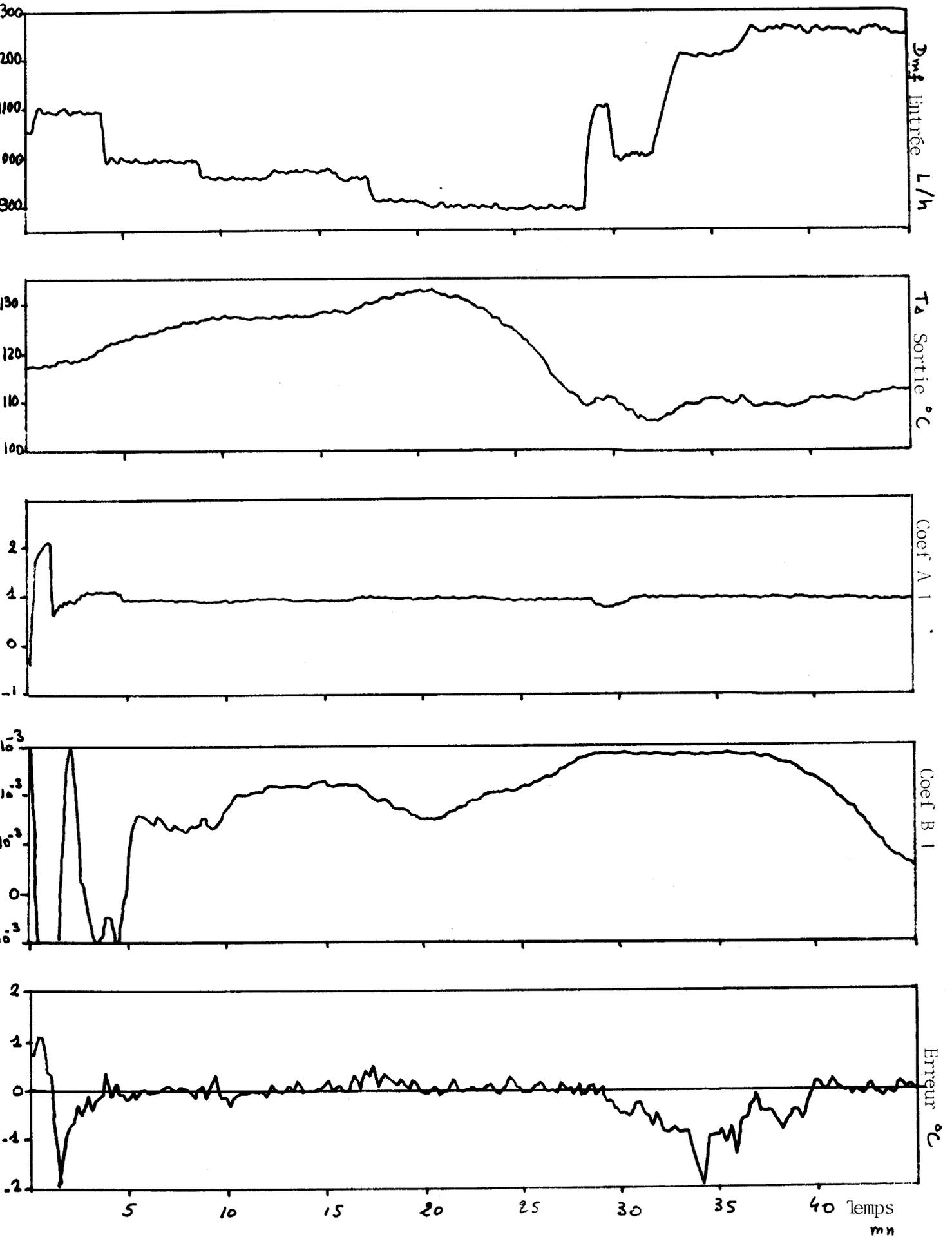


Figure 6.11



