

UNIVERSITE LILLE NORD-DE-FRANCE

THESE

présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

Domaine : Sciences Pour l'Ingénieur (ED SPI-072)

Spécialité : Automatique, Génie Informatique, Traitement de signal et images

par

Inès BOUFATEH BEN ARARI

**CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA SUPPLY CHAIN
POUR LA FILIERE TEXTILE : DEFINITION DE CRITERES DE
DEVELOPPEMENT DURABLE**

**Application de la méthode de surclassement PROMETHEE à
l'Analyse du Cycle de Vie d'un tee-shirt**

Thèse soutenue le 23 mai 2011 devant le jury composé de :

Bernard YANNOU	Professeur à l'Ecole Centrale Paris	Rapporteur
Dominique DUPUIS	Professeur à l'ENSISA	Rapporteuse
Chantal PROUST	Maître de conférences HDR à l'université d'Orléans	Présidente du jury
Tatiana REYES	Maître de conférences à l'université de technologie de Troyes	Examinatrice
Philippe SCHIESSER	Professeur associé à l'Université de Cergy-Pontoise, Directeur écoeff	Membre invité
Besoa RABENASOLO	Professeur à l'ENSAIT	Directeur de thèse
Anne-Marie JOLLY DESODT	Professeur à l'université d'Orléans	Co-directrice de thèse
Anne PERWUELZ	Professeur à l'ENSAIT	Co-directrice de thèse

A mes parents, ma sœur et mes frères,

A mon mari,

A ma fille,

pour les rêves partagés...

*« Tais-toi beaucoup pour avoir quelque chose à dire
qui vaille d'être entendu. Mais encore tais-toi pour
t'entendre toi-même. »*

(Lanza del Vastro, Principes et préceptes du retour à
l'évidence, 1945)

Se taire, c'est encore écouter, apprendre, rechercher...

S'entendre soi-même, c'est encore analyser, se
critiquer, se corriger et décider.

Finalement, saurons-nous dire quelque chose qui
vaille d'être entendu et surtout qui puisse rompre le
silence pour susciter le progrès?

Cette modeste contribution se veut une proposition
pour aider à la décision...

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés au sein du laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT à Roubaix avec le soutien financier du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Technologie en Tunisie.

Je tiens à remercier tout d'abord Besoa RABENASOLO, Anne-Marie JOLLY-DESODT et Anne PERWUELZ de m'avoir proposé ce travail de recherche et de m'avoir soutenue dans les moments difficiles. Je remercie Besoa d'avoir accepté de diriger cette thèse. La rigueur de ses méthodes de recherche, l'exigence qu'il a formulée à mon égard et sa confiance constante ont contribué à l'aboutissement de ces travaux. Je remercie Anne-Marie de m'avoir confié ce sujet. Sa patience, son intérêt et ses précieux conseils m'ont aidé à mener à bien ces travaux.

Je remercie Anne de m'avoir appris le travail de chercheur. Sa disponibilité, son soutien enthousiaste et sa vision des choses qu'elle m'a fait partager ont contribué à l'originalité de ce travail de thèse.

Je remercie également toutes les personnes qui ont accepté de juger ce travail de thèse et plus particulièrement Bernard YANNOU Professeur à l'Ecole Centrale Paris et Dominique DUPUIS Professeur à l'ENSISA, qui ont accepté d'assumer la tâche de rapporteurs. Je remercie aussi Pierre VIALIER Professeur à l'ENSISA, qui n'a pas pu effectuer cette tâche, de l'avoir bien accepté.

Je tiens aussi à remercier Daniel JOLLY Professeur à l'université d'Artois pour son aide précieuse.

Je remercie sincèrement toutes les personnes qui m'ont accueilli et aidé pour la collecte des données dans l'industrie textile en Tunisie et plus particulièrement Lassaad ABDELMOULA directeur de Maille Club Group, Fadhel KASSAB ingénieur production à SARTEX, Houssine BILTAIF ingénieur au Centre Technique du Textile en Tunisie (CETTEX) et Amel JRAD directrice au Centre International des Technologies de l'Environnement de Tunis (CITET).

Un grand merci à Marie de Saxcé et Sandrine Pesnel pour les travaux expérimentaux, les discussions et les réflexions partagées.

Remerciements sincères également à ceux, parmi les enseignants-chercheurs de l'ENSAIT, qui se sont intéressés à mon travail et avec qui j'ai eu des échanges de connaissances fructueuses. Je remercie Hubert Ostyn, technicien Bonneterie ainsi que le personnel administratif de l'ENSAIT.

Un grand merci également aux doctorants du GEMTEX et à mes amis pour leur enthousiasme.

Je remercie vivement Ollo, Olfa, Madiha et sa petite famille pour le soutien et les petits coups de pouce.

Enfin, ma très profonde reconnaissance aussi et surtout à mon mari et ma famille pour la patience et les encouragements.

Que chacun de celles et ceux qui, par leur contribution directe ou par leur soutien, m'ont aidé à mener à bien ces travaux, soient ici profondément remerciés.

CONTRIBUTION A L'EVALUATION DE LA SUPPLY CHAIN POUR LA FILIERE TEXTILE : DEFINITION DE CRITERES DE DEVELOPPEMENT DURABLE

Application de la méthode de surclassement PROMETHEE à l'Analyse du Cycle de Vie d'un tee-shirt

Résumé : Dans le cadre du développement durable, des nouvelles matières sont exploitées, des nouveaux procédés sont élaborés et des nouvelles stratégies sont appliquées. Cependant, il est important de vérifier si l'amélioration recherchée est atteinte ce qui revient à comparer plusieurs alternatives de conception en considérant simultanément tous les impacts. Nos travaux de recherche ont contribué à formuler quelques voies de réponses à ce questionnement.

L'analyse de la filière textile nous a en particulier amené à opter pour une approche systémique et multicritère qui prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits et permet de quantifier simultanément plusieurs impacts à savoir l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'interprétation des résultats de l'ACV des scénarios possibles pour un même produit textile n'est pas une tâche facile. En effet, en addition au grand nombre de scénarios, le manque de connaissances écologiques notamment concernant l'importance relative à chaque impact environnemental et les incertitudes et imprécisions des données de l'inventaire du cycle de vie ne permettent pas d'établir un classement raisonné des scénarios par rapport à leurs profils écologiques. Notre proposition consiste en la définition d'un modèle de décision globale multicritère spécifique à la filière textile à partir d'une méthode existante d'aide multicritère à la décision. Les études de cas ont explicité la complexité liée d'une part à la filière textile et d'autre part à la méthodologie d'ACV. Un paramètre prépondérant dans l'ACV textile a aussi été démontré à savoir la qualité. L'application de la proposition méthodologique a conduit à des résultats probants en termes d'impacts environnementaux. En outre, la diversité des scénarios, a montré que l'analyse des résultats de l'ACV textile constitue un contexte décisionnel conflictuel et complexe. En effet, le nombre de scénarios possibles pouvant être très grand et la quantité de données à traiter pouvant être proche de l'infini, la prise en compte par un cerveau humain nécessite l'utilisation d'un outil d'aide multicritère à la décision.

Mots clés : Analyse du Cycle de Vie (ACV), éco-conception, aide multicritère à la décision, surclassement, supply chain textile.

CONTRIBUTION TO THE ASSESSMENT OF THE SUPPLY CHAIN IN THE TEXTILE SECTOR: ESTABLISHING CRITERIA FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Application of the outranking method PROMETHEE to the Life Cycle Assessment of a tee-shirt

Abstract: In the context of sustainable development, new materials are used, new processes are developed and new strategies are implemented. However, it is important to check whether the desired improvement is achieved. This consists in comparing multiple design alternatives considering all impacts simultaneously. Our research has contributed to formulate some way of answers to these questions.

The analysis of the textile industry in particular has led us to adopt a systemic and multicriteria approach which is the Life Cycle Assessment (LCA). This method takes into account all stages of the life cycle of products and quantifies different environmental impacts. However, the interpretation of LCA results of different scenarios for the same textile product is not an easy task. Indeed, in addition to the large number of scenarios, including lack of ecological knowledge about the relative importance of each environmental impact and the uncertainties in the lifecycle inventory data do not let to establish rational classification scenarios in relation to their ecological profiles. Our proposal consists in defining a comprehensive multicriteria decision model specific to the textile field from an existing method of multicriteria analysis.

The case studies have explained the complexity related to the textile sector on the one hand and to the LCA methodology on the other hand. An important parameter in the textile LCA has also been shown which is the lifetime of textile products. The application of the proposed methodology has led to significant results in terms of environmental impacts. In addition, the variety of scenarios showed that the analysis of textile LCA results is a conflictual and complex decision-making context. Indeed, the number of possible scenarios can be very large and the amount of data to be processed can be close to infinity for human brain which requires the use of a multicriteria decision support system.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA), eco-design, multicriteria decision making, outranking, textile supply chain.

Liste des publications, communications et projets réalisés

Revues internationales

- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Multiple criteria decision-making for environmental impacts optimisation. *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 28 – 42, Vol. 3, No. 1, 2011.
- Jolly AM, Boufateh I, Rabenasolo B, Perwuelz A, Jolly D. Analyse de Cycle de Vie et Analyse Multicritère pour l'éco-conception des produits textiles. *Revue d'Ingénierie Numérique Collaborative*; xxxx, en phase d'édition.

Congrès internationaux avec actes

- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Optimization of environmental and social criteria in the textile supply chain: European state of the art and perspectives of research. *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management-Assessing the industrial relevance (PLM'07)*, Special Publication 3, 667 – 676, ISBN 0-907776-32-9; 2007.
- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Life Cycle Assessment: data availability, reliability and robustness in textile industry. *8th AUTEX Conference-Working towards change: Academy and Industry together*, Biella (Italy), 24 – 26 June (CD-Rom version); 2008.
- Perwuelz A, Boufateh I. How can finishing improve the environmental impact of textiles? *21st IFATCC International Congress*, Barcelona (Spain), 6 – 9 May, ISBN-13: 978-84-612-2641-2, (CD-Rom version); 2008.
- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Multiple Criteria Decision Making for environmental impacts optimization. *Computers & Industrial Engineering (CIE 2009)*, Troyes (France), 6 – 9 July, 606 – 611, ISBN: 978-1-4244-4135-8; 2009.
- Jolly AM, Boufateh I, Rabenasolo B, Perwuelz A, Jolly D. Analyse de Cycle de Vie et Analyse Multicritère pour l'éco-conception des produits textiles. *La 6ème conférence internationale de Conception & Production Intégrées (CPI'2009)*, Fès (Maroc), 19 – 21 octobre; 2009.
- Pasquet V, Perwuelz A, Behary N, Boufateh I. Overview of ecodesign in textile dyeing & finishing industry. *22nd IFATCC International Congress*, Stresa (Italy), 5 – 7 May; 2010.

Congrès nationaux avec actes

- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Aide multicritère à la décision pour l'analyse des impacts de cycle de vie. La 6^{ème} conférence STIC & Environnement, Calais (France), 16 – 18 juin; 2009.
- Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Recherche de scénarios optimums pour l'éco-conception de vêtements. Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 98, 2-910239-72-1, Ed. SFGP, Paris (France), le XIIème Congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP 2009), Marseille (France), 14 – 16 octobre; 2009.
- De Saxcé M, Perwuelz A, Boufateh I, Pesnel S. Scénarios pour la diminution de l'impact environnemental des textiles dans leur phase d'utilisation. MATERIAUX 2010, Nantes (France), 18 – 22 octobre; 2010.

Congrès internationaux et nationaux sans acte

- Perwuelz A, Boufateh I, Behary N. Water impact in a garment life cycle. International Conference of Women Engineers and Scientists (ICWES 14), Lille (France), 16 –18 July; 2008.
- Perwuelz A, Boufateh I. Overview of environmental impacts of chemistry in apparel industry. Chemistry & Ecodesign (EcoChem 2009), Montpellier (France), 1– 2 April; 2009.

Autres présentations

- Boufateh I, Rabenasolo B, Perwuelz A. Développement durable - L'Analyse du cycle de vie (ACV) des produits textiles. Journée Technologique Clubtex Uptex, ENSAIT-Roubaix (France); 13 novembre 2007.

Projet

- De Saxcé M, Boufateh I, Perwuelz A. Environmental Improvement Potentials of Textiles (IMPRO-Textiles, Call for Tender J02/292008). European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, in collaboration with Bio Intelligence Service S.A.S; 2008 – 2009.

Revue critique d'un rapport

- Labouze E, Le Guern Y, Petiot C. Analyse de Cycle de Vie d'une chemise en lin et d'une chemise en coton. Organisations professionnelles du lin, Bio Intelligence Service S.A.S. Rapport final; juillet 2007.

Table des matières

<i>Liste des publications, communications et projets réalisés</i>	9
<i>Table des matières</i>	13
<i>Index des figures</i>	17
<i>Index des tableaux</i>	21
<i>Liste des acronymes utilisés dans le texte</i>	23
<i>Introduction</i>	25
<i>Chapitre 1</i>	31
<i>Le développement durable dans la filière textile, un enjeu de pérennité</i>	31
1.1 Introduction	32
1.2 Complexité de la filière textile	33
1.2.1 Diversité des processus de production et des produits	34
1.2.2 Diversité de la chaîne d’approvisionnement et la logistique de distribution	36
1.2.3 L’utilisation	37
1.2.4 La valorisation en fin de vie	38
1.2.5 Bilan sur la complexité	40
1.3 Evolution des outils d’évaluation des impacts	41
1.3.1 Aspect social	42
1.3.1.1 Les conventions de l’OIT	42
1.3.1.2 Les normes de responsabilité sociale	42
1.3.1.3 Audits, codes de conduite et labels	43
1.3.2 Aspect environnemental	44
1.3.2.1 Ecolabels	44
1.3.2.2 Normes	44
1.3.2.3 Outils qualitatifs et quantitatifs d’évaluation environnementale	46
1.3.2.4 Obligations réglementaires	46
1.4 L’analyse du cycle de vie (ACV)	48
1.4.1 Définitions et principes	49
1.4.1.1 Définition des objectifs et du champ de l’étude	51
1.4.1.2 Analyse de l’inventaire du cycle de vie	52
1.4.1.3 Evaluation des impacts du cycle de vie	57
1.4.2 Les logiciels d’ACV	62
1.5 Etat de l’art du développement durable dans la filière textile	63
1.5.1 Définition des impacts sociaux et environnementaux de la filière textile	64
1.5.1.1 Impacts sociaux	64

1.5.1.2	Impacts environnementaux	66
1.5.2	L'ACV dans la filière textile	70
1.5.2.1	Les études réalisées	70
1.5.2.2	Analyse des données utilisées	71
1.5.3	L'éco-conception textile	76
1.6	Conclusion	78
Chapitre 2		83
<i>Aide multicritère à la décision pour l'analyse du cycle de vie</i>		83
2.1	Introduction	84
2.2	Notre objectif : coupler l'ACV et l'analyse multicritère	84
2.3	L'aide multicritère à la décision et l'analyse du cycle de vie : ressemblance et complémentarité	86
2.3.1	Ressemblance	87
2.3.2	Complémentarité	89
2.4	Choix d'une méthode multicritère pour l'interprétation des résultats de l'ACV	90
2.4.1	Formulation de la problématique	90
2.4.2	Justification du choix	93
2.4.3	Principes méthodologiques	97
2.4.3.1	PROMETHEE I	99
2.4.3.2	PROMETHEE II	100
2.5	Conclusion	100
Chapitre 3		103
<i>Modélisation et évaluation de la chaîne d'approvisionnement textile</i>		103
3.1	Introduction	104
3.2	Choix du scénario de référence	105
3.2.1	Le tee-shirt en coton, un produit significatif du secteur textile de l'habillement	105
3.2.2	L'Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt	109
3.3	Evaluation des impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt	116
3.3.1	Résultats de l'ACV	117
3.3.2	Imprécisions et incertitudes : analyse de sensibilité	124
3.3.2.1	Incertitudes relatives au choix de l'unité fonctionnelle	125
3.3.2.2	Incertitudes relatives à l'inventaire du cycle de vie	126
3.3.2.3	Choix de la méthode d'analyse des impacts du cycle de vie	129
3.4	Prise en compte des critères sociaux liés aux pays de production	133

3.5 Conclusion	138
Chapitre 4	140
<i>L'aide multicritère à la décision pour le classement des scénarios selon les critères du développement durable</i>	140
4.1 Introduction	141
4.2 Diversité des scénarios du cycle de vie du tee-shirt	141
4.2.1 Scénarios possibles de fabrication	143
4.2.2 Résultats de l'ACV de quelques exemples de produits	148
4.2.2.1 Diversité par fibre	149
4.2.2.2 Diversité par filature	150
4.2.2.3 Diversité par tricotage	154
4.2.2.4 Diversité par Apprêts	156
4.2.2.5 Scénarios analysés	157
4.3 Définition du modèle de décision	161
4.3.1 Choix des critères	161
4.3.2 Choix des seuils de préférence et d'indifférence pour chaque critère	162
4.3.3 Pondération des critères	163
4.4 Résultats du surclassement	165
4.4.1 Pondérations égales des critères	165
4.4.2 Pondération double du critère GWP	168
4.4.3 Pondération selon l'importance relative de l'impact maximal	170
4.5 Conclusion	174
Conclusion et perspectives	178
5.1 Conclusion générale	179
5.2 Perspectives	182
Références bibliographiques	184
Annexes	197
Annexe 1 : Principaux polluants et principaux indicateurs d'impacts environnementaux	198
A1.1 Principaux polluants	198
Particules solides	198
SO ₂ - Dioxyde de soufre	198
NO _x - Oxydes d'azote	198
CO - Monoxyde de carbone	198
COV - Composés organiques volatils	198
CO ₂ - Dioxyde de carbone	199
CH ₄ - Méthane	199

N ₂ O - Protoxyde d'azote	199
O ₃ - Ozone	200
H ₂ S - Hydrogène sulfure	200
NH ₃ – Ammoniac	200
Métaux lourds	200
DCO	201
A1.2 Les normes d'émission Euro	202
A1.3 Quelques indicateurs d'impacts environnementaux et leurs coefficients d'équivalence	202
Potentiel d'épuisement des ressources)	202
Potentiel d'acidification	206
Potentiel d'eutrophisation	207
Réchauffement climatique ou effet de serre	208
Potentiel de formation de l'ozone photochimique	208

Annexe 2 : les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (modèles de caractérisation)	211
CML 2001	211
Eco-indicator 99	214
EDIP 97 et EDIP 2003	214
Impact 2002+	215
TRACI	216

Annexe 3 : Liste des scénarios analysés en variant les fibres, les procédés de filature, de tricotage, de teinture et le produit de fonctionnalisation	218
---	------------