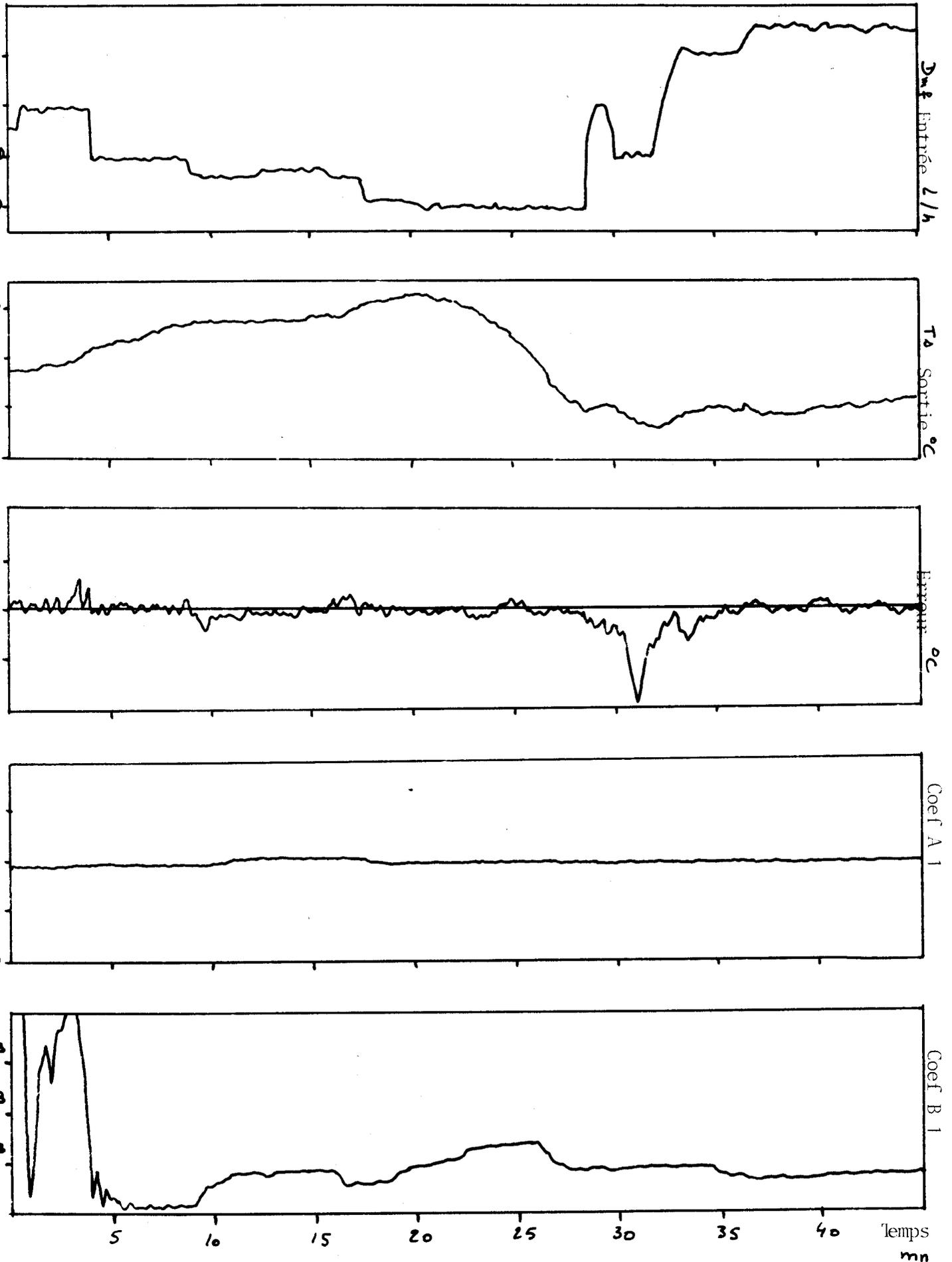
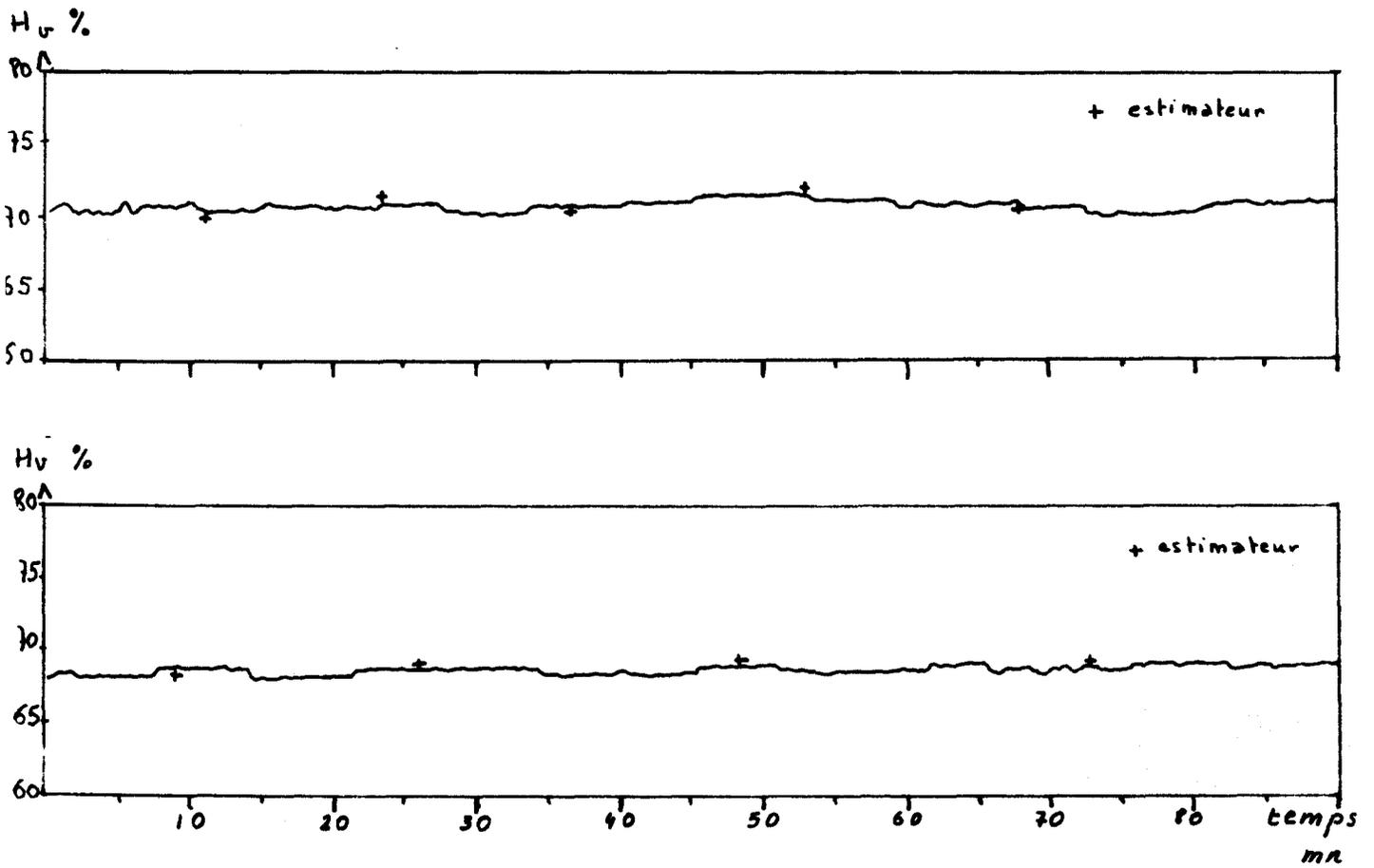