Index des figures

<i>Figure 1. Représentation synoptique du manuscrit de la thèse</i>	29
<i>Figure 1. 1. L'interconnexion des activités au sein du secteur textile</i>	33
<i>Figure 1. 2. Le problème de transfert de pollution</i>	48
<i>Figure 1. 3. Phases d'une ACV</i>	50
<i>Figure 1. 4. Aperçu de la réalisation d'une évaluation de la qualité des données: norme ISO / TR14049</i>	55
<i>Figure 1. 5. Structure d'une méthode d'évaluation d'impacts</i>	58
<i>Figure 1. 6. Etat de l'art du développement durable dans la filière textile : acteurs, outils et domaines d'application</i>	79
<i>Figure 2. 1. Eléments de l'évaluation de l'impact du cycle de vie : norme ISO 14040</i>	85
<i>Figure 2. 2. Comparaison des étapes de réalisation de l'ACV et l'analyse multicritère</i>	88
<i>Figure 2. 3. La préférence dans PROMETHEE</i>	98
<i>Figure 3.1. Principales fibres utilisées dans l'industrie du textile de l'habillement</i>	106
<i>Figure 3.2. Evolution de la consommation mondiale ainsi que des consommations nationales de fibres de coton dans les principaux pays producteurs de textiles entre 1980/1981 et 2012/2013 en millions de tonnes</i>	106
<i>Figure 3.3. Scénario de référence pour la modélisation et l'évaluation de la supply chain textile</i>	108
<i>Figure 3.4. Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt : modélisation du système, recensement des flux entrants et sortants et quantification des impacts</i>	109
<i>Figure 3.5. Sources de l'énergie électrique en Chine et aux Etats unis</i>	113
<i>Figure 3.6. Consommation totale d'eau du cycle de vie du tee-shirt en coton</i>	118
<i>Figure 3.7. Consommation totale d'énergie du cycle de vie du tee-shirt en coton</i>	118
<i>Figure 3.8. Potentiel d'épuisement des ressources (ADP) du cycle de vie du tee-shirt en coton en Kg Sb équivalent</i>	119
<i>Figure 3.9. Potentiel d'épuisement des ressources (ADP) de l'étape de fabrication du tee-shirt en coton</i>	119
<i>Figure 3.10. Les impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt en coton: comparaison des étapes</i>	120
<i>Figure 3.11. Potentiel de réchauffement climatique (GWP) : comparaison des étapes du cycle de vie du tee-shirt</i>	121

<i>Figure 3.12. Analyse de sensibilité des résultats par rapport aux données de l'ICV de l'étape de production des fibres</i>	127
<i>Figure 3.13. Comparaison des résultats en tenant en compte la règle d'affectation fibres/graines de coton</i>	128
<i>Figure 3.14. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, IMPACT 2002+ et TRACI pour l'évaluation du potentiel de réchauffement climatique en Kg CO₂ équivalent</i>	130
<i>Figure 3.15. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 1997 et TRACI pour l'évaluation du potentiel d'acidification</i>	130
<i>Figure 3.16. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 1997 et IMPACT 2002+ pour l'évaluation du potentiel de création de l'ozone photochimique en Kg C₂H₄ équivalent</i>	131
<i>Figure 3.17. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, TRACI et IMPACT 2002+ pour l'évaluation du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone en Kg R11 équivalent</i>	131
<i>Figure 3. 18. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, IMPACT 2002+ et TRACI pour l'évaluation du potentiel d'eutrophisation en Kg phosphate équivalent</i>	132
<i>Figure 3.19. Comparaison des parts de chaque étape du cycle de vie du tee-shirt dans le potentiel d'eutrophisation par différentes méthodes d'AICV</i>	133
<i>Figure 4. 1. Diversité des scénarios de fabrication du produit textile</i>	147
<i>Figure 4.2. Comparaison des scénarios du cycle de vie des tee-shirts coton, lyocell, polyester et viscose avec normation à 1 pour le scénario de référence du tee-shirt en coton</i>	150
<i>Figure 4.3. Les étapes de la filature</i>	150
<i>Figure 4.4. Les trois scénarios considérés de la filature du coton</i>	151
<i>Figure 4.5. Evaluation des impacts du cycle de vie des trois alternatives du tee-shirt en coton en variant le processus de filature avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC</i>	152
<i>Figure 4.6. Détermination de la détérioration de l'éprouvette selon la norme NF EN ISO 12947-2 (04/99)</i>	153
<i>Figure 4.7. Résultats de l'ACV en tenant en compte la durée de vie basée sur l'usure correspondante à chaque scénario : CO_C_CC avec normation à 1, CO_OE_CC</i>	154
<i>Figure 4.8. Evaluation des impacts du cycle de vie des trois alternatives de tee-shirt coton en variant les procédés du tricotage avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC</i>	156
<i>Figure 4.9. Evaluation des deux alternatives de tee-shirt en coton en ajoutant un apprêt easy-care (CO_C_CC_EC) avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC</i>	156
<i>Figure 4.10. Evaluation des impacts du cycle de vie des scénarios de tee-shirt: CO_C_CC et CO_C_CC_EC en tenant en compte la durée de vie basée sur l'usure avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC</i>	157
<i>Figure 4.11. Positionnement des écarts entre les valeurs des critères entre les deux seuils Q et P choisis</i>	163
<i>Figure 4.12: Classement partiel des scénarios avec des pondérations égales</i>	167

Figure 4.13. Classement partiel des scénarios avec une pondération en fonction de l'impact maximal des scénarios pour chaque critère _____ 171

Figure A2. 1. Les catégories d'impacts évaluées par CML 2001 _____ 213

Figure A2. 2. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode Eco-indicator 99 _____ 214

Figure A2. 3. Les catégories d'impact évaluées par la méthode EDIP _____ 215

Figure A2. 4. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode IMPACT 2002+ _____ 216

Figure A2. 5. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode TRACI _____ 217

Index des tableaux

<i>Tableau 1. 1. Diversité des métiers et des produits du secteur textile</i>	34
<i>Tableau 1. 2. Habitudes de lavages des consommateurs dans cinq pays européens</i>	38
<i>Tableau 1. 3. Matrice d'évaluation de la qualité des données</i>	54
<i>Tableau 1. 4. Les facteurs d'incertitude par défaut (sans dimension, contribuant à la variance) appliqués à la matrice de qualité</i>	56
<i>Tableau 1. 5. Les méthodes d'analyse des impacts du cycle de vie</i>	60
<i>Tableau 1. 6. Comparaison des principaux logiciels d'ACV et de leurs bases de données textile</i>	63
<i>Tableau 1. 7. Contribution de la catégorie des textiles aux impacts environnementaux générés par l'Union Européenne</i>	67
<i>Tableau 1.8: Classification des données de quelques ACV de produits en coton selon la norme ISO 14040</i>	72
<i>Tableau 1.9: Complétude des bases de données textiles disponibles</i>	74
<i>Tableau 2. 1. Comparaison des étapes de réalisation de l'ACV et l'analyse multicritère</i>	88
<i>Tableau 2. 2. Aide multicritère à la décision pour l'ACV: étapes et méthodes</i>	89
<i>Tableau 2. 3. les quatre problématiques de référence</i>	91
<i>Tableau 2. 4. les principes méthodologiques de l'agrégation des critères: avantages et inconvénients</i>	95
<i>Tableau 3. 1. Comparaison des quantités d'engrais chimiques et de pesticides utilisées en Chine et aux Etats Unis</i>	112
<i>Tableau 3. 2. Classification des données de l'ICV des processus élémentaires selon leurs origines</i>	115
<i>Tableau 3. 3. Evaluation de la qualité des données de l'ICV des processus élémentaires selon les indicateurs définis par Weidema, 1996</i>	115
<i>Tableau 3. 4. Localisation des impacts majeurs du cycle de vie du tee-shirt coton</i>	122
<i>Tableau 3. 5. Pourcentages de variation des résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie en fonction des hypothèses de choix de la durée de vie estimée en nombre de lavages</i>	125
<i>Tableau 3. 6. Evaluation des critères sociaux selon le pays de production</i>	136
<i>Tableau 4.1. Réduction de la consommation d'eau et d'énergie par l'amélioration technologique des machines à laver</i>	142

<i>Tableau 4.2: Diversité des procédés de fabrication en fonction de la fibre</i>	143
<i>Tableau 4.3. Détermination de la détérioration de deux échantillons de tee-shirt selon la norme NF EN ISO 12947-2 (04/99)</i>	153
<i>Tableau 4.4. Comparaison des trois procédés de tricotage d'un pullover en laine</i>	155
<i>Tableau 4.5. Résultats de l'ACV des scénarios sélectionnés du cycle de vie du tee-shirt</i>	158
<i>Tableau 4.6. Méthodologie de calcul des poids des critères (impacts environnementaux)</i>	164
<i>Tableau 4.7. Comparaison des classements partiels des scénarios selon la pondération</i>	168
<i>Tableau 4. 8. Intervalles de stabilité des poids des critères dans le cas d'une pondération égale</i>	169
<i>Tableau 4. 9. Comparaison des classements partiels des scénarios selon la pondération</i>	172
<i>Tableau 4. 10. Comparaison des intervalles de stabilité des poids des critères</i>	173
<i>Tableau A1.3. 1. Facteurs d'équivalences des ressources du potentiel d'épuisement des ressources</i>	202
<i>Tableau A1.3. 2. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel d'acidification</i>	207
<i>Tableau A1.3. 3. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel d'eutrophisation</i>	207
<i>Tableau A1.3. 4. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel de réchauffement climatique</i>	208
<i>Tableau A1.3. 5. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel de formation de l'ozone photochimique</i>	208
<i>Tableau A2. 1. Liste des méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie</i>	211

Liste des acronymes utilisés dans le texte

ACV	Analyse du Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADP	Abiotic Depletion Potential (Potentiel d'épuisement des ressources)
AFNOR	Association Française de Normalisation
AICV	Analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie
AP	Acidification Potential
CEP	Council of Economic Priorities
CMED	Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement
CML	Centre of environmental science - Leiden University
COPOLCO	Consumer Policy Committee
COST 628	CO-operation in the fields of Scientific and Technical research (European project)
COV	Composants organiques volatils
DALY	Disability Adjusted Life Years
DBO	Demande Biochimique en Oxygène
DCB	DiChloroBenzène
DCO	Demande chimique en oxygène
DQI	Data Quality Indicator
EFTA	European Fair Trade Association
EP	Eutrophication Potentiel
ESQCV	Evaluation Simplifiée Qualitative du Cycle de Vie
ETI	Ethical Trading Initiative
FAETP	Fresh water Aquatic Eco-Toxicity Potential
FINE	Fairtrade Labelling Organizations, International Federation for Alternative Trade, Network of European Worldshops et European Fair Trade Association
FLA	Fair Labour Association
FLO	Fairtrade Labelling Organizations
FWF	Fair Wear Foundation
GWP	Global Warming Potential
HTP	Human Toxicity Potential
ICV	Inventaire du Cycle de Vie
IEA	International Energy Agency
IFAT	International Federation for Alternative Trade ou aussi appelée International Fair Trade Association
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization

ISO	Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)
MAETP	Marine Aquatique Eco-Toxicity Potential
MTD	Meilleures Technologies Disponibles
NEWS	Network of European Worldshops
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ODP	Ozone Layer Depletion Potential
OIT	International Labour Organization
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
PES	Polyester
PLA	Acide PolyLactique
PME	Petites et Moyennes Entreprises
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
PP	Polypropylène
REACH	enRegistrement, Evaluation et Autorisation des substances Chimiques
SAI	Social Accountability International
SETAC	The Society of Environmental Toxicology And Chemistry
TETP	Terrestic Eco-Toxicity Potential
TEG	TriEthylene Glycol
UE-25	Union Européenne des 25 pays
UNEP	United Nations Environment Programme
VP	Campagnes vêtements propres
WFTO	World Fair Trade Organization
WMO	World Meterological Organization

Introduction

Contexte

L'histoire de la filière textile a été marquée par des évolutions économiques et technologiques allant de la découverte de la fibre de coton il y a près de 7000 ans en passant par la progression de la machinerie textile et l'apparition des fibres issues de différentes sources (pétrole, bois et même maïs, caséine de lait...) jusqu'à l'implication des textiles dans différents domaines (transport, médical...). La recherche était toujours active dans ce domaine et au profit du développement économique dans une ère où les ressources étaient considérées comme non épuisables jusqu'à l'apparition du concept du développement durable énoncé en 1987 devant les Nations Unies, par la commission dite Brundtland : un développement qui *« satisfait les besoins des générations actuelles sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs »* [1].

Actuellement, le développement durable est devenu un facteur de compétitivité qui a augmenté le dynamisme du secteur textile. En effet, en France depuis 2004, on a recensé plus de 400 acteurs différents dont les activités sont dédiées au développement durable dans le secteur textile [2]. Dès lors, les tendances des textiles sont menées par l'émergence des promesses écologiques qui distinguent les donneurs d'ordre adoptant des stratégies d'intérêt environnemental. Parce que le développement durable est aussi un développement qui permet de concilier des préoccupations économiques et sociales, les acteurs se penchent également sur la communication concernant le respect de ces deux piliers.

Du côté du consommateur, suite à l'augmentation de la conscience envers les problèmes environnementaux (réchauffement climatique, épuisement des ressources...), on se focalise de plus en plus sur des produits prétendument verts (écologique, naturel, bio, éthique, équitable...). En effet, en 2006, 31% (au lieu de 18,6% en 2005) des français déclarent choisir régulièrement des produits plus respectueux de l'environnement [3].

La communication via un marketing « vert » manque d'information précise concernant l'origine de la matière écologique et les procédés de sa fabrication. Ce qui remet en doute la légitimité des innovations, du point de vue développement durable, apportées par les acteurs

dans la filière textile. Dès lors, elle amplifie la difficulté d'agir convenablement pour consommer proprement.

Afin de remédier à ce problème, différents outils ont été utilisés pour évaluer la performance environnementale des produits innovants et pour communiquer une information complète à l'usage du consommateur. Néanmoins, une difficulté persiste, concernant le choix et la prise de décision aussi bien pour le producteur que pour le consommateur.

Dans le cadre de ces travaux, on utilisera une approche scientifique pour quantifier les impacts environnementaux, comparer différentes alternatives pour faire un bon choix en tenant compte de différents critères simultanément (environnementaux, sociaux / sociétaux¹).

Certes l'aspect économique est un pilier du développement durable et il est aussi important que les deux autres piliers à savoir l'environnement et le social. Cependant il ne sera pas évalué dans le cadre de ces travaux. D'une part parce que le développement économique (optimisation des coûts, des délais,...) a toujours été le centre d'intérêt des acteurs dans la filière textile. D'autre part, il a été prouvé que le développement durable est économiquement viable [4].

Organisation du manuscrit de la thèse

Cette thèse porte sur l'aide à la décision pour le développement durable dans la filière textile. Elle s'intitule «Contribution à l'évaluation de la supply chain pour la filière textile : définition de critères de développement durable».

Cette thèse s'articule autour de cinq chapitres répartis entre l'état de l'art, une étude de cas, les résultats et les perspectives comme représenté par la figure 1.

¹ La différence dans les définitions du dictionnaire pour les mots « social » et « sociétal » ne me paraît pas triviale. Par contre, d'après les utilisations de ces deux mots dans le contexte du développement durable notamment dans la « RSE », on constate que l'adjectif « social » est utilisé pour décrire la responsabilité sociale de l'entreprise envers ses salariés et que l'adjectif « sociétal » est utilisé pour décrire la responsabilité sociétale de l'entreprise envers la société (qui comprend les clients, les fournisseurs, les ONG, la communauté, etc.). De ce fait, l'adjectif « social » est utilisé pour la suite pour définir les impacts sur les travailleurs dans l'industrie textile.

Le premier chapitre décrit la filière textile. On se focalise sur le premier problème abordé dans ces travaux à savoir la multitude des matières, des produits, des procédés et finalement des scénarios du cycle de vie des produits textiles. Ce qui rend la modélisation de la filière textile fastidieuse. L'objectif étant d'évaluer les aspects environnementaux et sociaux de la chaîne d'approvisionnement textile, un état d'art des outils d'évaluation disponibles est réalisé afin d'aboutir à un choix final de l'outil utilisé dans ces travaux qui est l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). La définition de la méthodologie de l'ACV permet de définir les problématiques résolues par la suite. La revue de la littérature a pour but de recenser les impacts majeurs de la filière textile d'un point de vue développement durable. Elle permet aussi de positionner l'ACV par rapport au contexte de la recherche et au contexte industriel. Ce chapitre, dont l'objectif est de faire émerger la question de recherche objet de cette thèse, a aussi pour but de montrer l'étendue du sujet de l'ACV et de sa complexité dans la filière textile. Ceci fait ressortir le problème de collecte de données lié d'une part, à leur disponibilité, leur validité et leur fiabilité et d'autre part au temps imparti à cette tâche.

Le chapitre 2 analyse la question de recherche : *comment rendre simple l'interprétation des résultats de l'ACV en vue d'une prise de décision raisonnée d'un bon compromis minimisant les impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit textile ?* La problématique qui émerge dans cette section est l'expertise nécessaire pour évaluer les impacts du cycle de vie et pour faire un classement des scénarios selon leurs profils écologiques établis à partir de plusieurs critères. Le premier constat de l'aspect multicritère de cette problématique nous amène à faire une comparaison entre l'ACV et les méthodes d'aide multicritère à la décision (AMCD). Le deuxième constat est la ressemblance entre ces méthodologies et la complémentarité qui peut exister entre elles. La formulation de la problématique nous guide dans le choix d'une méthode d'aide multicritère à la décision pour compléter la dernière étape de l'ACV à savoir l'interprétation des résultats qui demeure susceptible d'être améliorée.

Dans le chapitre 3, le choix d'un exemple représentatif de la filière textile résulte de l'impossibilité de modéliser et évaluer la filière textile dans sa globalité vu les contraintes d'indisponibilité des données pour l'inventaire des cycles de vie et l'insuffisance du temps alloué à ces travaux. Cependant, une base de données comprenant les procédés de l'ennoblissement a été récupérée et enrichie par les données nécessaires pour la réalisation de l'ACV explicitée dans ce chapitre. Cette base de données s'enrichit continuellement des

projets qui en ont découlé au sein du GEMTEX en parallèle à cette thèse. L'analyse des imprécisions et incertitudes répond à des questions de choix de l'unité fonctionnelle, des données de l'inventaire du cycle de vie et de la méthode d'analyse des impacts du cycle de vie (AICV). Une problématique qui émerge ainsi est le choix d'une méthode d'AICV parmi plusieurs. Les critères sociaux définis dans ce chapitre ne sont pas quantifiés et intégrés dans la prise de décision par la suite. En effet, cet aspect important mérite d'être étudié plus profondément par les spécialistes.

Le chapitre 4 explicite la problématique de la diversité des scénarios de production dans la filière textile. En effet, une trentaine de scénarios parmi des centaines possibles sont modélisés et évalués par l'ACV. Des tests expérimentaux ont été réalisés afin de valider les hypothèses liées au paramètre durée de vie des produits. Les impacts environnementaux quantifiés par l'ACV constituent les critères du processus de décision défini. Finalement, l'interprétation de ces résultats consiste à classer les scénarios selon leurs impacts environnementaux en appliquant la méthode de surclassement PROMETHEE I.