Figure 6.12





Figures 6-3



CONCLUSION GENERALE

Les résultats de l'analyse du processus étudié, associés à la modélisation et à l'élaboration d'une politique de commande des séchoirs issue de la simulation nous ont permis de proposer deux types de commande des séchoirs. Avant de présenter les avantages acquis au cours de cette étude pour la conduite des séchoirs il convient de rappeler dans quelles conditions le conducteur effectuait la conduite des séchoirs.

a) Amélioration de l'information issue du processus :

le conducteur ne disposait que des informations suivantes :

- . température des gaz à l'entrée du tambour
- . température des gaz à la sortie du tambour
- . vitesse du tapis d'alimentation de luzerne
- . vitesse de rotation du tambour
- . ampérage des broyeurs

A partir de ces informations on comprend que l'opérateur était incapable de réguler l'humidité du produit séché car il ne disposait pas de cette information.

De plus il était incapable de juger des performances du régulateur car il ne possédait pas la visualisation du débit de combustible.

Enfin il ne pouvait prendre en compte les évolutions de l'humidité du produit vert et devait les subir ce qui entraînait, la plupart du temps, de sérieuses perturbations au niveau de la production.

b) Amélioration de la connaissance du phénomène de séchage :

Grâce à l'élaboration d'un modèle statique de fonctionnement il est aisé de comprendre le fonctionnement d'une situation particulière, de plus ce modèle nous a permis de définir une politique de commande qui assure une consommation minimale d'énergie et une restitution maximale de la qualité du produit à l'entrée du séchoir. Enfin la mise au point d'un système de recyclage des gaz a été facilitée par l'utilisation d'un tel modèle.

Il convient de noter que les gains en consommation d'énergie sont de l'ordre de 5% en utilisant la commande assistée et que le système de recyclage des gaz a permis d'obtenir un gain de 6,50% en consommation de combustible (vérifié par l'APPAVE).

c) Amélioration de la conduite des séchoirs :

Le système de commande proposé permet de palier des inconvénients et des situations de fait incompatibles avec le désir des techniciens deshydrateurs. En effet, les systèmes proposés jusqu'alors par les constructeurs se contentaient de réguler la température des gaz en sortie tambour sans se soucier de l'humidité du produit séché, on en était donc réduit à une conduite antithermodynamique à savoir :

L'humidité du produit séché était nettement inférieure à l'humidité de référence souhaitée ce qui conduisait à rajouter de la vapeur d'eau aux presses afin d'obtenir le taux d'humidité de 11% dans les granulés après refroidissement, taux compatible avec les normes commerciales.

La conduite assistée a permis de palier cet inconvénient, ce qui permet en plus d'obtenir un produit présentant des caractéristiques d'humidité constantes dans le temps.

En ce qui concerne l'amélioration de la qualité du produit séché elle est rendue possible grâce à la surveillance systématique de l'adaptation de la température des gaz à l'entrée du tambour et de l'humidité du produit vert.

Il faut toutefois noter que la conduite assistée est un premier pas vers l'automatisation des séchoirs mais qu'il reste néanmoins de sérieux problèmes de régulation à résoudre comme nous les avons précédemment évoqués. La perspective que nous pouvons envisager comme suite aux présents travaux serait de régler l'humidité de consigne du produit séché en fonction de l'ampérage des broyeurs, ceci afin de pouvoir adapter le rythme de production souhaité au matériel utilisé. ce qui éviterait à l'opérateur de surveiller l'ampérage des broyeurs et rendrait le système de conduite entièrement automatique. Néanmoins les termes du contrat qui nous sont imposés dans le cadre de la D.G.R.S.T. nous semblent respectés et devraient aboutir normalement sur une commande automatique des séchoirs à tambour rotatif.

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - MELIN - GALARA : " Automatisation des séchoirs à fourrages " Rapport de fin de contrat D.G.R.S.T.
- 2 - F. KNEULE : Le séchage Edition Eyrolles PARIS 1964
- 3 - DASCALESCU : Le séchage et ses applications industrielles Edition Dunod PARIS 1969
- 4 - DAUDE 1 - PERRIER : Etude de l'évaporation et de la condensation à la surface d'un corps à partir du bilan énergétique Revue générale de thermique n° 76 Avril 1968
- 5 - TUSSEAU : Etude de la vitesse de séchage des corps solides humides - son incidence sur le calcul des séchoirs à convection. Revue générale de thermique n° 18 Juin 1963
- 6 - SEIDL : Le régime hygroscopique du séchage et sa représentation dans le diagramme de l'air humide de Mollier Revue générale de thermique n° 47 Novembre 1965
- 7 - CAMPBELL : Dynamique des processus industriels Edition Dunod 1961
- 8 - GAUTHIER : " Automatisation des séchoirs à fourrages " Rapport de fin de contrat D.G.R.S.T.
- 9 - CRONEWITZ - MULLER - BISSINGER - STADLER : Examen des facteurs qui influencent la consommation d'énergie et l'émission de poussières des sècheurs à pulpes compte tenu des temps de séjour des pulpes dans le sècheur La sucrerie belge : vol 95 Février 1976
- 10 - GALARA - MELIN : Détermination des grandeurs caractéristiques des séchoirs continus à tambour rotatif en vue de leur automatisation. Note Interne CAUL
- 11 - TUSSEAU : Gaz humides Techniques de l'ingénieur A. 600
- 12 - GOURLET - KERGOAT - SALLE : simulation de processus Instrumentation et Régulation n° 15 Avril 73.
- 13 - C. GAS TINEAU : notes techniques FRANCE-LUZERNE

- 14 - BEAUSEIGNEUR : Combustibles et produits de combustion température de combustion pertes par chaleur sensibles
Revue générale de thermique n° 71 Novembre 1967
- 15 - HEILIGENS TAEDT : Thermique appliquée aux fours industriels.
Tome 1.2. Edition Dunod 1971
- 16 - HARBERT : Automatic control of dryers by the temperature difference technique
MEASUREMENT AND CONTROL Vol 6 August 1975
- 17 - ASTROM - EYKOFF : System identification a survey
Automatica vol 7 pp 123-162 1971
- 18 - SARIDIS : Comparaison of six on line identification Algorithms.
Automatica vol 10 pp 69-79 1974
- 19 - ISERMANN - BAUR - BAMBERGER - KNEPPO - SIEBERT : Comparaison of six on line identification and parameter estimation methods
Automatica vol 10 pp 81-105 1974
- 20 - GUSTAVSDON : Comparaison of differents methods for identification of industrial process
Automatica vol 8 pp 127-142 1972
- 21 - YOUNG : An instrumental variable method for real time identification of Noisy process
Automatica vol 6 pp 271-287 1970
- 22 - HASTING JAMES - SAGE : recursive generalised least square procedure for on line identification of process parameters
Proceeding IEE Control & Science volume 116 n° 12 1969
- 23 - MEHRA : On line identification of linear dynamic systems with applications to KALMAN filtering
I.E.E.E. T.A.C. vol AC 16 n°1 february 1971
- 24 - CLARKE - GAWTHROP : Self tuning controller
Proceeding IEE Control & Science Vol.122 n° 9 1975
- 25 - WITTENMARK : a self tuning predictor
I.E.E.E. T.A.C. vol AC 19 n° 6 december 1974
- 26 - ASTROM WITTENMARK : on self tuning regulators
Automatica vol 9 pp 185-199 1973
- 27 - WAERDEN : statistique mathématique
Edition Dunod 1967
- 28 - VENISEL : théorie des probabilités
Edition MIR MDSOU 1973
- 29 - AIVAZIAN : étude statistique des dépendances
Edition MIR MDSOU 1970
- 30 - ROZANOV : Processus aléatoires
Edition MIR MDSOU 1975

- 31 - DEMIDOVITCH - MARON : éléments de calcul numérique
Edition MIR MOSCOW 1973
- 32 - Eléments de calcul numérique
Note Bull general. Electric.
- 33 - HDRNBECK : Numerical methods
Quantum publishers INC. 1975
- 34 - RADIX : introduction au filtrage numérique
Edition Eyrolles 1970
- 35 - SAGE - MELSA : Estimation theory with applications to communication and control
MAC GRAW - HILL 1971
- 36 - SAGE MELSA : System identification
Academic Press 1971
- 37 - ASTROM : introduction to stochastic control theory
Academic Press 1970
- 38 - ADKI : optimization of stochastic systems
Academic Press 1967
- 37 - VIDAL : systèmes échantillonnés non linéaire
Edition Dunod 1968
- 38 - PH DE LARMINAT : identification de processus
Ecole Nationale supérieure de mécanique de NANTES.