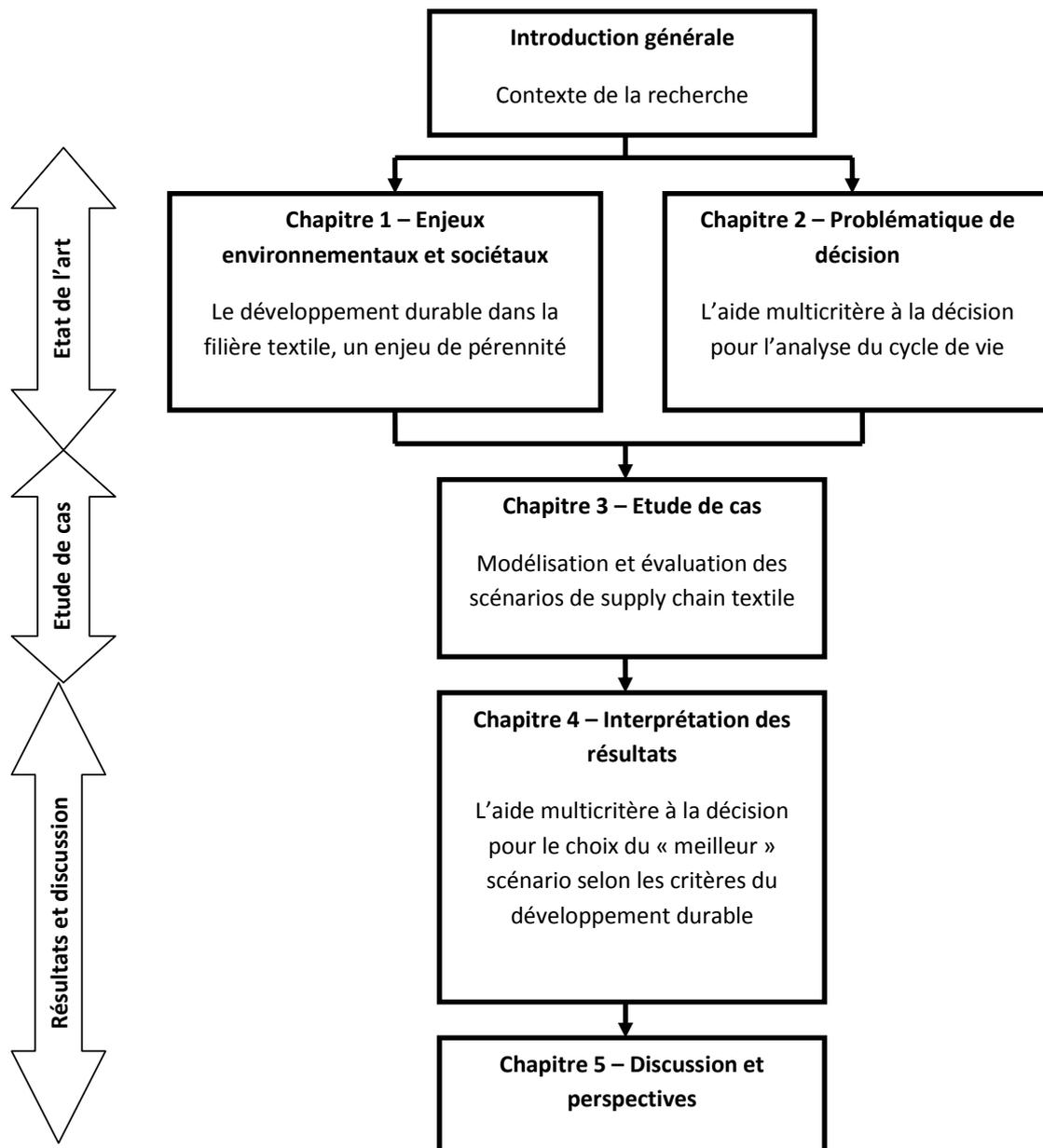


Figure 1. Représentation synoptique du manuscrit de la thèse

Chapitre 1

Le développement durable dans la filière textile, un enjeu de pérennité

Sommaire

1.1 Introduction	32
1.2 Complexité de la chaîne d’approvisionnement textile	33
1.2.1 Diversité des processus de production et des produits _____	34
1.2.2 Diversité de la chaîne d’approvisionnement et la logistique de distribution ____	36
1.2.3 L’utilisation _____	37
1.2.4 La valorisation en fin de vie _____	38
1.2.5 Bilan sur la complexité _____	40
1.3 Evolution des outils d’évaluation des impacts	41
1.3.1. Aspect social _____	42
1.3.2 Aspect environnemental _____	44
1.4 L’analyse du cycle de vie (ACV)	48
1.4.1. Définitions et principes _____	49
1.4.2. Les logiciels d’ACV _____	62
1.5 Etat de l’art du développement durable dans la filière textile	63
1.5.1. Définition des impacts sociaux et environnementaux de la supply chain textile	64
1.5.2. L’ACV dans la filière textile _____	70
1.5.3. L’éco-conception textile _____	76
1.6 Conclusion	78

1.1 Introduction

La filière textile est caractérisée entre autres facteurs par la diversité des produits qu'elle fabrique. En effet, outre l'habillement et l'ameublement qui sont les premières fonctions du textile avec respectivement 43,5% et 33% du chiffre d'affaires global de la production du textile en Europe en 2003 [5], les textiles techniques trouvent leurs débouchés dans des segments d'application multiples tels que le transport, le médical, la construction, l'agriculture, la protection... L'émergence des textiles techniques en Europe est le résultat de la réorientation de la filière textile traditionnelle fortement sinistrée par la délocalisation de la production dans des pays à faible coût de main d'œuvre comme l'Asie de l'Est, le Bangladesh et l'Inde. Pour continuer à exister en Europe, les industriels du textile ont opté pour l'innovation et la recherche et développement pour apporter des solutions nouvelles et s'ouvrir à d'autres secteurs industriels. Aujourd'hui, les acteurs du secteur textile, dans le but de faire face à une concurrence rude, sont devenus de plus en plus exigeants en terme de développement durable.

Compte tenu de la complexité de cette filière, et de l'état existant des impacts économiques, environnementaux et sociaux, différentes solutions sont apparues pour assurer la pérennité d'un secteur textile responsable du point de vue environnemental et social.

Dans ce qui suit, on entend par secteur textile, la filière du textile de l'habillement qui reste prédominante et qui représentera notre champ d'étude. Les textiles techniques ont été exclus de cette étude d'une part, car ils peuvent être inclus dans d'autres domaines selon leurs applications et d'autre part car les procédés de fabrication sont très différents par rapport aux textiles de l'habillement. Quant aux textiles de l'ameublement, on peut les segmenter en deux catégories. La première concerne les textiles dont les processus de production se rapprochent de l'habillement tel que le linge de maison et la deuxième comprend les produits dont la production est très différente de celle des textiles de l'habillement comme les moquettes.

Dans la section 1.2, la description de la filière textile est faite sous l'angle de la complexité de sa modélisation et de son évaluation sociale et environnementale. Ensuite un état de l'art des outils dédiés à ces évaluations est réalisé dans la section 1.3. Le choix de l'analyse du cycle de vie (ACV) est ensuite justifié. La section 1.4 définit cette méthodologie et la section 1.5 montre son positionnement dans la filière textile.

Finalemment ce chapitre a pour but de présenter les problématiques résolues dans les chapitres suivants.

1.2 Complexité de la filière textile

Le secteur textile bien qu'il soit un secteur industriel à part entière est constitué de plusieurs activités très différentes ayant des relations d'indépendance et de complémentarité entre elles : chaque maillon de la chaîne est un secteur d'activité à part entière alimenté par les produits sortant de l'activité précédente (figure 1.1). En effet, dès le début de la chaîne, les matières premières sont très diverses et peuvent être issues aussi bien de l'agriculture que de l'industrie chimique ou encore de l'industrie du pétrole. L'industrie textile proprement dite commence à l'étape de la préparation des fibres pour fabriquer le fil et va jusqu'à la finalisation du produit textile à l'étape de confection et de conditionnement. Au sein de cette industrie qui regroupe la filature, le tissage, le tricotage, l'ennoblissement, la métrologie et la confection, les activités sont tellement différentes qu'on peut la fractionner en plusieurs industries textiles. En addition à celles-ci, le secteur de distribution complète la chaîne en y rajoutant encore plus de diversité. L'étape de fin de vie des produits textiles présente peu de complexité quant à la décomposition du produit contrairement à d'autres industries. Néanmoins, elle est caractérisée par la diversité des scénarios en fonction de la matière première et aussi en fonction du domaine d'application.

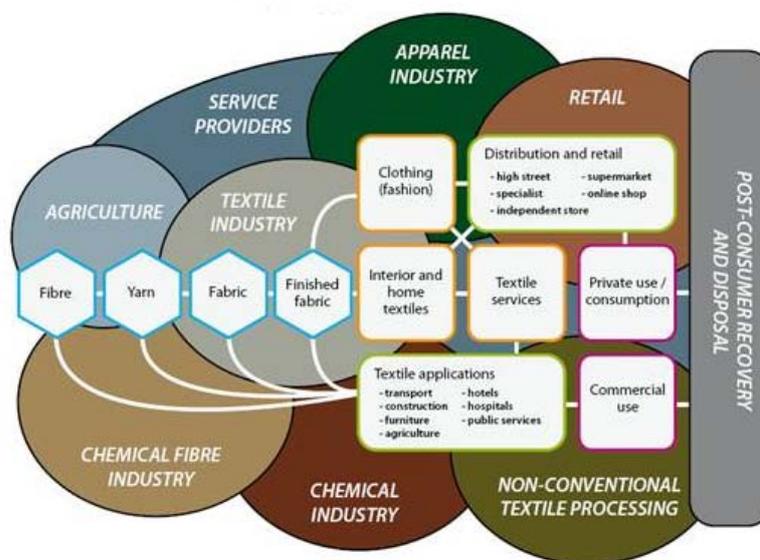


Figure 1.1. L'interconnexion des activités au sein du secteur textile [6]

1.2.1 Diversité des processus de production et des produits

La filière textile est hétérogène car elle intègre plusieurs industries de la préparation des fibres et la filature jusqu'à la confection en passant par le tissage ou le tricotage et l'ennoblissement. Le tableau 1.1 ci-dessous, qui est un exemple de répartition des activités de l'industrie textile en France, montre la diversité des métiers et des produits au sein du même secteur.

Tableau 1.1. Diversité des métiers et des produits du secteur textile [7]

La production française en 2005	Production
Entreprises de 20 salariés et plus	
Fibres (en tonnes)	
Fibres naturelles préparées (lin, laine,...)	219 459
Fibres artificielles ou synthétiques	3 818
Fils de fibres naturelles (en tonnes)	
Fils de soie, laine, lin et jute	7 484
Fils de coton	32 393
Fils artificiels ou synthétiques (y compris mélangés)	43 842
Tissus	
(en tonnes)	
Tissus de laine, soie, etc.	4 622
Tissus de coton	46 550
Tissus en fibres artificielles et synthétiques (y compris fils de filaments)	55 040
Tissus spéciaux	29 826
Etoffes à maille	31 020
Ennoblissement	129 060
(en milliers de mètres linéaires)	
Tissus de laine ou mélangés avec de la laine pour vêtements	25 452
Fabrication d'articles textiles (en tonnes)	
Linge de maison (y compris couvertures)	24 564
Fabrication de petits articles textiles de literie	-
Fabrication d'autres articles confectionnés	-
Autres industries textiles (en milliers de m²)	
Tapis, moquettes	44 730

La production française en 2005	Production
Entreprises de 20 salariés et plus	
(en tonnes)	
Ficelles, cordes, cordage, filets à maille	41 412
Non tissés	121 937
Produits textiles divers :	
Passenterie	-
Dentelle	-
Broderies	-
Ouaterie	13 950
Feutres	36 976
Tissus enduits ou imprégnés	147 422

En outre, la variabilité des scénarios possibles pour un seul et même produit amplifie cette complexité. En effet, le choix de la nature de la fibre a une grande influence sur la production. Une fibre synthétique comme le polyester qui est fabriquée à partir de polymères plastiques (issus du pétrole) a des caractéristiques différentes de celles d'une fibre naturelle telle que le coton. Par conséquent, le procédé de filature du coton, qui est une fibre courte, est différent de celui du polyester. La teinture et les traitements d'ennoblissement sont aussi différents puisqu'on utilise des colorants et des additifs différents à des températures différentes car le polyester est hydrophobe alors que le coton est hydrophile. En addition à la matière première, le type de produit est un autre facteur de diversité dans le secteur textile. En effet, pour fabriquer un tee-shirt ou un pull, on procède au tricotage alors que la chemise ou le pantalon sont généralement fabriqués à partir d'un tissu (produit sortant du tissage). Un autre paramètre conséquent sur le choix du scénario de production est la qualité du produit final. Cette dernière est directement liée à la qualité du fil d'où un choix particulier des processus de filature. Citons à titre d'exemple la différence de qualité entre la filature peignée et la filature cardée. La qualité du produit est aussi liée à la solidité de la teinture. Par exemple, la teinture du coton avec un colorant réactif est moins solide que celle réalisée avec un colorant cuve. Finalement, la diversité des scénarios de production est aussi influencée par l'évolution technologique du secteur et l'apparition de nouvelles techniques telles que le tricotage intégral ou « fully fashioned » à la place du traditionnel coupé cousu.

Afin d'illustrer la diversité des scénarios de la chaîne d'approvisionnement textile liée à la production, un exemple est donné au chapitre 3. Ainsi, le premier problème à résoudre est la modélisation de ces divers processus et produits.

1.2.2 Diversité de la chaîne d'approvisionnement et la logistique de distribution

Tenant compte du grand nombre d'acteurs de la chaîne d'approvisionnement textile [8] et de l'étendue géographique de celle-ci [9], la logistique joue un rôle capital et incontournable dans le secteur textile de l'habillement. En effet, elle couvre aussi bien la planification de la fabrication et des approvisionnements que le contrôle qualité, la livraison des produits finis et la gestion des retours. Le monde du textile de l'habillement étant calé sur la saisonnalité des produits, il doit faire face à plusieurs contraintes telles que le raccourcissement des cycles de vie des produits et des délais de réaction à la demande influencée par plusieurs événements (effets de tendance, soldes...). Dans ce contexte, l'industrie du textile de l'habillement bénéficie actuellement d'une large gamme des technologies de l'information permettant aux donneurs d'ordre d'avoir une planification flexible et surtout une réaction de plus en plus rapide envers les éventuels changements du marché de l'habillement. En outre, l'adaptation de l'offre à la demande se présente en différentes structures allant de la production de masse à la mass-customisation et au prototypage virtuel. Dès lors, les parcours de distribution sont devenus très diversifiés intégrant différentes stratégies d'approvisionnement et de gestion de stocks. Pour citer les méthodes les plus utilisées dans l'industrie du textile de l'habillement : la « Quick Response » est une initiative américaine du début des années 80 basée sur l'échange des données informatisées [10, 11]. Elle visait à maximiser l'efficacité des chaînes d'approvisionnement en permettant des temps de réaction plus courts allant jusqu'à 4 semaines pour l'expédition des commandes incluant la production (c'est le cas pour Benetton par exemple); le juste-à-temps qui est une méthode d'organisation et de gestion de la production visant à minimiser les stocks a prouvé son efficacité dans le secteur textile. Toutefois, le développement de la sous-traitance, la délocalisation de la production des textiles menant à des chaînes d'approvisionnement étendues géographiquement complique d'avantage la gestion des approvisionnements et génère des pollutions liées aux transports nécessaires. Le grand nombre d'acteurs dans la supply chain textile (du fournisseur de la matière première à la confection du produit fini) complique également la décision quant aux choix des fournisseurs et de leurs localisations. L'environnement concurrentiel et la

segmentation de la demande des consommateurs augmentent le nombre de variété de produits, ce qui rend la prévision et la planification de la chaîne d'approvisionnement difficile et imprécise. D'une part, malgré l'évolution rapide des technologies permettant la disponibilité de l'information en temps réel par rapport à la demande et à l'état des stocks, la plupart des articles de l'habillement sont produits en grande quantité près de six mois avant la période de vente. Par conséquent, de nombreuses références restent en surproduction (concernant le modèle, le coloris ou la taille) d'où l'importance de la « reverse logistique ».

D'autre part, une gestion d'approvisionnement visant à réduire les stocks pourrait faire face au problème de réassort qui représente une étape supplémentaire de la chaîne d'approvisionnement vu la variabilité du choix du fournisseur (celui qui répond le plus rapidement à la demande), sa localisation (la plus proche) ainsi que le mode de transport (le plus rapide).

Ainsi, un deuxième problème se pose qui est la récupération de ces différentes données mondiales et la considération des divers phénomènes rentrant en jeu dans la supply chain.

1.2.3 L'utilisation

L'utilisation des produits textiles bien qu'elle soit spécifique à trois étapes seulement à savoir le lavage, le séchage et le repassage, est caractérisée par la variabilité des scénarios. Ce fait, est lié à la fois à la matière première (coton, fibres synthétiques, fibres artificielles, laine, soie...), à la nature du produit (tissu chaîne et trame, tricot, ...) et aussi aux habitudes ménagères du consommateur. Ce dernier facteur étant difficilement mesurable, rend la modélisation de cette étape du cycle de vie du textile imprécise. En ce qui concerne le lavage, les facteurs touchés par cette variation sont principalement la fréquence du lavage, la composition et la quantité de lessive utilisée, la température de lavage et la quantité d'eau consommée (tableau 1.2).

Tableau 1.2. Habitudes de lavages des consommateurs dans cinq pays européens [12]

Habitudes de lavage	Grande Bretagne	Allemagne	France	Italie	Espagne
Pourcentage des lavages à					
< 40°C	4%	4%	30%	40%	87%
40°C	69%	69%	36%	23%	9%
50°C	9%	9%	4%	7%	1%
60°C	15%	15%	21%	24%	2%
> 70°C	3%	3%	9%	6%	1%
Pourcentages des consommateurs utilisant :					
Adoucissant	74%	46%	62%	67%	88%
Agents de blanchiment	2%	4%	14%	33%	49%
Prétraitement	11%	8%	14%	14%	14%
Prélavage	13%	18%	26%	31%	23%
Trempage et brossage	14%	13%	13%	39%	24%
Charge moyenne par machine (Kg)	2,8	2,8	2,8	3,3	-
Nombres de lavages par mois	26,4 (en machine) 0,6 (à la main)	12 (en machine) 0,6 (à la main)	14,4 (en machine) 0,4 (à la main)	15,8 (en machine) 3,2 (à la main)	19 (en machine) 1,6 (à la main)

L'utilisation dans son contexte durée de vie est également liée à la qualité de la production textile.

1.2.4 La valorisation en fin de vie

Le secteur du textile de l'habillement génère beaucoup de déchets tout au long de la fabrication des produits, de la production de la fibre (citons à titre d'exemple l'égrenage du coton qui génère une quantité de déchets jusqu'à presque trois fois la quantité de fibres obtenue [13]) jusqu'à la confection (15 à 25% du poids des tissus entrant dans une entreprise de confection en ressort comme déchet [14]). La consommation des produits finis est une

étape considérable du cycle de vie des textiles vu la quantité générée des produits en fin de vie. D'après l'ADEME, en France, en moyenne 17 kg dont 9 Kg de vêtements sont consommés par an et par habitant ce qui génère presque 600 000 tonnes/ an de déchets d'habillement [2]. Dès lors, la valorisation des produits en fin de vie est une filière en émergence qui attire aussi bien les associations caritatives (Emmaüs/Le Relais, Secours Populaire, La Croix Rouge...) que les entreprises privées (Minot Recyclage Textile,...). Les débouchés de la valorisation des déchets de l'habillement pourraient être classés en trois catégories :

- La réutilisation : 10 % des produits en fin de vie collectés sont vendus en friperie haut de gamme en France et 30 % sont exportés essentiellement en Afrique.
- Le recyclage : 30% des produits en fin de vie collectés sont recyclés dans le domaine de l'effilochage et de la cartonnerie ou valorisés en chiffons d'essuyage (15%) [15, 16].