A N N E X E A

CARACTERISTIQUES DE COMBUSTION DU FUEL OIL n°2

1) Pouvoir comburivore :
.....

C'est le volume d'air sec, ramené aux conditions normales de température et de pression, (0°C, 760 mm Hg) nécessaire pour assurer la combustion neutre d'un kilogramme de combustible.

Dans notre cas, le combustible utilisé est du fuel oil lourd n°2 dont la composition massique est la suivante, pour 1 kg de combustible :

C : Carbone	:	0.847
H ₂ : Hydrogène	:	0.115
S : Soufre	:	0.030
O ₂ : Oxygène	:	0.001
N ₂ : Azote	:	0.005
H ₂ O : Eau	:	0.001
Sédiments:	:	0.001

On montre que le pouvoir comburivore peut se mettre sous la forme :

$$V_a = 1.293 \times \frac{22.40}{12} \times \frac{100}{20.93} \left(C + 3 H_2 + \frac{3}{8} (S' - O_2) \right)$$

$V_a \triangleq$ kg / kg de combustible.

2) Pouvoir fumigène humide :
.....

C'est la quantité de fumées, ramenées aux conditions normales de température et de pression (0°C, 760 mm Hg) qui résulte de la combustion stoechiométrique

d'un kilogramme de combustible. On suppose implicitement que la température des fumées se trouve à une température supérieure à celle du point de rosée. Malgré cette hypothèse les volumes sont rapportées aux conditions normales de température et de pression afin d'être directement exploitable dans les équations de bilan.

On montre que le pouvoir fumigène humide peut se mettre sous la forme :

$$V_f = 0.7907 \times 1.250 V_a + \frac{22.4}{12} 1.976 C + 6.0 \times 0.804 H_2 + \frac{3.0}{8.0} \times 2.9265 \\ + N_2 + H_2O$$

$V_f \triangleq$ kg / kg de combustible.

3) Pouvoir fumigène sec :

.....

C'est la quantité de fumées sèches qui résulte de la combustion stoechiométrique d'un kilogramme de combustible, on suppose alors que la vapeur d'eau est condensée ce qui est pratiquement réalisé pour les prélèvements gazeux en vue de déterminer les différentes teneurs en gaz carbonique, oxygène, etc ...

Le pouvoir fumigène sec est donc le pouvoir fumigène humide auquel on soustrait la vapeur d'eau nous obtenons donc :

$$V_f' = 0.7907 \times 1.250 V_a + \frac{22.4}{12} 1.976 C + \frac{3.0}{8.0} \times 2.9265 + N_2$$

$V_f' \triangleq$ kg / kg de combustible.

4) Taux de gaz carbonique en combustion neutre :

.....

On le définit comme le rapport entre la masse de gaz carbonique CO_2 (issue de la combustion neutre et parfaite) et la masse de fumées sèches soit :

$$A_{\text{O}} = \frac{3.672 \text{ C}}{13.789}$$

$$A_{\text{O}} \underline{\Delta} \%$$

5) Caractéristiques de combustion neutre :

.....

Dans chaque formulation il suffit de remplacer les composants par leur valeur définie pour le combustible utilisé on obtient alors :

. Caractéristiques massiques de la combustion du FO_2 sans excès d'air dans le cas considéré on obtient :

$$V_{\text{a}} = 13.871 \text{ kg / kg de FO}_2$$

$$V_{\text{f}'} = 13.789 \text{ kg / kg de FO}_2$$

$$V_{\text{f}} = 14.845 \text{ kg / kg de FO}_2$$

$$A_{\text{O}} = 22.55 \%$$

$$E_{\text{c}} = 1.056 \text{ kg / kg de FO}_2$$

$$E_{\text{c}} \underline{\Delta} \text{ eau issue de la combustion du fuel oil lourd n}^\circ 2$$

6) Combustion avec excès d'air :

.....

Nous avons établi que la combustion neutre et parfaite exigeait une masse d'air de combustion V_{a} . pour des raisons techniques et de rendement

il n'est pas conseillé de travailler dans de telles conditions c'est pourquoi la combustion s'effectue toujours avec excès d'air. On peut définir le pouvoir comburivore avec excès d'air soit :

$$V_A = V_a + e V_a$$

e Δ caractérise l'excès d'air

7) Pouvoirs fumigènes avec excès d'air :

.....

De la même façon on peut définir les pouvoirs fumigènes comme suit :

a) Pouvoir fumigène humide avec excès d'air

$$V_F = V_f + e V_a$$

b) Pouvoir fumigène sec avec excès d'air

$$V_{F'} = V_{f'} + e V_a$$

8) Taux de CO₂ avec excès d'air :

.....

On le définit comme le rapport de masse de CO₂ sur la masse de fumées sèche soit :

$$A = \frac{3.672 C}{V_{f'} + e V_a}$$

Soit encore en introduisant le taux de CO₂ avec combustion stoechiométrique défini par Λ_0

$$A = \frac{\Lambda_0 V_{f'}}{V_{f'} + e V_a}$$

Pour une combustion parfaite avec excès d'air on peut également définir l'excès d'air en fonction du taux de CO_2 . Soit :

$$e = \frac{A_0 - A}{A} \cdot \frac{V_{f'}}{V_a}$$

8) Détermination des caractéristiques de combustion avec excès d'air :

Si nous reprenons les pouvoirs comburivores, fumigènes avec excès d'air en fonction de ce dernier il suffit de remplacer l'expression de l'excès d'air en fonction du taux de CO_2 nous obtenons alors :

$$V_A = V_a + \frac{A_0 - A}{A} \cdot V_{f'}$$

$$V_{F'} = \frac{A_0}{A} V_{f'}$$

$$V_F = V_{f'} + \frac{A_0 - A}{A} \cdot V_{f'}$$

9) Température des gaz de combustion :

Nous avons vu dans le Chapitre I que le pouvoir calorifique du combustible servait à échauffer l'air de combustion et de dilution. En supposant que cet air soit sec et à 0°C on obtient la température théorique de combustion comme suit :

$$L_V = V_F \int_0^{T^E} C_{pgc}(A,T) dT$$

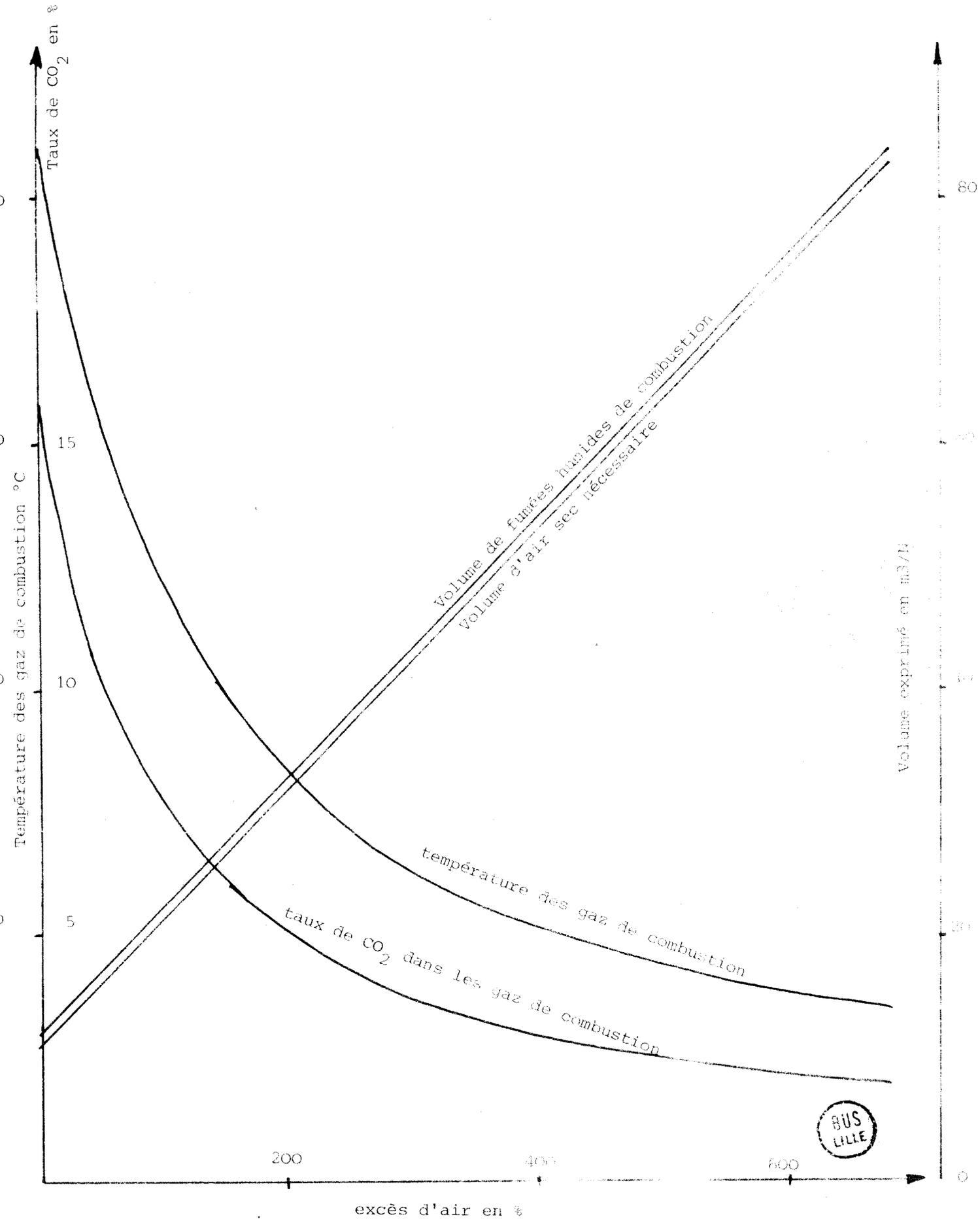
L_V \triangleq pouvoir calorifique inférieur du combustible utilisé kcal