Il a été prouvé que la réutilisation et le recyclage des vêtements permettent de réduire la consommation d'énergie due à la production à partir de matières premières vierges [17]. En effet, tenant compte de toutes les étapes du cycle de vie d'un vêtement (l'extraction des ressources, la fabrication du vêtement, la production de l'énergie, la distribution et l'élimination finale des déchets) il a été démontré que pour chaque kilogramme de coton vierge remplacé par des vêtements de seconde main, on réalise un gain d'environ 65 KWh et pour chaque kilogramme de polyester, un gain d'environ 90 KWh est réalisé. Par conséquent la réutilisation d'une tonne de vêtements en polyester consomme seulement 1,8% de l'énergie nécessaire pour sa production et la réutilisation d'une tonne de vêtements en coton consomme seulement 2,6% de l'énergie nécessaire pour sa production. Cette faible consommation est liée à la collecte, le tri et la distribution des vêtements de seconde main. Quant à la valorisation en chiffons d'essuyage des vêtements en coton, on a estimé un gain de 18 303 kWh/tonne en remplaçant les lingettes en papier par des lingettes en coton à partir des vêtements en fin de vie [17].

- La récupération de l'énergie à partir de l'incinération: dans ce cas le tee-shirt est considéré jeté dans les ordures ménagères ce qui contribue à une production moyenne de 1,819 mégawattheure (MWh) d'énergie primaire par tonne de déchets².

Bien que la valorisation des produits en fin de vie ne soit pas mise à mal par la variabilité des scénarios ni par la complexité de la logistique pour la collecte des déchets, la filière de valorisation fait face à d'autres contraintes. Il s'agit de l'effet de mode caractérisé par la montée en croissance des produits à bas prix et à basse qualité qui ne sont pas destinés à la réutilisation. En effet, « les acteurs de la filière redoutent que le réemploi d'une partie des déchets, sur le marché de l'export ou de la deuxième main, ne soit un débouché qui sature en raison de la concurrence de textiles neufs à bas prix » [16].

La conception des produits qui ne prend pas en compte cette étape du cycle de vie, favorise les mélanges de fibres qui ne sont pas valorisables pour l'effilochage (par exemple contenant l'élasthane) ou pour la récupération du polyester par exemple. Certains produits tels que les tee-shirts en coton imprimés ou teints avec des colorants très foncés et avec des colorants pigmentaires ne sont pas valorisés en chiffons d'essuyage car leur pouvoir absorbant est réduit [9].

La complexité de cette étape de la chaîne d'approvisionnement textile est aussi liée à l'incertitude dans le choix du scénario de valorisation en fin de vie et à l'évolution rapide de la recherche dans ce domaine (par exemple la dépolymérisation du polyester).

Compte tenu de nombreuses recherches en cours dans ce domaine des hypothèses précises sur les impacts liés à cette phase de vie devraient être disponibles dans quelques années.

1.2.5 Bilan sur la complexité

Finalement, la complexité de la filière textile est due à plusieurs facteurs, les principaux sont les suivants :

² L'enquête du cabinet (www.localconsult.com) a permis de collecter des données de 2004 à 2006 auprès de 70 collectivités et 75 usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) -sur un total de 130 interrogées- correspondant à 67% des tonnages incinérés en France (7,5 millions sur un total de 13 millions). Elle s'est également appuyée sur les données de 2006 de la base SINOE de l'Ademe.

- l'hétérogénéité de la filière : le secteur textile regroupe plusieurs industries (de la fabrication de la fibre jusqu'à la distribution du produit final).
- la diversité des scénarios possibles pour un même produit et ce au niveau des différentes étapes de son cycle de vie (à la production, à la distribution, à l'utilisation et à la valorisation de sa fin de vie).
- l'évolution rapide de l'aspect économique (changement des accords commerciaux internationaux), de l'aspect social (changement du comportement du consommateur) et de l'aspect technologique (émergence de nouveaux procédés textiles).

Tenant compte de l'interconnexion de plusieurs industries dans un même secteur du textile de l'habillement, de la diversité des scénarios de la chaîne d'approvisionnement et de l'étendue géographique de cette dernière, l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux est loin d'être un exercice simple. La section suivante illustre la multiplicité des outils d'évaluation de ces impacts.

1.3 Evolution des outils d'évaluation des impacts

Les outils d'amélioration de la conformité aux concepts du développement durable sont devenus très importants dans la gouvernance des entreprises et des collectivités. Néanmoins, ils représentent des initiatives volontaires et sont loin d'être homogénéisés dans leurs élaborations, et dans leurs applications. De l'évaluation des impacts à l'apparition des meilleures technologies disponibles, plusieurs outils ont été mis en place par les différents acteurs (ONU, ONGs, OIT, ISO, chercheurs, industriels, distributeurs...). Au fil de l'apparition de ces outils, une évolution est constatée au niveau des méthodes utilisées. En effet, les outils qualitatifs (normes, conventions, codes de conduite, audits, écolabels,...) sont simples d'utilisation mais présentent plusieurs déficiences pour l'exploitation de leurs résultats. Citons par exemple : la comparaison de deux tee-shirts portant une information environnementale montrant le respect de certaines conditions de production (matière bio, recyclage...) ne permet pas de savoir lequel engendre moins d'impacts environnementaux. Quant aux outils quantitatifs (Analyse du Cycle de Vie, Bilan Carbone...), qui sont plus compliqués et parfois pas assez complets, ils fournissent une information scientifique plus

exploitable dans la cadre d'une prise de décision complexe. Dans ce qui suit, ces outils sont classés par rapport à l'aspect évalué, à savoir l'aspect social et l'aspect environnemental.

1.3.1 Aspect social

L'aspect social qui est un des trois piliers du développement durable, a aussi suscité l'intérêt des acteurs qui ont cherché à élaborer plusieurs outils d'évaluation.

1.3.1.1 Les conventions de l'OIT

L'Organisation Internationale du Travail (OIT), tenant compte des obligations de l'Organisation des Nations unies (ONU) en matière de droits de l'homme, a adopté une liste de six conventions en 1919 concernant la durée du travail en industrie, le chômage, la protection de la maternité, le travail de nuit pour les femmes et les enfants, et l'âge minimum de travail. La liste a ensuite augmenté au fil des années jusqu'à la convention N°188 concernant le travail dans la pêche qui a été adoptée en 2007. Les normes internationales du travail sont étayées par un système de contrôle unique au niveau international qui contribue à garantir que les États appliquent les conventions qu'ils ratifient. L'OIT examine régulièrement comment elles sont appliquées et signale les domaines dans lesquels il y aurait matière à amélioration³.

1.3.1.2 Les normes de responsabilité sociale

Des normes de responsabilité sociale ont été établies telle que la norme SA8000 qui est fondée sur le respect des droits fondamentaux des travailleurs. Développée en 1997 par l'organisation nord-américaine Social Accountability International (SAI)⁴, appelée précédemment Council of Economic Priorities (CEP), elle se base sur les conventions de l'Organisation internationale du travail (OIT) ainsi que sur d'autres codes internationaux portant sur divers domaines: travail des mineurs, santé, sécurité, liberté d'association, droit à la négociation collective, non discrimination, conditions de travail et de rémunération et systèmes de gestion en matière sociale. La certification des entreprises est accompagnée par des audits extérieurs afin de garantir la bonne conduite selon les principes de la norme. Cependant, le contenu est trop général et il n'y a pas d'indications sur les mécanismes de

³ www.ilo.org

⁴ www.sa-intl.org

vérification.

En 1999, une ONG britannique (Institute for Social and Ethical AccountAbility) spécialisée dans la responsabilité sociale et éthique a élaboré la norme AA1000 (AccountAbility 1000)⁵. Cette dernière n'impose pas de standards dérivés de conventions internationales mais elle offre un cadre de référence (ou *benchmark*) pour que l'entreprise ou l'organisation puisse définir ses propres valeurs et objectifs en matière de performance sociale et éthique, et amorcer un dialogue avec ses parties prenantes.

A l'échelle mondiale, en 2001, l'ISO/COPOLCO (Consumer POLicy COMmittee) a identifié le besoin d'élaborer une norme de responsabilité sociale. En coopération avec l'ONU, l'OIT, et l'OCDE, la norme ISO 26000 qui est la première norme internationale de lignes directrices sur la responsabilité sociétale des organisations a été publiée le 1^{er} novembre 2010.

En France, la norme française SD 21000 concernant la responsabilité sociétale et développement durable, n'a été mise en œuvre que pour des petites entreprises.

1.3.1.3 Audits, codes de conduite et labels

A ces normes, s'ajoutent les codes de conduites et les audits sociaux élaborés soit par les parties prenantes selon leurs propres objectifs [18], soit par des organismes tels que les ONGs, citons par exemple Yamana⁶.

Dans le cadre de l'émergence de ces outils, plusieurs labels ont été élaborés afin de garantir aux consommateurs, le respect des bonnes conditions sociales des travailleurs. Parmi ces labels le « Fairtrade⁷ » ou commerce équitable contribue au développement durable en proposant de meilleures conditions commerciales aux producteurs marginalisés, spécialement dans le Sud, et en garantissant leurs droits. Ce label, défini en 2001 par FINE regroupant les quatre coordinations internationales de commerce équitable FLO, WFTO appelée précédemment IFAT⁸, NEWS et EFTA à destination du consommateur, représente un outil de

⁵ www.accountability21.net

⁶ <http://www.fibrecitoyenne.org/>

⁷ <http://www.fairtrade.net/standards.html>

⁸ <http://www.wfto.com>

vérification de l'engagement du producteur ou du distributeur dans la politique du développement durable.

Ces outils, représentent des initiatives permettant l'intégration des principes du développement durable dans la gouvernance des organisations. Néanmoins, ils présentent des faiblesses tels le que le manque de précision et l'absence ou la défaillance des techniques de vérification de leurs bonnes applications. Afin d'améliorer l'évaluation des impacts sociaux, plusieurs auteurs ont proposé l'élaboration d'ACV sociale [19], [20].

1.3.2 Aspect environnemental

1.3.2.1 Ecolabels

Elaborés par les organisations internationales, les associations du réseau mondial d'étiquetage écologique, les ONG, ou même par les démarches d'entreprises, les ecolabels garantissent à la fois la qualité de l'utilisation du produit et ses caractéristiques écologiques, car ils informent le consommateur sur la qualité des matières premières, la recyclabilité, la consommation d'énergie, et d'autres aspects relatifs aux impacts environnementaux. Il existe des ecolabels monocritères tel que Öko-Tex 100 qui garantit l'innocuité du produit final. D'autres ecolabels couvrent seulement une partie du cycle de vie du produit tel que Öko-Tex 1000 qui garantit le respect de l'environnement pendant la production. Arrivant aux ecolabels multicritères couvrant le cycle de vie entier du produit tel que l'écolabel européen, la fleur, et l'écolabel nordique, on recense 62 labels utilisables dans le domaine du textile à l'échelle internationale [21, 22].

1.3.2.2 Normes

Quant aux normes, leur développement et leur application pratique sont gérés par l'ISO et peuvent être classées selon deux approches.

La première concerne le management environnemental au niveau organisme [23] et comprend les normes:

- ISO 14001 (2004) : Système de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation.

- ISO 14004 (dernière édition parue en 2010) : Système de management environnemental – Lignes directrices générales concernant les principes, les systèmes et les techniques de mise en œuvre.
- ISO 14015 (dernière édition parue en 2010) : Management environnemental - Évaluation environnementale de sites et d'organismes (EESO).
- La série ISO 14031 (2000) : Management environnemental - Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices.
- ISO/TR 14063 (dernière édition parue en 2010) : Management environnemental - Communication environnementale - Lignes directrices et exemples.

La deuxième approche concerne le management environnemental au niveau produit [24] et comprend :

- L'étiquetage environnemental décrit par la norme ISO 14020 (2002) : Etiquettes et déclarations environnementales - Principes généraux. Il y a trois types d'étiquetage environnemental. Le type I est décrit par la norme ISO 14024 (2001) qui établit les principes et les méthodes pour la mise au point de programme qui engage une tierce partie et porte sur l'utilisation et l'attribution des labels environnementaux sur les produits. Le type II (autodéclarations environnementales) est décrit par la norme ISO 14021 (2001) qui propose des termes à utiliser pour la déclaration des caractéristiques environnementales de produits. Le type III décrit par la norme ISO 14025 (dernière édition parue en 2010) concerne les principes et les procédures de développement de déclarations environnementales de type III. Ces déclarations environnementales fournissent des données environnementales quantifiées à l'aide de paramètres prédéterminés fondés sur les normes ISO 14040 et ISO 14044 relatives à l'ACV et, s'il y a lieu, complétés par d'autres informations environnementales additionnelles quantitatives ou qualitatives.
- L'éco-conception décrite par la norme ISO/TR 14062 : Management environnemental - Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit.

- L'analyse du cycle de vie décrite par les normes ISO 14040 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – principes et cadres et ISO 14044 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices.

Les écolabels et les normes concernant le cycle de vie entier, ont été élaborés en tenant en compte plusieurs critères afin de diminuer les impacts environnementaux à travers la chaîne d'approvisionnement de la production de matières premières à la gestion de la fin de vie. La qualité du produit a été incluse également dans la détermination des critères (telle que la stabilité dimensionnelle, la solidité des teintures ...) [25, 26, 27, 28].

1.3.2.3 Outils qualitatifs et quantitatifs d'évaluation environnementale

Dans le cadre de l'amélioration de l'aspect environnemental, l'éco-conception peut être une démarche sélective en tenant en compte un ou plusieurs critères en particulier, ou une démarche exhaustive en tenant en compte tous les critères définis. Elle est basée sur les résultats des méthodes d'évaluations qui ont été recensées dans plusieurs ouvrages [29, 30] [31]. Ces outils varient du monocritère qualitatif telles que les check-lists [32], au monocritère quantitatif tel que la mesure de la consommation énergétique, au multicritère qualitatif tel que l'évaluation simplifiée qualitative du cycle de vie ESQCV [32] jusqu'au multicritère quantitatif tel que l'ACV. Certes, les organismes intégrant cette démarche obtiennent des résultats encourageants [33, 4, 34]. Cependant, une gestion du changement organisationnel s'avère être nécessaire notamment pour les PME [35].

Parmi les outils quantitatifs, en France, le Bilan Carbone permet d'évaluer, en ordre de grandeur, les émissions des gaz à effet de serre engendrées par l'ensemble des processus physiques qui sont nécessaires à l'existence d'une activité ou organisation humaine, dès lors qu'il est possible de lui assigner des frontières claires [36, 37].

1.3.2.4 Obligations réglementaires

Ces outils et normes, cités précédemment, constituent des démarches volontaires des industriels environnementalement responsables. En ce qui concerne les obligations réglementaires, le règlement REACH (enRegistrement, Evaluation et Autorisation des substances CHimiques) en fait partie. Entré en vigueur le 1^{er} juin 2007, il vise les substances en tant que telles, ainsi que celles présentes dans les préparations ou dans les articles [38]. Il

couvre le contrôle de la fabrication, de l'importation, de la mise sur le marché et de l'utilisation des substances chimiques. L'affichage environnemental est aussi un témoin de l'évolution des outils au niveau de l'aspect réglementaire. En effet, la Loi Grenelle Environnement II, votée le 11 mai 2010, prévoit la mise en place progressive de l'affichage environnemental des produits et services à compter de juillet 2011 via un référentiel commun entre les entreprises de plusieurs filières dont l'habillement.

1.4 L'analyse du cycle de vie (ACV)

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil de bilan global qui permet le recensement des différents flux de matières, de ressources et d'émissions tout au long du cycle de vie « du berceau à la tombe » d'un produit⁹. Durant presque deux décennies, la méthodologie de l'ACV a bien été développée et ses principes ont été précisés [39, 40, 41, 42, 43, 44]. Cependant, l'interprétation des résultats de l'analyse des impacts du cycle de vie appelée aussi AICV est assez compliquée quand il s'agit de comparer des scénarios de cycle de vie et d'autant plus quand il faut choisir la meilleure alternative.

L'ACV, permet d'identifier le problème de transfert de pollution engendré par le fait d'augmenter d'autres impacts environnementaux à d'autres endroits du cycle de vie en apportant une amélioration au niveau d'impacts en un certain point comme le montre la figure 1.2 ci-dessous.

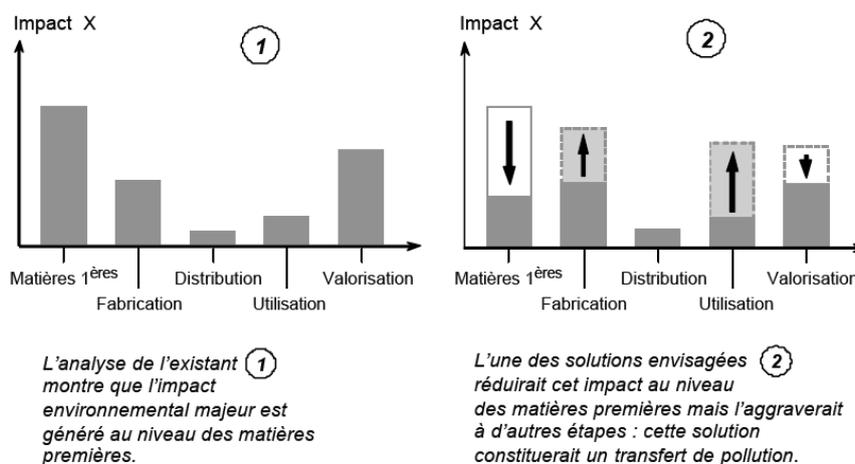


Figure 1.2. Le problème de transfert de pollution [45]

Par exemple, l'Acide PolyLactique (PLA) permet de réduire l'impact sur le réchauffement climatique par rapport au polymère issu de ressources pétrolières (polypropylène). Par contre, le PLA a un fort impact sur l'eutrophisation [46].

⁹ Tout au long de cette partie, on entend dire par « Produit » un produit, un service ou un système.

L'ACV est alors un outil de vérification et de validation de l'efficacité des solutions apportées pour réduire les impacts environnementaux. De plus, plusieurs applications de l'ACV sont possibles [47].

Compte tenu des incertitudes par exemple sur les hypothèses de recyclabilité, les nouveaux procédés, l'évolution de la réglementation et l'épuisement des ressources, l'ACV est un outil susceptible d'amélioration. L'historique de son développement, a montré au fil du temps l'évolution de cet outil. Le recadrage de l'ACV a été proposé pour prendre en compte non seulement l'analyse scientifique mais aussi le jugement de valeur puisque l'ACV est plus un outil de gestion de l'information qu'un outil des sciences dures [48]. Si bien que la mise à jour du premier guide sur l'ACV était nécessaire en 2002 [49]. Il a été publié par le Centre des Sciences Environnementales de l'Université de Leiden (CML) [50] et basé sur le travail mutuel de la SETAC, l'ISO et l'UNEP. La norme internationale ISO 14040 reconnaît que l'ACV est encore à une phase précoce de développement et que certaines phases telles que l'évaluation de l'impact en sont encore à leurs débuts [24].

En ce qui concerne les méthodes de calcul des impacts environnementaux, l'incertitude sur les hypothèses de classification et de caractérisation des facteurs d'impacts est une origine de l'évolution de l'ACV [51, 52, 53].

1.4.1 Définitions et principes

L'ISO 14040 a défini l'Analyse du Cycle de Vie comme étant une technique d'évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à un produit, par :

- compilation d'un inventaire des entrants et des sortants pertinents d'un système de produit ;
- évaluation des impacts environnementaux potentiels associés à ces entrants et à ces sortants ;
- interprétation des résultats des phases d'analyse de l'inventaire et d'évaluation d'impact par rapport aux objectifs de l'étude.

La norme internationale ISO 14040 a aussi listé les utilisations de l'ACV pour :

- l'identification des possibilités d'amélioration des aspects environnementaux des produits à différents stades de leur cycle de vie ;
- la prise de décision dans l'industrie et les organismes gouvernementaux ou non gouvernementaux, par exemple : la planification stratégique, l'établissement des priorités, l'éco-conception de produit ou de procédé ;
- le choix d'indicateurs de performance environnementale pertinents, y compris les techniques de mesure ;
- la mercatique, par exemple une assertion en matière d'environnement, un système d'étiquetage écologique ou une déclaration environnementale relative à un produit.

L'ACV doit comprendre cinq phases comme le montre la figure 1.3 et comme détaillent les sections 1.4.1.1, 1.4.1.2 et 1.4.1.3 suivantes.

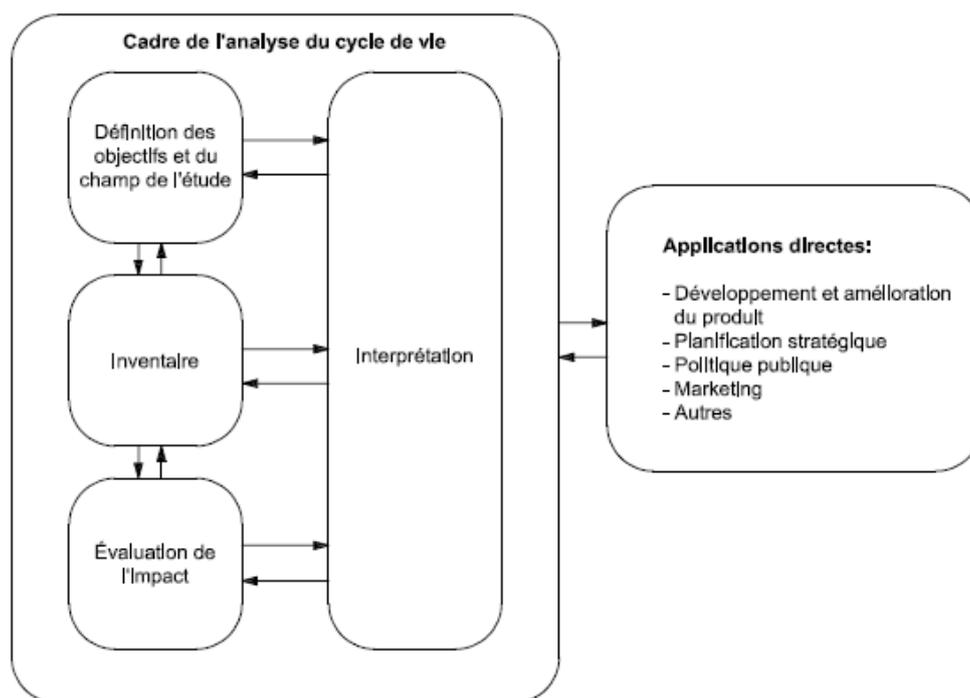


Figure 1.3. Phases d'une ACV [44]

Les résultats d'une ACV peuvent constituer une information utile pour un grand nombre de processus de décision. Les applications d'une ACV telles que les exemples énumérés à la figure 1.3 se situent en dehors du domaine d'application de la norme ISO 14040.

1.4.1.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'unité fonctionnelle : la compilation de l'inventaire et l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit doivent être en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie dans un cadre temporel bien défini. Par exemple, pour évaluer les impacts environnementaux d'un blouson par la méthode d'ACV, on évalue la fonction « porter un blouson en bon état pendant deux ans » ce qu'on appelle l'*unité fonctionnelle* (UF) ou unité de fonction. Cette unité est la grandeur quantifiant la fonction du produit et du service offert. Lors d'une étude comparative, il est essentiel de comparer les produits sur la base d'une même unité fonctionnelle. Par conséquent, seules les alternatives remplissant une fonction équivalente peuvent être comparées.

Revenant à l'exemple de l'ACV d'un blouson, les scénarios, représentant les différentes alternatives étudiées, peuvent être « un blouson en tissu extérieur en coton (CO) », « un blouson en tissu extérieur en polyester (PES) » et « un blouson en tissu extérieur 50/50 CO/PES ». Outre la détermination de l'unité fonctionnelle, la fonction du produit doit être clairement définie car elle sert de base pour la détermination des limites du système. Par exemple, si la fonction principale d'un blouson d'hiver est la protection contre le froid alors que la fonction principale du blouson du pompier est la protection contre le feu, ces deux blousons ne sont pas comparables car ne remplissent pas la même fonction sur laquelle la détermination de l'unité fonctionnelle a été basée.

- Le flux de référence : cette unité fonctionnelle permet aussi la mesure des *flux de référence* qui représentent les quantités de produit nécessaires pour remplir cette fonction. Ces flux doivent être quantifiés et peuvent varier d'un scénario à l'autre. Par exemple, si la durée de vie d'un blouson de basse qualité est de 1 an alors il faut compter 2 blousons pour le flux de référence correspondant à l'UF « porter un blouson en bon état pendant deux ans ». Par contre si le blouson est de très bonne qualité et si sa durée de vie est de 4 ans alors il faut compter 0,5 blouson pour le flux de référence. Ces deux blousons constituent deux scénarios différents.

L'unité fonctionnelle est un choix crucial dans l'ACV. L'exemple du pop-corn comme matériau d'emballage en fait preuve. [54] a montré que si on compare le remplissage pour l'emballage par du pop-corn et par du polystyrène rapportés d'une part au Kg de matériau et d'autre part au m³ de matériau, les résultats en terme d'impacts environnementaux s'inversent car le pop-corn est 4,6 fois plus dense.

- Les frontières du système et les processus élémentaires : une fois que l'objectif de l'étude et l'unité fonctionnelle sont clairement définis, *les frontières du système* doivent être bien déterminées afin de modéliser les processus qui doivent être inclus dans l'ACV. Ces *processus élémentaires* constituent les différentes étapes du cycle de vie à savoir les procédés de fabrication (extraction de matières premières, production de fibres, filature, tissage, ennoblement, confection et conditionnement), la distribution et le transport, l'utilisation et l'entretien des produits (lavage, séchage et repassage), l'élimination des déchets de production et des produits, la valorisation des produits usés (y compris la réutilisation, le recyclage et la récupération de l'énergie). Les processus de production de carburants et d'énergie (électrique et thermique) ainsi que la fabrication de matériaux secondaires utilisés dans les différentes étapes du cycle de vie sont aussi inclus dans les limites du système étudié par l'ACV. Les opérations supplémentaires liées à l'évaluation des impacts potentiels tels que le chauffage, l'éclairage, etc. sont aussi modélisées. Un processus élémentaire qui n'a pas d'impacts significatifs peut être éliminé si la somme de toutes les matières incluses ne dépasse pas 1% de la masse du flux pour le système ou s'il consomme moins de 1% du besoin énergétique du système.

1.4.1.2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Le recensement et la quantification des entrants et des sortants de chaque processus élémentaire selon le flux de référence constituent l'étape de l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV). Il s'agit, donc, de l'inventaire des flux élémentaires (d'énergie et de matière) et des émissions (polluants, déchets, rejets d'eau, etc.).

Le problème d'affectation : certains processus de la phase principale de fabrication, des produits qui ne constituent pas le flux de référence font partie des sortants. Par exemple dans la culture du coton qui est un processus élémentaire dans une ACV d'un produit en coton, outre les émissions de polluants, les déchets et les fibres (flux de référence), on obtient les graines de coton qui sont actuellement bien valorisées et ne peuvent pas être considérées comme des déchets [9, 55]. Selon les données du département américain de l'agriculture de décembre 2008, la production d'huile de coton se serait classée au cinquième rang des huiles végétales produites en terme de volume sur la campagne 2007/2008 avec un peu moins de 4% de la production mondiale [56]. Les graines constituent alors un coproduit qui ne fait pas partie du flux de référence et nécessite la modélisation d'un système différent qui aboutit à

une ACV différente. En effet, ce problème est appelé *affectation* ou *imputation* ou encore « allocation » en anglais. Pour modéliser l'affectation, il faut établir des relations physiques ou économiques entre le produit du flux de référence et le coproduit.

La suppression de flux ou de processus élémentaires: en ACV, pour des raisons de simplification ou même par manque d'information, on peut éliminer certains flux élémentaires qui n'ont pas d'impacts significatifs sur les résultats. Pour cela, la décision doit être justifiée relativement à la masse si le produit éliminé ne dépasse pas 5% de la masse des entrants du processus élémentaire et si la masse de toutes les matières incluses est supérieure à 99% de la masse des entrants du système. Par exemple, le fil à coudre d'un tee-shirt pèse 10 g alors que le tricot pèse au moins 266 g. Le ratio est inférieur à 5% ce qui permet d'éliminer la prise en compte du fil à coudre dans les entrants du processus de confection. Cette règle de décision doit être complétée par la vérification que la matière éliminée ne consomme pas d'avantage d'énergie que d'autres (moins de 1% du besoin énergétique du système). Pour valider la décision, une règle relative à la pertinence environnementale doit être suivie. Il s'agit de vérifier que la contribution des émissions dues à la matière ou au processus éliminé(e) ne dépasse pas 10% des catégories d'impacts potentiels du système.

L'inventaire du cycle de vie nécessite le recueil d'une grande quantité de données qui n'est pas une tâche facile dans la réalisation d'une ACV. Les données qui peuvent être utilisées sont de différentes catégories : mesurées, calculées ou estimées, et peuvent être collectées à partir de différentes sources. Cependant, dans la filière textile, on fait face à plusieurs contraintes : l'indisponibilité, la variabilité et l'incertitude des données.

1.4.1.2.1. *Evaluation de la qualité des données de l'ICV*

L'évaluation de la qualité des données pour l'ICV est une étape importante pour l'ACV. Pour ce faire, deux méthodes sont possibles : une méthode qualitative selon des indicateurs et une méthode quantitative en calculant l'incertitude sur les données.

La méthode qualitative : elle consiste en une vérification de différents critères comme la fiabilité, l'exhaustivité et les corrélations temporelle, géographique et technologique, selon les scores des indicateurs de qualité des données (DQI) comme le montre le tableau 1.3 ci-dessous.

Tableau 1.3. Matrice d'évaluation de la qualité des données [57]

Indicateur	1	2	3	4	5
Fiabilité	Données non vérifiées basées sur des mesures	Données vérifiées partiellement basées sur des hypothèses Ou données non vérifiées basées sur des mesures	Données non vérifiées partiellement basées sur des hypothèses	Estimation qualifiée (par exemple par un expert industriel)	Estimation non qualifiée
Exhaustivité	Données représentatives d'un nombre suffisant de sites sur une période suffisante pour ajuster les variations normales	Données représentatives d'un plus petit nombre de sites, mais pour une période suffisante	Données représentatives d'un nombre suffisant de sites, mais pour une période plus courte	Données représentatives d'un plus petit nombre de sites et pour une période plus courte Ou données incomplètes à partir d'un nombre suffisant de sites pour une période suffisante	Représentativité inconnue des données Ou données incomplètes d'un plus petit nombre de sites et/ ou pour une période plus courte
Corrélation temporelle	Moins de 3 ans de différence de l'année de l'étude	Moins de 6 ans de différence de l'année de l'étude	Moins de 10 ans de différence de l'année de l'étude	Moins de 15 ans de différence de l'année de l'étude	Age de données inconnu Ou plus de 15 ans de différence de l'année de l'étude
Corrélation géographique	Données de la zone de l'étude	Données moyennes d'une zone plus grande incluant la zone de l'étude	Données d'une zone avec des conditions de production similaires	Données d'une zone avec des conditions de production peu similaires	Données d'une zone inconnue Ou données d'une zone avec des conditions de production différentes
Corrélation technologique	Données des entreprises, procédés et matières de l'étude	Données des procédés et matières de l'étude mais d'entreprises différentes	Données des procédés et matières de l'étude mais d'une technologie différente	Données des procédés et matières proches de ceux de l'étude mais de la même technologie	Données des procédés et matières proches de ceux de l'étude mais d'une technologie différente

Par exemple, la rapidité de l'évolution technologique affecte la fiabilité des données disponibles. Dans l'industrie textile, la vitesse du changement est supposée être plus de dix ans [58]. L'évaluation qualitative de la qualité des données est également recommandée par la norme ISO 14040 [44] et illustrée dans l'ISO / TR14049 comme le montre la figure 1.4 [59].

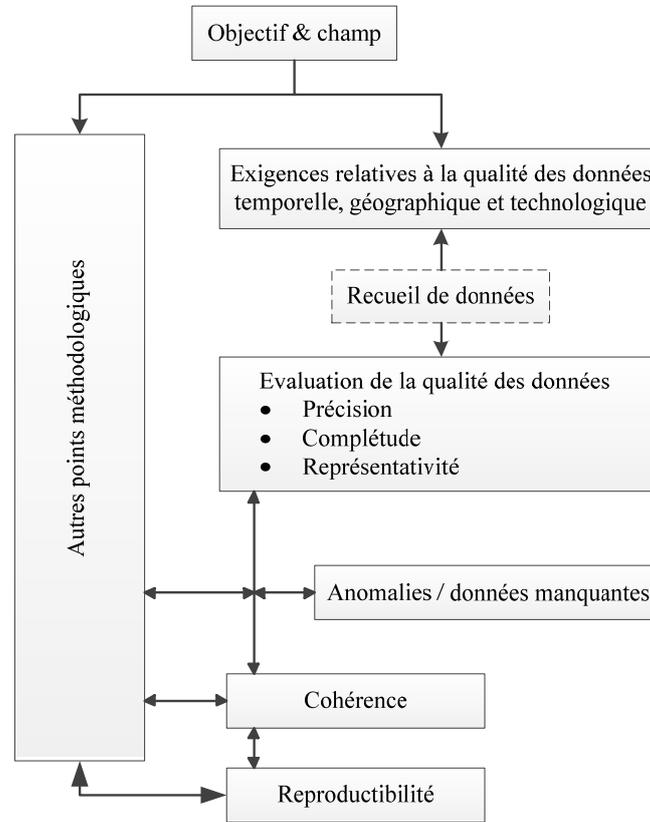


Figure 1.4. Aperçu de la réalisation d'une évaluation de la qualité des données: norme ISO / TR14049 [59]

- La méthode quantitative : pour l'évaluation de la qualité des données, la variabilité et l'incertitude des paramètres d'entrées / sorties de données telles que les incertitudes lors des prises de mesures et les variations temporelles sont calculées. Le tableau 1.4 ci-dessous est un exemple de calcul des facteurs d'incertitude utilisé dans le cadre du projet d'élaboration de la base de données Ecoinvent v1.1. La variance (avec un intervalle de confiance de 95%) de la valeur considérée est alors calculée sur la base de l'équation suivante :

$$SD_{95} := \sigma_g^2$$

$$= \exp^{\sqrt{[ln(U_1)]^2 + [ln(U_2)]^2 + [ln(U_3)]^2 + [ln(U_4)]^2 + [ln(U_5)]^2 + [ln(U_6)]^2 + [ln(U_7)]^2}}$$

Avec U_1 incertitude sur la fiabilité, U_2 incertitude sur l'exhaustivité, U_3 incertitude sur la corrélation temporelle, U_4 incertitude sur la corrélation géographique, U_5 incertitude sur la corrélation technologique, U_6 incertitude sur la taille de l'échantillon et U_b facteur d'incertitude de base.

Les facteurs d'incertitude sont basés sur des jugements d'experts. Les estimations d'incertitude sont obtenues sans dimensions au niveau du processus unitaire. Une fois l'incertitude sur une donnée individuelle déterminée, ces incertitudes individuelles sont ensuite combinées avec les données d'autres processus unitaires à l'aide des méthodes statistiques du type Monte-Carlo.

Tableau 1.4. Les facteurs d'incertitude par défaut (sans dimension, contribuant à la variance) appliqués à la matrice de qualité [60]

Indicateur	1	2	3	4	5
Fiabilité	1.00	1.05	1.10	1.20	1.50
Complétude	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20
Corrélation temporelle	1.00	1.03	1.10	1.20	1.50
Corrélation géographique	1.00	1.01	1.02	-	1.10
Corrélation technologique	1.00	-	1.20	1.50	2.00
Taille de l'échantillon	1.00	1.02	1.05	1.10	1.20

L'évaluation de la qualité des données dans une perspective qualitative et / ou de manière quantitative est une étape importante qui garantit la fiabilité des résultats dans les études ACV. En outre, il existe une stratégie de collecte de données qui réduit l'incertitude sur LCI [61].

Pour évaluer la fiabilité des résultats de l'ACV à l'égard de la qualité des données d'entrées / sorties, l'analyse de sensibilité est aussi recommandée. Dans l'analyse de sensibilité, les variations de données (et d'autres variables comme modèle de processus) sont introduits pour évaluer la robustesse des résultats face à ces variations [44, 59, 49]. Dans l'analyse de l'incertitude, des données empiriques sur les marges d'incertitude des données spécifiques sont utilisées pour calculer la marge d'erreur totale des résultats [49].

1.4.1.3. *Evaluation des impacts du cycle de vie*

L'Analyse des Impacts du Cycle de Vie (AICV), appelée en anglais « Life Cycle Impact Assessment (LCIA), est la troisième phase de l'ACV et celle qui aboutit au profil d'évaluation de l'impact environnemental engendré par le système modélisé lors des précédentes étapes. Elle est constituée de trois étapes obligatoires à savoir :

- a) La sélection des catégories qui consiste à choisir les *catégories d'impact* (telles que le changement climatique, l'épuisement des ressources, la santé humaine, la biodiversité, etc.), les *indicateurs de catégorie* (par exemple les gaz à effet de serre pour la catégorie d'impact du réchauffement climatique) et les *modèles de caractérisation* (les méthodes d'évaluation des impacts¹⁰ telles que CML2001 [49], EDIP2003 [62, 63, 64], Eco-indicateur 99 [65], etc.). Des exemples d'illustration de cette étape sont donnés dans la norme internationale ISO/TR 14047 [66].
- b) La classification qui consiste à affecter les résultats de l'inventaire du cycle de vie en classant les émissions quantifiées à l'étape d'ICV dans les catégories d'impacts correspondants (par exemple les gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, NO, etc) dans la catégorie d'impact du réchauffement climatique). L'affectation de certains résultats de l'ICV peut être unique (un sortant est classé dans une seule catégorie d'impact), parallèle (un sortant est classé dans deux catégories d'impacts par exemple le SO₂ est affecté à la catégorie d'impact de la santé humaine et à celle de l'acidification) ou en série (un sortant peut être classé dans plusieurs catégories d'impacts, par exemple le NO_x peut être affecté à la formation d'ozone au niveau du sol et à l'acidification).
- c) La caractérisation qui consiste à calculer les résultats d'indicateur de catégorie. Il s'agit de convertir les résultats de l'analyse de l'ICV en unités communes par l'agrégation des indicateurs. Par exemple le réchauffement climatique exprimé en équivalent CO₂ est la somme de tous les gaz à effet de serre agrégés selon les *facteurs de caractérisation*¹¹ de chacun selon le modèle de caractérisation de la méthode CML2001 [49].comme suivant :

¹⁰ Les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie sont listées et quelques unes sont brièvement décrites en annexe 2

¹¹ Des facteurs de caractérisation de certains indicateurs de catégories d'impact sont listés en annexe 1

$$(x \text{ kg } CO_2 \times 1) + (y \text{ kg } CH_4 \times 25) + (z \text{ kg } NO \times 298) + \dots$$

L'approche de calcul des impacts du cycle de vie est basée sur l'agrégation des indicateurs et la présentation des catégories d'impacts à deux niveaux comme le montre la figure 1.5:

- les « midpoints » qui constituent l'ensemble des catégories d'impacts (réchauffement climatique, Ecotoxicité terrestre, aquatique et marine, acidification, appauvrissement de la couche d'ozone, etc. Par exemple l'émission de CO₂ (cf. annexe 1) est caractérisée à un niveau « midpoint » dans la catégorie du potentiel de réchauffement climatique à un facteur égal à 1 dans la méthode CML2001 (cf. annexe 2).
- les « endpoints » qui regroupent les catégories d'impacts engendrant des effets sur un même aspect. Revenons à l'exemple de l'émission de CO₂ pour montrer la différence entre les deux niveaux d'évaluation. Dans une approche « endpoint » comme dans la méthode Eco-indicator 99 par exemple, cette catégorie est caractérisée dans les dommages à la santé humaine engendrés par le réchauffement climatique (cf annexe 2) à un facteur équivalent à 0,00000021 DALY¹² pour 1 Kg de CO₂. Elle est aussi regroupée avec d'autres catégories comme l'appauvrissement de la couche d'ozone, les effets de la radiation etc. Le passage du niveau « midpoints » au niveau « endpoints » fait face à la contrainte d'incertitude dans la classification et la caractérisation des indicateurs [67].