V_F \triangleq pouvoir fumigène humide avec excès d'air kg

$C_{pg}(A,T)$ \triangleq capacité calorifique des gaz de combustion

On peut résumer les caractéristiques de combustion sur la figure A.1.

Caractéristiques de combustion
du fuel oil lourd n°2



A N N E X E B

CARACTERISTIQUES DES CAPTEURS

Comme nous l'avons vu l'information issue des capteurs est traitée et affichée sous forme numérique directement utilisable. Les caractéristiques propres à chacun sont résumées comme suit :

. Débitmètre de fuel :
.....

C'est un débitmètre volumétrique OTIC-FISMER qui fonctionne suivant le principe de la variation de flux causé par les variations de débit volumique du combustible. Il fournit un courant (4-20 mA) en fonction du débit volumétrique (350 l/h à 3500 l/h).

. Température en sortie générateur de gaz :
.....

C'est un thermocouple CHAUVIN-ARNOUX de type N dont la plage de mesure est de 500 °C à 1100 °C pour une f.e.m. fournie de 20.65 mV à 45.16 mV.

. Température des gaz sortie tambour :
.....

C'est une résistance platine dont la variation en fonction de la température dans la gamme utilisée est de 100 Ω à 260 Ω pour 0 à 250 °C

. Psychrotransmetteur :
.....

C'est un hygromètre THIES pour haute température composé de deux sondes de température à résistance platine dont le principe est le suivant :

le thermomètre humide est composé d'une sonde entourée d'un chiffon de coton plongeant dans un réservoir d'eau dont le niveau est maintenu constant.

le thermomètre sec est une sonde dont les caractéristiques sont les mêmes définies précédemment.

Il convient de préciser que la vitesse des gaz humides doit être comprise entre 4m/s et 10 m/s.

. Vitesse de rotation du tambour :
.....

Une dynamo tachymétrique fournit une tension alternative de 0 à 20 V (V efficace) elle est redressée et divisée pour obtenir une tension proportionnelle à la vitesse de rotation.

. Vitesse de défilement du tapis d'alimentation :
.....

C'est également une dynamo tachymétrique qui fournit une même tension et suivant le même principe on obtient une tension proportionnelle à la vitesse du défilement du tapis.

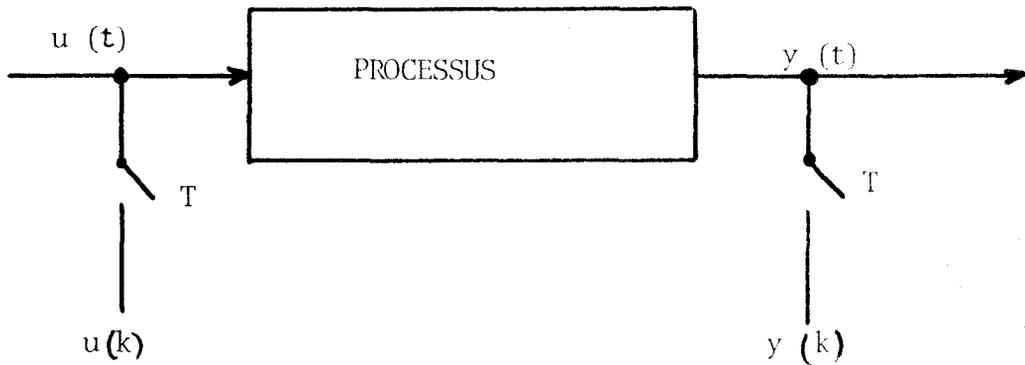
. Débit de luzerne verte :
.....

C'est une bande pesseuse intégratrice SAUTELMA dont la précision est de 0.3% et qui fournit une tension de 0 à 10 V pour des tonnages de luzerne verte de 0 à 80 tonnes/heure.