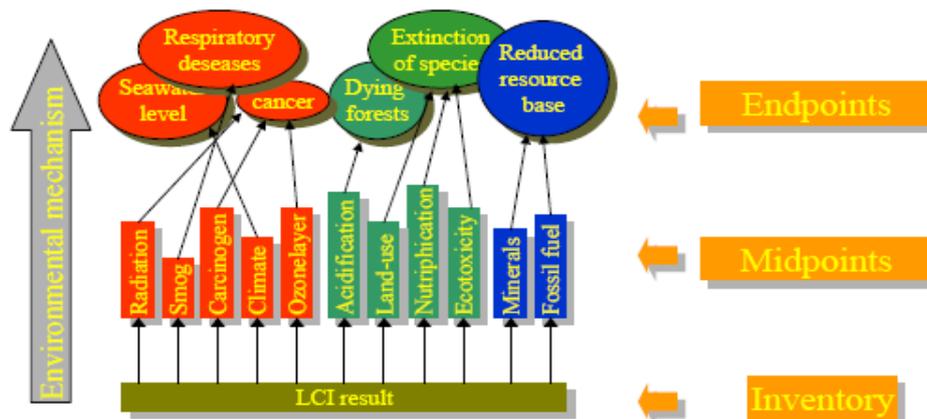


Figure 1.5. Structure d'une méthode d'évaluation d'impacts [68]

¹² Disability Adjusted Life Years (DALY) : Années de vie ajustées sur l'incapacité qui consiste à déterminer la somme des années de vie potentielle perdues en raison d'une mortalité prématurée et des années de vie productives perdues en raison d'incapacités.

Les méthodes d'AICV sont basées sur des approches qui se ressemblent en terme de choix des catégories d'impacts mais qui se différencient par les niveaux d'évaluation (midpoints, endpoints) et parfois par les facteurs de caractérisation (cf. 3.3.2.3).

Le tableau 1.5 liste les méthodes d'AICV, actuellement utilisées par les praticiens de l'ACV, en montrant les similarités et les différences en termes de catégories d'impacts et du niveau de leur évaluation (midpoints, endpoints) [69]. Les méthodes d'AICV CML2001, EDIP1997 et Eco-indicateur 99 ont été aussi comparées [70].

Tableau 1.5. Les méthodes d'analyse des impacts du cycle de vie [69]

	Autres	Consommation de ressources	Utilisation des terres	Eutrophisation aquatique	Eutrophisation terrestre	Acidification	Formation de l'ozone	Ecotoxicité	Rayonnements ionisants	Toxicité humaine	Inorganiques respiratoires	Déplétion de l'ozone	Changement climatique
CML 2002¹³		M	o	M	M	M	M	O	o	M		o	o
Eco-indicator 99		E	E		E	E	E		o	o	E	E	E
EDIP 2003/ EDIP 97¹⁴	Environnement de travail, bruit routier	M		M	M	M	M	M	o	M	o	M	o
EPS 2000		E	E	o	o	O	E	E	o	E	E	E	E
IMPACT 2002+		E	o	E		E	E	M	o	M	E	o	o

¹³ Ici la méthode CML 2001 est appelée CML 2002 se référant au guide de la méthode publié en 2002 [49]

¹⁴ EDIP 97 pour les ressources et EDIP 2003 pour les autres catégories d'impacts

1.4 L'analyse du cycle de vie (ACV)

	Changement climatique	Déplétion de l'ozone	Inorganiques respiratoires	Toxicité humaine	Rayonnements ionisants	Ecotoxicité	Formation de l'ozone	Acidification	Eutrophisation terrestre	Eutrophisation aquatique	Utilisation des terres	Consommation de ressources	Autres
LIME	E	E	M	E		O	M E	M E	o	E	E	E	Air intérieur
LUCAS	o	o		o		O	o	o	o	o	o	o	
MEEuP	o	o	M	M		M	M	M	M	M		water	
ReCiPe	M E	E	M E	M E	o	M E	M E	M E	o	M E	M E	E	
Swiss Ecoscarcity 07	o	o	o	o	M E	M	o	o	o	o	M E	water	Perturbateurs endocriniens
TRACI	o	o	M	M		M	M	M	o	M		o	

o : disponible dans la méthode mais pas d'investigation approfondie

M : modèle midpoint disponible et analysé

E : modèle endpoint disponible et analysé

L'Analyse des Impacts du Cycle de Vie (AICV) comprend aussi des étapes facultatives qui consistent à :

- Calculer l'importance des résultats d'indicateur de catégorie par rapport à une information de référence, ce qu'on appelle normation ou aussi normalisation dans la norme ISO 14040. Il s'agit de transformer le résultat d'indicateur en le divisant par une valeur de référence choisie. Cette valeur peut être par exemple un scénario de référence ou des émissions ou utilisations de ressources totales pour une zone donnée ;
- trier et éventuellement classer par ordre de priorité des catégories d'impacts, ce qu'on appelle le groupement ;
- agréger les résultats avec des facteurs de pondération déterminés, ce qu'on appelle la pondération ;
- analyser la qualité de données en vérifiant la robustesse des résultats de l'AICV par rapport à l'incertitude des données de l'ICV. Cette évaluation de la qualité des données est différente des méthodes décrites précédemment en 1.4.1.2.1. Il s'agit de l'analyse de sensibilité.

1.4.2 Les logiciels d'ACV

L'utilisation de ces méthodes est de nos jours simplifiée par l'utilisation de logiciels intégrant les modèles de caractérisations ainsi que des bases de données pour l'ICV. Plusieurs auteurs ont déjà énuméré et analysé les logiciels d'ACV disponibles [71, 29, 72].

Pour réaliser ces travaux, le choix du logiciel GaBi 4 [73] a été fait car il intègre une base de données comprenant les principaux procédés de l'ennoblissement et de la fabrication des produits chimiques utilisés dans ces procédés. Soit au total 125 procédés couvrant les prétraitements (procédés à sec, comme le flambage ou des procédés humides, comme le désencollage, le blanchiment, le débouillissage, etc.), la teinture et l'impression en utilisant plusieurs colorants (les colorants acides, cationiques, directs, dispersés et réactifs), les apprêts et les procédés de fabrication de quelques tissus. Ce qui constitue la base de données la plus complète en la comparant aux bases de données disponibles comme le montre le tableau 1.6 suivant :

Tableau 1.6. Comparaison des principaux logiciels d'ACV et de leurs bases de données textile

Logiciel D'ACV	Principales caractéristiques fonctionnelles	Base de données textile	Développeur
SimaPro®	Eco-conception des produits Analyse environnementale détaillée Approches par processus, Inputs/Outputs (I/O) Propagation des incertitudes	Peu de données	Pré Consultant, Hollande
GaBi®	Modélisation et enregistrement individuel des processus Analyse environnementale détaillée Introduction par l'utilisateur de relations non linéaires Interprétation de la qualité des données, analyse de sensibilité, calcul d'erreurs	Assez développée: Processus, flux, pré modélisés (I/O)	PE International et IKP University of Stuttgart Allemagne
TEAM®	Eco-conception des produits Processus supplémentaires mais de source peu claire	NON	Ecobilan France
Umberto®	Eco-conception des produits L'ACV est une utilisation possible	Peu de données	Institut für Umweltinformatik - Allemagne

1.5 Etat de l'art du développement durable dans la filière textile

L'utilisation de l'ACV pour évaluer les impacts environnementaux dans le domaine textile, est de plus en plus importante et ce à différents niveaux :

- au niveau de la recherche, pour innover en ce qui concerne les procédés textiles et les rendre plus propres, ou pour utiliser d'autres matières issues de nouvelles ressources (maïs, caséine de lait...) ou même pour remédier à certaines réglementations. Par exemple substituer les produits chimiques interdits par REACH;

- au niveau de l'industrie, pour comparer plusieurs scénarios de supply chain, soit pour choisir le matériau le moins impactant sur l'environnement, ou la meilleure stratégie de gestion de la

chaîne d'approvisionnement (lieux de production et moyens de transport pour l'acheminement des commandes, délais de livraison et la fréquence de livraison relative,...);

- au niveau de la gouvernance publique, pour comparer les catégories de produits et révéler les plus impactant [74], ou valider certaines réglementations (par exemple l'affichage environnemental).

1.5.1 Définition des impacts sociaux et environnementaux de la filière textile

Le secteur textile est caractérisé par une industrie en amont basée sur une utilisation intense de machines et de produits chimiques (de la production de la fibre à l'ennoblissement) et une industrie en aval (la confection) basée sur une main-d'œuvre très nombreuse étalée géographiquement suite à l'extension de l'externalisation et la sous-traitance notamment de l'industrie de la confection (26,5 millions de personnes travaillent dans le secteur du textile de l'habillement [75]). En addition aux impacts environnementaux qui ont été bien étudiés par les chercheurs et les industriels du secteur textile en vue d'y remédier, les impacts sociaux sont aussi importants et méritent d'être étudiés puisqu'ils sont de plus en plus sérieux aboutissant même à des accidents mortels des travailleurs à cause de l'omission des règles de sécurité et des conditions de travail; citons à titre d'exemple la succession de quatre accidents industriels dans différentes usines textiles qui ont eu lieu en février et mars 2006 au Bangladesh causant une centaine de morts et de blessés [76].

1.5.1.1 Impacts sociaux

De nos jours, les prix du marché ont fortement baissé (en France, -40% en 10 ans) grâce aux importations bon marché des textiles en provenance de pays où la main-d'œuvre n'est pas chère [77, 78]. Après l'expiration du système mondial de quotas sur les textiles en fin 2004, les importations chinoises en Europe sur le premier trimestre de 2005 ont augmenté de 534% pour les pull-overs, de 113% pour les pantalons pour homme et de 186% pour les chemises. L'ouverture des marchés internationaux a favorisé le développement de la délocalisation de l'industrie de la confection notamment en Asie de l'est. Ce bouleversement de l'industrie textile a été accompagné par l'expansion des usines basées sur une main-d'œuvre nombreuse, plus de 2 millions en Chine [79] et presque 2 millions au Bangladesh en 3500 usines [80]. Cette main-d'œuvre est majoritairement féminine et jeune caractérisée par un coût faible, par

exemple: au Bangladesh les salaires des femmes sont 28% inférieurs à ceux des hommes pour une qualification égale.

Les principaux impacts que l'on peut recenser sont les suivants :

- Le travail des enfants dans certains pays (réglementé par la convention No. 138 de l'OIT) [81, 82, 76].
- Le nombre d'heures de travail qui dépasse le seuil légal, défini par la loi du pays, qui est généralement 8 heures par jour et 40 heures par semaine avec au moins un jour de congés: en pratique, la loi n'est pas toujours respectée. Au Bangladesh, dans la plupart des usines où s'approvisionnent les distributeurs européens, on travaille 80 heures par semaine en période normale de production et de 17 à 19 heures par jour en haute saison. En Chine, dans la période de faible production la durée du travail varie entre moins de 8 heures et 10 heures par jour. Dans le cas d'absence de commandes, les travailleurs sont obligés de prendre des vacances non rémunérées [79, 76].
- Des salaires très bas et insuffisants pour couvrir les dépenses nécessaires. [79, 76, 83, 84, 85]
- Le travail forcé [79, 76]
- La discrimination [79, 86]

En plus de ces aspects, d'autres impacts sur la santé des travailleurs de l'industrie textile ont été constatés [87] tels que :

- La nuisance sonore due aux machines
- La poussière du coton et autres poussières organiques qui peuvent entraîner des affections respiratoires allergiques.
- L'éclairage faible dans les zones du contrôle de la qualité des tissus peut conduire à la fatigue oculaire.
- Le manque d'information des travailleurs concernant les dangers associés aux produits chimiques qu'ils utilisent.

- L'accès à l'eau propre et froide qui n'est pas toujours facile, en particulier dans les parties les plus chaudes de l'usine comme à la teinture et le séchage.
- Le travail dans des conditions chaudes et humides qui cause le stress.
- Le risque d'incendie dû au coton ou aux matières synthétiques hautement inflammables qui n'est pas toujours bien maîtrisé.
- La manutention manuelle de charges telles que des bobines de fil, des rouleaux de tissu mouillé.
- La production de la viscose et du nylon qui présente certains dangers liés aux solvants utilisés: le sulfure de carbone pour la fabrication de la viscose et le caprolactame pour la production du nylon. Le degré de risque dépend de la durée passée à travailler avec ces substances. Le sulfure de carbone est généralement inhalé sous forme de vapeur et est un poison puissant pour le système nerveux. L'exposition à long terme à forte concentration entraîne des dommages auditifs, des troubles du cerveau, des maux d'estomac et des troubles de la reproduction. Le caprolactame a également une incidence sur le système nerveux.
- Le sulfure d'hydrogène, un autre sous-produit de la production de la viscose, qui détruit les terminaisons nerveuses du nez.

Outre les impacts sociaux, les impacts environnementaux du secteur textile sont dus à plusieurs causes. Une synthèse, à partir de la revue de la littérature, des impacts environnementaux et de leurs causes dans chaque étape de la chaîne d'approvisionnement textile est donnée dans ce qui suit.

1.5.1.2 Impacts environnementaux

Le secteur textile de l'habillement est parmi les catégories de produits et de services (comme le bâtiment, le transport, les appareils ménagers, les aliments...) les plus polluantes au niveau européen. L'étude [74] concerne des groupes de produits et services couvrant l'ensemble de l'économie européenne. Les différentes étapes de leur cycle de vie sont prises en compte (utilisation du produit final à l'intérieur de l'UE-25, extraction des ressources, production et fin de vie à l'intérieur et à l'extérieur de l'UE-25). Le transport est traité dans une catégorie à part entière. Les résultats de l'étude sont résumés dans le tableau 1.7 ci-dessous.

Tableau 1.7. Contribution de la catégorie des textiles aux impacts environnementaux générés par l'Union Européenne¹⁵

Impacts environnementaux ¹⁶	Classement de la catégorie des textiles par rapport aux 22 catégories étudiées	Contribution de la catégorie des textiles au total des impacts générés par les catégories étudiées	la catégorie la plus impactant et sa contribution au total des impacts générés par les catégories étudiées
Effet de serre	8ème	5%	Bâtiments à usage d'habitation : 27%
Acidification de l'air	6ème	8%	Bâtiments à usage d'habitation : 17%
Eutrophisation	15ème	2%	Légumes : 79%
Epuisement des ressources non renouvelables	6ème	6%	Bâtiments à usage d'habitation : 26%
Oxydation photochimique	4ème	10%	Voitures particulières : 23%
Toxicité humaine	11ème	2%	Approvisionnement en eau potable et assainissement des eaux usées : 70%

Ces impacts majeurs sont principalement engendrés par une grande consommation d'énergie et de produits chimiques à plusieurs étapes dans le cycle de vie des produits textiles :

- A la production des fibres :

Les fibres synthétiques (telles que le polyester et le polyamide) sont fabriquées à partir des polymères (l'éthylène, le benzène, le butadiène ou le paraxylène) obtenus à partir de la

¹⁵ En % du total des impacts générés par l'ensemble des catégories étudiées couvrant l'économie européenne.

¹⁶ Les impacts environnementaux sont définis dans l'annexe 1.

transformation du pétrole par réactions chimiques. Les impacts majeurs constatés à cette étape sont :

- l'épuisement de ressources non renouvelables
- la grande consommation d'énergie due à l'extraction du pétrole et à la raffinerie
- le dégagement de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) dont l'unité retenue pour l'évaluer est le Global Warming Potential exprimé en masse d'équivalent CO_2 [88]
- l'émission du dioxyde de soufre (SO_2) et des oxydes d'azote (NO_x) qui contribuent à l'acidification de l'air [49]
- le dégagement des composés organiques volatils (COV) qui contribuent à la formation de l'ozone photochimique [89].

Les fibres artificielles qui sont à base de cellulose obtenue à partir de la pulpe de bois engendrent une grande consommation d'eau et d'énergie et génèrent des émissions de CO_2 (gaz à effet de serre), de SO_2 qui contribue à l'acidification de l'air et de la DCO qui contribue à l'eutrophisation de l'eau.

Les fibres naturelles ont des impacts différents car cela dépend de la nature de la fibre (culture ou élevage). Pour le coton, par exemple, son agriculture est connue par une consommation élevée d'eau (jusqu'à 29000 L /Kg de fibres [90]) et l'utilisation intensive de pesticides (presque 1/5 des pesticides utilisés dans le monde pour une surface qui ne représente que 2,4% de la surface agricole mondiale). L'utilisation de pesticides génère des émissions dans l'air (quantité évaporée), dans l'eau et dans la terre (quantité non absorbée par la plante) [91] d'où l'acidification de l'air (majoritairement à cause de l'azote (N) et des oxydes d'azote (NO_x)), l'eutrophisation de l'eau (principalement à cause du P_2O_5) et l'écotoxicité aquatique (des nappes phréatiques) et terrestre. Ces impacts varient selon la région (quantités et types de pesticides), le climat (sources d'eau et taux d'irrigation artificielle) et la fertilité de la terre (quantité d'engrais). En outre, pour cultiver le coton plusieurs méthodes sont utilisées. Par conséquent, les impacts peuvent varier selon la méthode suivie [92].

- A la production du fil, tissu ou tricot :

La filature est caractérisée par la poussière de fibres et l'évaporation de l'huile d'ensimage. Le tissage et le tricotage sont caractérisés à leurs tours par la poussière de fibres mais à moindres quantités (à l'ordre de 1-3% au lieu de 15-30% à la filature). Cette étape est consommatrice d'énergie.

- A l'ennoblissement :

Cette étape de la chaîne textile est caractérisée par une grande consommation d'eau [93] et d'énergie et par l'émission de COV et de DCO suite à la consommation de produits chimiques. Citons à titre d'exemple le coton qui génère beaucoup de rejets polluants dans l'eau à cause des étapes de préparation de la fibre où les impuretés du coton sont éliminées (cires, pectines,...). Par contre la fibre de polyester qui est synthétique est beaucoup moins chargée en impuretés mais nécessite des températures de teinture élevées et donc une plus grande consommation d'énergie.

- A la confection :

Cette étape de la production textile est caractérisée par une grande quantité de déchets à l'ordre de 10 à 25% de la quantité de matière entrante. Cette étape est aussi très consommatrice d'énergie vu l'utilisation de machines avec moteur (machines à coudre, découpeurs, chariots matelasseurs,...) et de machines chauffantes (fers à repasser, presses à thermocoller,...) dont la gestion des temps de marche/arrêt n'est pas toujours bien maîtrisée [94].

- A la distribution :

Les différents moyens de transport impliqués sur de grandes distances entre les différents lieux de production des textiles (transports maritime, terrestre et même aérien dans le cas d'un réassort d'un article de courte saisonnalité, pour la même chaîne d'approvisionnement) contribuent au réchauffement climatique (Global Warming Potential) suite au dégagement de gaz à effet de serre.

- A l'utilisation :

Tout au long de la durée de vie d'un produit textile, le lavage, le séchage et le repassage des textiles (consommation d'eau, de lessive et d'énergie), génèrent des impacts considérables tels que l'écotoxicité de l'eau et l'eutrophisation de l'eau.

Cette analyse qualitative de ces impacts confirme que le secteur textile génère des impacts néfastes sur l'environnement. Cependant elle reste insuffisante pour mesurer la gravité de ces impacts d'où la nécessité d'outils d'évaluation quantitative des impacts environnementaux.

1.5.2 L'ACV dans la filière textile

Dans le domaine textile, des chercheurs, industriels et certains organismes ont réalisé des études d'analyse du cycle de vie spécifiques aux produits textiles. Dans cette section, une liste de quelques exemples significatifs est donnée pour illustrer l'utilisation de cet outil émergent dans le domaine du textile.

1.5.2.1 Les études réalisées

Dans le secteur textile, réputé polluant notamment au niveau de l'ennoblissement, les chercheurs ainsi que les industriels ont toujours été conscients de cette problématique et ont amélioré les procédés pour réduire les impacts environnementaux. La vision globale de la supply chain textile (de la production de fibres, la fabrication du produit textile, la distribution, l'utilisation et l'entretien jusqu'à la fin de vie du produit) par l'ACV montre que d'autres parties sont aussi voire plus polluantes, que l'ennoblissement et suscitent l'intérêt des acteurs cherchant à réduire leurs impacts environnementaux.

À l'échelle européenne, l'Action COST 628 a été créée pour développer des travaux de recherche en Europe dans une perspective environnementale, ainsi que de proposer des meilleures technologies pour des procédés textiles plus propres [90]. Ils ont également mené des études d'ACV dans le cadre d'élaboration des indicateurs techniques environnementaux des produits textiles pour les normes ISO de type III concernant la déclaration environnementale du produit [28].

Avec l'apparition de l'ACV au début des années quatre vingt dix, aux Etats Unis, [95] a réalisé, pour l'association des fabricants américains de fibres, l'ACV d'une blouse en polyester. Au Danemark, en 1997, l'objectif global du projet EDIPTEX était de recueillir des données concernant les étapes majeures du cycle de vie des produits textiles. Le projet a également établi des ACV pour six produits textiles sélectionnés : un tee-shirt 100% coton, un costume de jogging en microfibres de nylon avec doublure en coton, une veste de travail de 65 % de polyester et 35 % de coton, une blouse en viscose, nylon et élasthanne, une nappe en coton et un revêtement de sol en nylon et polypropylène) [96]. En Finlande, [90] a étudié

l'impact environnemental des produits textiles de linge de lit pour les services hôteliers dans trois entreprises scandinaves de blanchiment et une société finlandaise de fabrication de textiles.

Ces études d'ACV réalisées avant la diffusion de la série de normes internationales ISO 14040, ont été basées sur les guides de la SETAC ou sur les lignes directrices nordiques pour l'ACV.

[91] a réalisé l'ACV de trois alternatives de linge de lit pour la société Berendsen dans les pays où elle est présente à savoir le Danemark, le Suède et l'Allemagne. L'objectif de cette étude était aussi de communiquer les résultats aux clients via la déclaration environnementale des produits. Il s'agit de la transcription des résultats de l'ACV en affichage environnemental comme décrit, par exemple, dans la norme ISO/TR 14025.

Au royaume uni, [97] ont réalisé, pour Marks&Spencer, une ACV simplifiée d'un pantalon en polyester et de 3 paires de culottes en coton pour homme, en analysant le cycle de vie entier du produit mais en ne se focalisant que sur la consommation énergétique. [98] ont réalisé l'ACV d'une serviette en coton. [99] ont réalisé une ACV comparative de couches de bébé en coton jetables et réutilisables. [78, 100], en se basant sur des données du projet EDIPTEX, ont réalisé l'ACV d'un tee-shirt en coton, d'une blouse en viscose et d'un tapis en polyamide. [17] ont réalisé l'ACV de la réutilisation et du recyclage des déchets textiles en coton et en polyester.

En Suède, [101, 102, 103, 104] a réalisé l'ACV de trois tissus en coton, en Trévira CS et en laine et polyamide, pour canapé.

En France, l'ADEME avec Bio Intelligence Service a établi l'éco-profil d'un jean [105].

En Nouvelle Zélande, [106] ont réalisé l'ACV d'une tonne de ruban de laine sèche pour l'industrie de la laine Mérinos.

En Turquie, [107] a réalisé l'ACV d'un peignoir en coton.

1.5.2.2 Analyse des données utilisées

Les données utilisées dans les études ACV sont généralement fournies à partir de plusieurs sources (entreprises, laboratoires de recherche, organisations gouvernementales, des ONG, la

littérature, etc.). Certes la plupart des données sont spécifiques aux études réalisées, mais elles peuvent être utilisées pour d'autres ACV.

Le tableau 1.8 ci-dessous montre une classification des données utilisées dans le cadre de certaines ACV de produits textiles.

Tableau 1.8: Classification des données de quelques ACV de produits en coton selon la norme ISO 14044

Produits textiles évalués	Sources de données pour l'ICV	Origines de données selon la norme ISO 14044		
		Mesurées	Calculées	Estimées
Tee-shirt en coton [96]	Matière première: production de coton fibres → données des Etats Unis entre 1992 et 1993		X	X
	Procédés de fabrication	X	X	
	Utilisation			X
	Fin de vie			X
Couches de bébé en coton réutilisables [99]	Matière première: production de coton fibres → données des Etats Unis entre 1996 et 2001		X	X
	Procédés de fabrication: Filature → données de la filature aux Etats Unis entre 1990 et 2000		X	X
	Transport → Données de l'Europe entre 1995 et 1999		X	X
	Utilisation: Lavage domestique → données de la Grande Bretagne			X
	Fin de vie	-	-	-

Tissu en coton pour canapé [104]	Matière première: Production de coton fibres → données des Etats Unis en 1999 et EDIPTX 1997 [96]		X	X
	Procédés de fabrication → données de la production en Suède en 2000	X	X	X
	Utilisation		X	X
	Fin de vie : Incinération avec récupération de l'énergie → données d'EDIPTX 1997 [96]		X	X

Des données intéressantes existent également dans certaines études d'ACV réalisées avant la création de la série des normes ISO 14040 [95, 90]. Ces données peuvent être utilisées si elles sont pertinentes. Outre les études d'ACV réalisées dans le domaine textile, d'autres sources de données dédiées à l'ICV peuvent être utilisées. Pour cette étape de l'ACV, il est recommandé de localiser les fournisseurs de données, d'analyser les bases de données existantes et de révéler les déficiences des données afin de compléter les inventaires liés aux processus étudiés. Après l'élaboration de la méthodologie de l'ACV, non seulement des guides et codes de pratique ont été fournis par les acteurs dans le développement de cette méthode, mais également des logiciels et bases de données ont été bâtis pour aider les praticiens pour bien mener des études d'ACV et obtenir des résultats fiables aussi bien dans la recherche que dans l'industrie. Dans ce cadre, le Groupe de travail 1 du PNUE / SETAC Life Cycle Initiative a établi un registre de bases de données ICV disponibles dans le monde [72]. Plusieurs bases de données sont répertoriées, mais peu d'entre elles concernent l'industrie textile. Seulement deux sources de données pour la filière textile au lieu de sept pour les matières plastiques par exemple. Ainsi, le besoin est de trouver plus de sources de données textiles et de vérifier leur complétude (tableau 1.9).

Tableau 1.9: Complétude des bases de données textiles disponibles

1 : la couverture de la chaîne d’approvisionnement

2 : la variété des procédés et matières

Nom de la base de données	Fournisseur	Contenu	Complétude
EDIPTX	Danish LCA Center	Données de la majorité des matières et procédés textiles utilisés [72, 108, 96, 78]	1 : globale 2 : élevée
GaBi 4_Extension database XV: Textile finishing	PE International	Données des procédés d’ennoblissement de plusieurs matières [73]	1 : partielle 2 : élevée
Ecoinvent V2.0 (2007)	Ecoinvent Centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventories	Données de production de coton fibre Données de certains procédés d’ennoblissement des tissus en coton	1 : partielle 2 : élevée 1 : partielle 2 : élevée
US LCI database	National Renewable Energy Laboratory (NREL)	Données locales de la production des fibres coton, polyester et laine [109]	1 : partielle 2 : élevée
¹⁷	Cost Action 628	Données environnementales de certains produits et procédés textiles dans 10 pays européens [110]	--
US LCI database	Franklin Associates, Ltd.	Données locales d’une étude de cas [95]	1 : partielle 2 : faible
ELCD database II	Commission européenne, Joint Research Centre	Certains traitements de fin de vie des textiles tels que l’incinération et l’enfouissement [111]	1 : partielle 2 : élevée

La vérification qualitative de la complétude des bases de données consiste à vérifier les différentes parties d'une chaîne d'approvisionnement et à trouver des données disponibles pour tous les processus élémentaires et toutes les matières premières pour les produits textiles. Trois niveaux de comparaison sont alors obtenus par rapport à la complétude, globale ou partielle, selon la couverture de la chaîne d’approvisionnement et par rapport à la variété de

¹⁷ Documentation non accessible au public

procédés et de matières, élevée ou faible. Si, par exemple, les données de tous les processus de fabrication des matières, des produits intermédiaires et des produits finis sont disponibles, la complétude est estimée être élevée et globale car elle peut couvrir la chaîne d'approvisionnement entière d'un produit textile. Si les données concernent tous le procédés mais à une ou quelques étapes seulement de la chaîne d'approvisionnement textile, la complétude est alors élevée mais partielle. Le degré de variété est faible lorsque les données concernent seulement une étude de cas spécifique où il manque les processus pour évaluer d'autres produits ou d'autres matières ou avec d'autres processus de fabrication.

La collecte de données pour l'ICV dans l'industrie textile est une étape cruciale de l'ACV, parce que chaque base de données disponible ne couvre pas toutes les données d'entrée / sortie pour toutes les étapes de la chaîne d'approvisionnement textile. En outre, la complexité de l'industrie textile, illustrée au début de ce chapitre, ajoute à la difficulté de sélectionner les données pertinentes pour chaque étude de cas. Donc, pour obtenir les données les plus complètes, il est recommandé d'analyser plusieurs sources existantes et de les combiner. Bien que de nombreux critères doivent être pris en compte, par exemple, pour évaluer le cycle de vie d'un produit textile fabriqué en Chine en utilisant les données extraites d'EDIPTX qui contient des données de processus faits au Danemark, il est obligatoire de vérifier que les mêmes processus sont effectués en Chine. Sinon, les données doivent être modifiées ou originaires du pays correspondant. C'est un aspect d'évaluation de la qualité des données qui pourrait avoir un impact négatif sur les résultats de l'ACV. Les exigences en termes de qualité se rapportent à la fois à la fiabilité et à la validité des données.

La variabilité des données pour les mêmes processus a une incidence sur l'interprétation des résultats de l'ACV. Par exemple, le choix de répartition pour la culture du coton peut varier. Dans certaines études [96, 90], les imputations des flux élémentaires ont été faites à la fibre de coton seulement, puisque l'utilisation des coproduits (graines) était omise. Considérant que, dans une autre étude [91], 85% des flux de processus ont été attribués aux fibres de coton, en se basant sur la règle d'imputation économique illustrée précédemment, fondamentalement, 15% en moins de pesticides, d'eau et d'énergie ont été alloués à la fibre de coton. Par conséquent, les impacts environnementaux de ce changement peuvent avoir une influence sur la prise de décision lorsque l'on compare différents matériaux. En plus des choix de l'imputation qui peut être problématique, le choix des données est une question cruciale quand

les différences sont énormes entre les différentes données publiées. La production de fibres de coton, par exemple, nécessite de l'énergie de l'ordre de 13 à 43 MJ kg calculée en équivalents de pétrole brut [90]. Selon une autre source [96], le niveau d'énergie utilisée dans le même processus est équivalent à 48,65 MJ kg équivalents de combustibles fossiles. En phase d'utilisation, un autre aspect s'ajoute à la complexité du choix des données fiables, c'est le comportement des consommateurs concernant le lavage, le séchage et le repassage pour le même produit. Un tee-shirt fabriqué en 100% coton pesant 250g, teint avec un colorant réactif noir est lavé 50 fois au Danemark [96] au cours de sa durée de vie pendant un an au lieu de 25 fois pendant sa durée de vie au Royaume-Uni [78]. Cette donnée peut avoir plusieurs influences sur les résultats. S'il s'agit de laver le tee-shirt une fois sur deux utilisations, cela permet de réduire de moitié l'impact environnemental de la phase d'utilisation dans la deuxième étude de cas. S'il s'agit de considérer que le tee-shirt n'est plus utilisable au bout de 25 lavages, il faudrait prendre en compte 2 tee-shirts pour le flux élémentaire en rapport avec le cadre temporel de l'unité fonctionnelle qui est de un an (tee-shirt porté pendant 50 jours par an). En réalité, relativement à [96, 78], au Danemark, on utilise 5 tee-shirts par an alors qu'au Royaume-Uni on utilise 8 tee-shirts par an. Ainsi, les résultats de l'ACV dépendent de la pertinence des données utilisées dans l'ICV.

1.5.3 L'éco-conception textile

L'éco-conception consiste à prendre en compte l'aspect environnemental en plus des autres critères (besoins marketing, faisabilité technique et optimisation des coûts). Il s'agit donc d'identifier au préalable les problèmes environnementaux afin de rechercher les options de conception qui les réduisent. Elle peut être réalisée dans le cadre d'une démarche sélective en se focalisant sur certains impacts comme par exemple le réchauffement climatique et la consommation énergétique ou dans le cadre d'une démarche exhaustive en évaluant tous les impacts environnementaux du cycle de vie du produit afin de réduire les plus importants. Dans ce cadre, s'inscrit l'ACV qui permet d'identifier les pistes d'amélioration les plus profitables pour l'environnement et de les valider. Dans le contexte de la recherche, des auteurs ont abordé les problématiques d'intégration de l'éco-conception en entreprise [31, 35]. Dans le contexte industriel notamment dans la filière textile, plusieurs exemples réussis ont été identifiés [4]. Citons à titre d'exemple Lafuma qui a éco-conçu son premier sac à dos baptisé « Sac ECO 40 » en utilisant un mélange de fils de chanvre et de polyéthylène

téréphtalate recyclé, les deux matériaux ne faisant au final qu'un seul fil. Cette technique permet de pouvoir teindre en amont uniquement le fil de chanvre; comme c'est une matière naturelle, la technique de teinte est plus simple et plus rapide que sur un fil synthétique. De plus, la plaque en polymère non recyclable en fin de vie pour le dos a été remplacée par une armature en acier beaucoup plus légère (100 g contre 300 g). D'autres améliorations ont été aussi apportées à ce produit. Un autre exemple faisant partie des premières expériences d'éco-conception textile, est la gamme des chaussettes éco-conçues « Naturaia » de Kindy. L'amélioration concernait principalement les procédés de teinture. L'exemple des tee-shirts éco-conçus à partir du polyester recyclé de Patagonia témoigne aussi de l'adoption de cette méthodologie par les petites entreprises dans l'industrie textile.

Dans un contexte de procédés plus propres, la réduction des impacts environnementaux à différents niveaux dans la fabrication des produits textiles, de nouvelles technologies appelées les meilleures technologies disponibles (MTD) (ou BAT pour « Best Available Technologies ») [112, 113, 114, 115]. L'objectif principal de l'élaboration des MTD réside dans la réduction des impacts environnementaux liés aux parties estimées les plus polluantes des processus de fabrication du textile notamment les prétraitements, la teinture, l'impression, les apprêts y compris le lavage et le séchage. La principale préoccupation environnementale de ces techniques est de réduire la consommation d'eau et d'énergie ainsi que les émissions. Parmi ces nouveaux procédés on cite :

- Les traitements enzymatiques: les enzymes sont des protéines qui agissent comme des biocatalyseurs pour activer et accélérer les réactions chimiques, dans le but de réduire la consommation d'énergie.
- La technologie plasma: les traitements au plasma nécessitent des temps de traitement plus courts et des quantités moindre de produits chimiques. Ils peuvent être effectués sur des fibres naturelles, ainsi que sur les fibres synthétiques, pour faire le dégraissage de la laine, le désencollage, le changement de la mouillabilité des fibres (hydrophile, hydrophobe), l'augmentation de l'affinité tinctoriale, l'anti-feutrage de la laine...
- L'utilisation du CO₂ supercritique dans les procédés de teinture [116]: Les fluides supercritiques sont capables de dissoudre des molécules organiques de polarité faible à moyenne. Ils peuvent être utilisés pour la teinture des substrats textiles, en particulier du PES

et des fibres PP. Le CO₂ a l'avantage par rapport aux autres gaz d'être non-inflammable, non explosif et non toxique.

- Les traitements par ultrasons: les traitements par ultrasons améliorent la dispersion des colorants et des auxiliaires et permettent de renforcer leur capacité d'émulsionner et solubiliser. Ils réduisent la consommation d'énergie et d'auxiliaires.

- La coloration électrochimique: permet de réduire et oxyder le colorant au moyen de méthodes électrochimiques pour la teinture de cuve et de soufre qui comprend à la fois une réduction et une étape d'oxydation.

- Les auxiliaires textiles alternatifs: il existe de nombreux auxiliaires de substitution pour réduire la pollution environnementale. Un exemple parmi ceux cités par le document BREF est l'acide polycarbonique qui peut être utilisé comme une alternative au N-méthylol qui est responsable des émissions de formaldéhyde.

- Le suivi en ligne de la concentration de la DCO (liée à la concentration de colorant) pendant le lavage et le rinçage (procédés discontinus de la teinture).

1.6 Conclusion

Dans le cadre d'une politique planétaire de développement durable, l'évolution de la recherche technologique est très rapide pour faire face soit à un problème imminent tel que le changement climatique, l'épuisement des ressources et le déséquilibre social prononcé entre le nord et le sud, soit pour satisfaire à certaines réglementations comme REACH. Certes, dans ce contexte, plusieurs procédés plus propres, plusieurs matériaux plus écologiques et bien d'autres stratégies de « green supply chain » et de commerce équitable, ont été élaborés. Cependant, la part de la recherche du point de vue développement durable dans le domaine textile reste étroite en la comparant aux travaux menés dans ce cadre sur l'ensemble des secteurs ce qui peut être constaté tout au long de ce chapitre. D'une part, le développement durable, étant d'abord un programme politique (commission de Brundtland en 1987), son développement a interpellé principalement plusieurs acteurs opérant dans le cadre de la gouvernance, d'où l'implication tant des industriels, des politiques et des chercheurs que des chercheurs.

D'autre part, le concept du développement durable étant caractérisé par sa transversalité a couvert plusieurs applications dans le secteur textile. En effet, les principaux travaux qui ont été élaborés pourraient être récapitulés dans la figure 1.6 ci-dessous.