ANNEXE C

METHODE DES MOINDRES CARRES

On considère un processus linéaire, continu à une entrée et une sortie, on suppose que ce processus peut être représenté par un modèle de la forme C.1



$$C.1 \quad y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_m y(k-m) = b_1 u(k-d-1) + \dots + b_m u(k-d-m)$$

Cette équation peut se mettre sous la forme suivante :

$$C.2 \quad [1 + A(z^{-1})] Y(k) = B(z^{-1}) U(k-d)$$

$A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$ sont des polynomes définis comme suit :

$$A(z^{-1}) = a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}$$

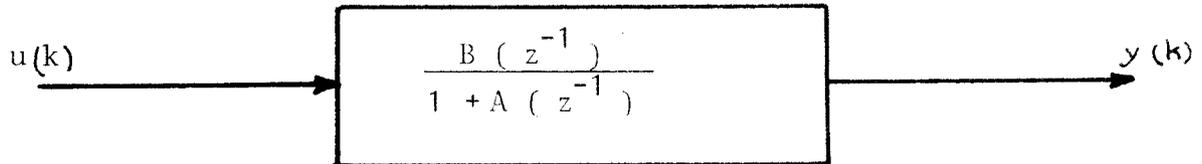
$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$$

$Y(k), U(k-d)$ sont définis comme suit :

$$Y(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-m)]^T$$

$$U(k-d) = [u(k-d-1), u(k-d-2), \dots, u(k-d-m)]^T$$

Le processus physique étudié peut donc être représenté par la figure suivante :



Le but de l'identification est d'estimer les coefficients de $A(z^{-1})$ et $B(z^{-1})$ à partir de couples de mesures $U(k), y(k)$ telle que la somme des carrés de l'erreur entre la sortie modèle et la sortie du processus soit minimale

$$C.3 \quad \min \sum_{k=1}^{\infty} e^2(k)$$

$$\text{avec } e(k) = y_m(k) - y_p(k)$$

$$y_m(k) \triangleq \text{sortie du modèle}$$

$$y_p(k) \triangleq \text{sortie du processus réel}$$

La sortie du modèle à l'instant (k) est défini comme suit :

$$C.4 \quad y_m(k) = -a_1 y(k-1) \dots - a_m y(k-m) + b_1 u(k-d-1) + \dots \\ + b_m u(k-d-m)$$

Cette expression peut être mise sous la forme suivante :

$$C.5 \quad y_m(k) = \varphi(k)\theta$$

Le vecteur $\varphi(k)$ est défini comme suit :

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-m) \ u(k-d-1) \dots u(k-d-m)]$$

Le vecteur θ représente les coefficients du processus à identifier

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_m \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m]^T$$

$y_m(k)$ représente la prédiction de la sortie du processus à partir du modèle défini précédemment et des observations entrée-sortie antérieures. L'erreur de prédiction est alors défini comme suit :

$$C.6 \quad e(k) = y(k) - \varphi(k) \theta$$

Si on définit une fonction de coût quadratique pour $N + m$ couples de données $[u(k), y(k)]$ comme suit :

$$C.7 \quad V = \sum_{k=m+d}^{N+m+d} e^2(k)$$

Les coefficients de θ devront donc minimiser cette fonction de coût pour $m + N$ observations la fonction se met donc sous la forme suivante :

$$C.8 \quad V = (Y - \Phi \theta) (Y - \Phi \theta)^T$$

Les matrices Y et Φ sont définies comme suit :

$$\Phi \triangleq \begin{bmatrix} -y(m+d-1) & \dots & -y(d) & u(m-1) & \dots & u(0) \\ -y(m+d) & \dots & -y(d+1) & u(m) & \dots & u(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(m+d+N-1) & \dots & -y(d+N) & u(m+N-1) & \dots & u(N) \end{bmatrix}$$

$$Y \triangleq [y(m+d) \ y(m+d+1) \ \dots \ y(m+N+d)]^T$$

L'estimation par moindres carrés minimisant la fonction de cout C.8 s'obtient de façon classique :

$$\hat{\theta} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T Y$$

$\hat{\theta}$ représente donc l'estimation des paramètres $a_1 \dots a_m$ $b_1 \dots b_m$ du modèle proposé. Cette estimation est biaisée si les résidus $e(k)$ sont corrélés ce qui est le cas.

A cette forme lourde pour une application temps réel on substitue la méthode des moindres carrés récursives (35) dont le principal avantage est de s'affranchir de l'inversion de matrice qui grève considérablement le temps de calcul et l'occupation mémoire d'un calculateur.

Cette forme est maintenant très classique soit :

$$\hat{\theta}_{(k+1)} = \hat{\theta}_{(k)} + [\varphi_{(k+1)} P_{(k)} \varphi_{(k+1)}^T + I]^{-1} P_{(k)} \varphi_{(k+1)}^T x_{(k+1)} - \varphi_{(k+1)} \hat{\theta}_{(k)}$$

avec

$$P_{(k+1)} = P_{(k)} [I - \varphi_{(k+1)}^T \varphi_{(k+1)} P_{(k)} [\varphi_{(k+1)} P_{(k)} \varphi_{(k+1)}^T + I]^{-1}]$$

ou

$$P_0 = [\Phi^T \Phi]^{-1}$$

En général on choisit $P(0)$ comme matrice diagonale dont les éléments sont assez grands sans l'être trop afin de ne pas créer d'instabilité dans la forme récursive. Quand aux conditions initiales de $\theta(0)$ on peut prendre le vecteur nul.