Par ailleurs, l'évolution des outils ne concerne pas seulement la base scientifique de leurs fondements mais aussi l'aspect réglementaire de leurs applications.

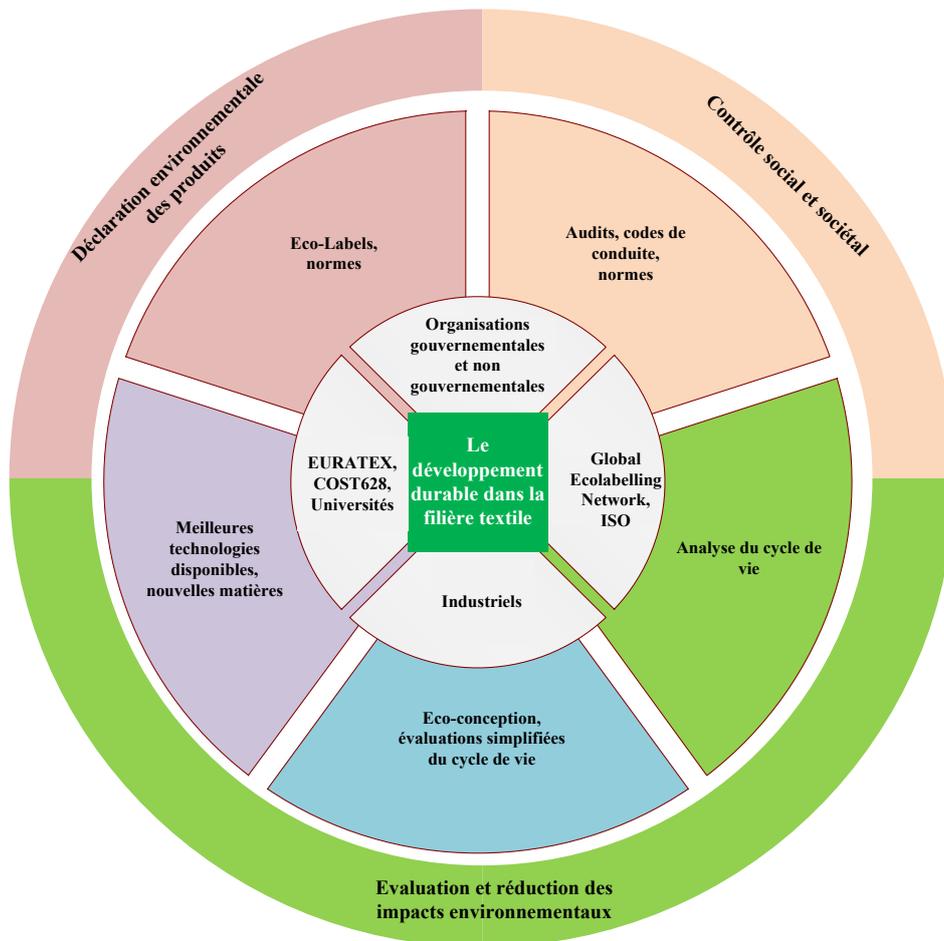


Figure 1.6. Etat de l'art du développement durable dans la filière textile : acteurs, outils et domaines d'application

Le besoin actuel est d'étendre le caractère globalisant du développement durable, à la filière textile. Il s'agit donc de poser de manière nouvelle les questions existantes : réduire tel impact à l'étape de fabrication en choisissant telle ou telle matière ou tel ou tel procédé a-t-il des résultats inverses sur le cycle de vie global en tenant compte de la chaîne d'approvisionnement, de l'utilisation et de la fin de vie ? Réduire les impacts environnementaux peut-il être cohérent avec les enjeux sociaux et économiques ?

Pour répondre à ces questions, plusieurs outils d'évaluation d'impacts sociaux et environnementaux ont été développés. Parmi ces outils, l'Analyse du Cycle de Vie, qui est une méthode d'analyse globale et d'aide à la décision, a déjà prouvé son efficacité. Néanmoins, dans le domaine textile, l'ACV est encore à un stade précoce de son utilisation. En effet, certaines limites accentuées par la complexité de la filière textile, doivent être levées afin de réaliser les objectifs de l'ACV à savoir l'aide à une prise de décision robuste.

L'ACV a été conçue et bien développée pour aider les utilisateurs à établir des jugements du point de vue environnemental sur des produits, services ou systèmes. Cependant, sa réalisation est plus complexe quand il s'agit d'aboutir à un choix unique de solution ou à un classement de la meilleure alternative à la plus polluante. L'interprétation des résultats de l'ACV est, dans certains cas, loin d'être triviale, notamment dans le domaine textile qui est assez complexe comme illustré au début de ce chapitre. D'où le besoin de compléter cet outil par une méthode d'aide à la décision multicritère afin de prendre en compte, d'une manière la plus objective possible, tous les impacts environnementaux quantifiés par l'ACV dans la prise de décision du meilleur scénario. L'avantage de combiner l'ACV à une méthode multicritère consiste à respecter l'aspect multicritère de l'ACV en tenant en compte toutes les catégories d'impacts évaluées et à ne pas omettre l'incertitude au niveau des données de l'ACV et de l'AICV.

L'objectif est dans un premier temps de compléter les données de la filière textile concernant les divers matériaux et procédés (cf. chapitre 3). Cela nous permettra de réaliser des ACV les plus complètes possibles pour une prise de décision fiable. Les différentes problématiques liées à la qualité des données sont abordées dans le même chapitre 3.

Le chapitre 2 suivant introduit la problématique de l'aide multicritère à la décision.

Chapitre 2

Aide multicritère à la décision pour l'analyse du cycle de vie

Sommaire

2.1 Introduction	84
2.2 Notre objectif : coupler l'ACV et l'analyse multicritère	84
2.3 L'aide multicritère à la décision et l'analyse du cycle de vie : ressemblance et complémentarité	86
2.3.1 Ressemblance _____	87
2.3.2 Complémentarité _____	89
2.4 Choix d'une méthode multicritère pour l'interprétation des résultats de l'ACV	90
2.4.1 Formulation de la problématique _____	90
2.4.2 Justification du choix _____	93
2.4.3 Principes méthodologiques _____	97
2.5 Conclusion	100

2.1 Introduction

L'analyse du cycle de vie est un outil d'évaluation environnementale multicritère dont la base scientifique est continuellement améliorée depuis les années 1990. Néanmoins, cet outil de bilan global présente certaines insuffisances pour la prise de décision.

Tout au long des étapes de réalisation de l'ACV, on fait face à des problématiques de choix multicritères. Citons à titre d'exemple, le choix des données de l'inventaire du cycle de vie quand plusieurs données différentes sont disponibles. Dans ce cas plusieurs critères de choix sont possibles tels que l'origine de la donnée (mesurée, estimée ou calculée), l'indicateur temporel (date de la prise des mesures par exemple) et l'indicateur technologique (le procédé utilisé correspondant aux données est-il exactement celui utilisé pour le système). Basée sur la classification et l'agrégation de différents critères (émissions, consommation de ressource non renouvelables,...), la détermination du profil environnemental des alternatives nous rappelle aussi les problématiques de l'analyse multicritère.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser les relations possibles entre l'ACV et l'aide multicritère à la décision (AMCD) et de se focaliser sur l'aide à la décision à travers et pour l'analyse du cycle de vie. En effet, la section 2.2 montre pourquoi et à quel niveau on cherche à coupler l'ACV et l'analyse multicritère. La section 2.3 distingue la ressemblance et la complémentarité entre ces deux méthodologies. Dans la section 2.4, une méthode d'AMCD est choisie pour compléter l'ACV à l'étape d'interprétation des résultats. Les principes méthodologiques sont définis dans cette même section.

2.2 Notre objectif : coupler l'ACV et l'analyse multicritère

La recherche du meilleur scénario de production revient à répondre à la question: l'écart existant entre les alternatives de production étudiées au niveau d'un impact environnemental donné est-il plus important que celui existant pour les mêmes alternatives au niveau d'autres impacts environnementaux (sachant qu'on fait face à des problèmes écologiques sur lesquels on n'a pas encore beaucoup de connaissances quant à leurs degrés de gravité relatifs) ?

L'objectif de ce paragraphe est de montrer le besoin d'aider à obtenir des éléments de réponse aux questions de choix du meilleur scénario d'une « green supply chain textile » pour un concepteur ou d'une éco-consommation pour un client final dans un contexte où la prise de décision est complexe. Malgré l'information scientifique que représente les résultats de l'ACV, leur interprétation demeure une étape critique puisque les résultats sont difficilement comparables parce qu'ils sont exprimés en unités équivalentes assez hétérogènes ne pouvant pas être agrégées pour donner une note globale vis-à-vis de l'aspect environnemental. La normalisation et la pondération telles qu'elles sont décrites par la norme ISO 14040 [44] présentent un caractère subjectif et restent difficilement interprétables notamment dans le cas d'une comparaison d'un grand nombre de scénarios. L'absence de la formulation d'une décision structurée et réfléchie dans l'ACV montre la nécessité de compléter cette étape. En effet, l'étape d'interprétation n'a pas été très développée par la norme ISO 14040 [44]. Les étapes de normalisation et de pondération (figure 2.1 ci-dessous) sont facultatives dans la réalisation de l'ACV malgré leur importance dans la prise de décision.

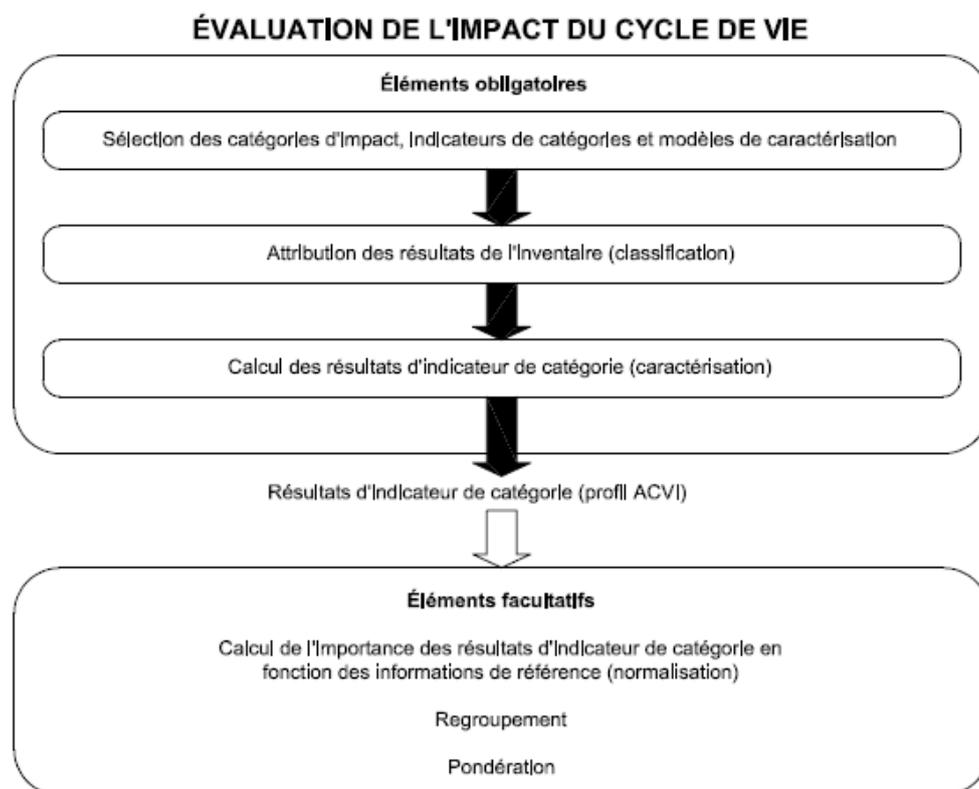


Figure 2.1. Eléments de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie : norme ISO 14040 [44]

Des travaux de recherche [117, 118, 119] proposent la définition des familles de critères à utiliser, néanmoins, de nombreux éléments relatifs à la décision de conception environnementalement correcte d'un produit textile posent question [120] :

- Quel est le point de vue à considérer sur le processus de conception, c'est à dire quel est l'effet le plus grave pour l'environnement ?
- Comment associer des maillons de la supply chain d'une manière durablement optimale pour éviter des effets contradictoires?
- Des outils mathématiques existent : comment choisir le plus adapté pour une analyse à court et long terme ?
- Comment prendre des décisions avec des données de type épuisement de ressources naturelles qui font actuellement l'objet d'estimations ?

Outre l'hétérogénéité des catégories d'impacts évalués par l'ACV, la variabilité des données concernant des processus identiques a un impact non négligeable sur l'interprétation des résultats de l'ACV, il en résulte des changements sur les impacts environnementaux et cela influence la décision résultant de la comparaison de textiles différents, ces différences peuvent être considérables, comme cela a été illustré au paragraphe 1.5.1.2.1. Dès lors, il importe de pouvoir gérer cette imprécision au sein de l'outil d'aide à la décision multicritère (cette incertitude sur les données se conjugue à une incertitude sur le calcul des impacts : il faut donc être capable d'évaluer et de prendre en compte une enveloppe de l'influence de l'imprécision et de l'incertitude pour interpréter sainement les résultats de l'ACV [60].

L'utilisation de l'ACV s'assortit donc à la fois d'une analyse de sensibilité et d'un calcul d'incertitude [44, 59, 49, 51, 52, 121], les décisions prises à travers un outil d'analyse multicritère devront intégrer ces aspects.

2.3 L'aide multicritère à la décision et l'analyse du cycle de vie : ressemblance et complémentarité

Les méthodes d'analyse multicritère sont des méthodes d'aide à la décision développées depuis les années 1960. On a recours à ces méthodes quand un décideur dispose de plusieurs solutions pour lesquelles, il doit faire un jugement assez complexe par rapport à leurs

performances, car on prend en compte plusieurs critères et aucune des alternatives n'est performante pour tous les critères. Ces solutions sont aussi appelées alternatives ou actions. Pour notre problème, on appellera scénario (faisant référence aux scénarios du cycle de vie) toute action comparée par l'analyse multicritère. Un chercheur a rappelé que la recherche en psychologie a montré que le cerveau humain ne peut considérer simultanément qu'un nombre limité d'informations (donc de critères) [122]. En conséquence, le but principal des méthodes d'aide à la décision de l'analyse multicritère est, à son avis, d'aider les décideurs à organiser et synthétiser leurs informations afin qu'ils se sentent à l'aise avec leur prise de décision. D'autres pensent qu'il y a place pour une science de l'aide à la décision. Grâce à des concepts rigoureux, des modèles bien formalisés, des procédures de calcul précises, des résultats d'ordre axiomatique, on est en mesure d'éclairer les décisions. Ceci en faisant ressortir ce qui est objectif de ce qui l'est moins, en séparant les conclusions fragiles, en dissipant certaines formes de malentendu dans la communication, en évitant le piège de raisonnements illusoire, en mettant en évidence certains résultats contre-intuitifs, etc [123]. Tels sont aussi nos objectifs à travers l'utilisation de l'AMCD et de l'ACV dans la comparaison de plusieurs scénarios de cycle de vie de produits textiles en prenant en compte plusieurs critères d'ordres environnemental. Pour une meilleure compréhension du fondement des ces méthodes, un état d'art de l'utilisation de l'analyse multicritère pour bâtir l'ACV et les relations entre les méthodes sont présentés ci-après.

2.3.1 Ressemblance

L'analogie entre l'ACV et l'AMCD a été faite par plusieurs auteurs [119, 124, 125]. Elle révèle des ressemblances à plusieurs niveaux dans l'application de ces deux méthodes telles que représentées dans la figure 2.2.

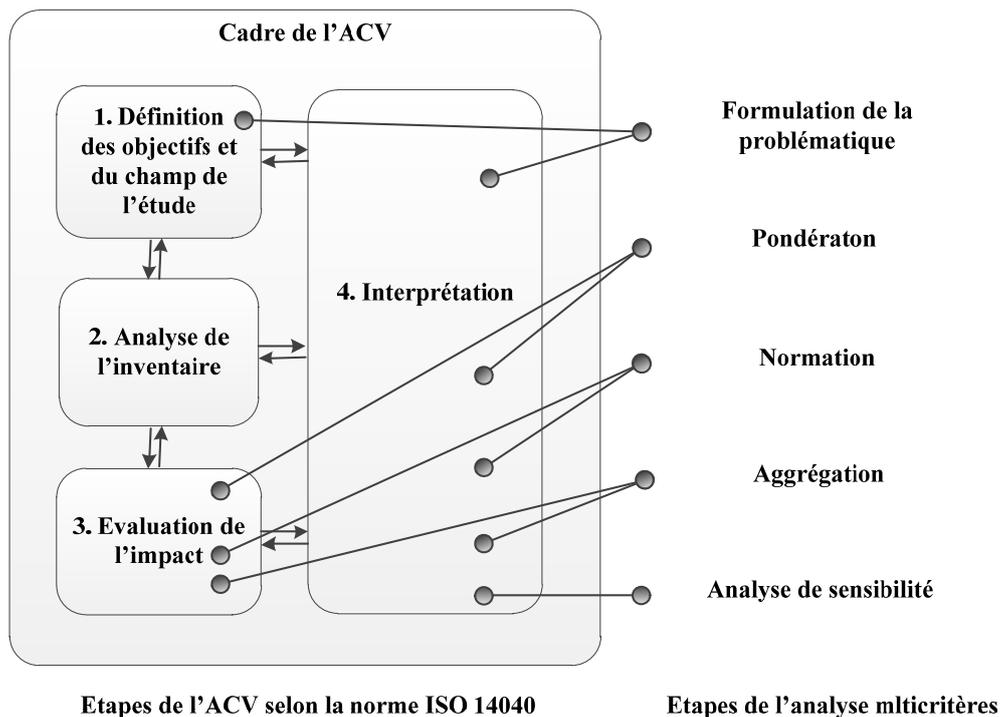


Figure 2.2. Comparaison des étapes de réalisation de l'ACV et l'analyse multicritère [126]

Afin d'explicitier ces ressemblances, les étapes de réalisation de l'ACV et de l'AMCD sont reprises dans le tableau 2.1 ci-dessous.

Tableau 2.1. Comparaison des étapes de réalisation de l'ACV et l'analyse multicritère

ACV	Analyse multicritère
<p>1. Définition des objectifs et du champ de l'étude :</p> <p>a. Définition des objectifs : faire une évaluation environnementale comparative de plusieurs alternatives*</p> <p>b. Définition du champ de l'étude : détermination des limites du système et modélisation des processus</p>	<p>1. Définition de la problématique, des objectifs et du processus de décision :</p> <p>a. Définition de la problématique et des objectifs : choix ou sélection de la meilleure alternative, tri ou classification des alternatives dans des catégories, rangement ou classement des alternatives, attribution d'une description</p> <p>b. Définition du processus de décision : choix des alternatives et définition des critères</p>
<p>2. Analyse de l'inventaire : quantifier les entrants et sortants des processus</p>	<p>2. Evaluation des critères : valeurs des critères (qualitatives, quantitative ou les deux)</p>
<p>3. Evaluation de l'impact :</p> <p>a. Classification des indicateurs (émissions...) dans des catégories d'impacts</p>	<p>3. Modélisation des relations entre les alternatives :</p> <p>a. Modélisation des préférences pour chacun des critères</p>

ACV	Analyse multicritère
b. Agrégation des indicateurs	b. Agrégation des résultats pour tous les critères
4. Analyse de sensibilité des données de l'ICV	4. Analyse de sensibilité de la décision
	5. Concrétisation du modèle décisionnel : formulation de la décision et recommandation

* L'évaluation environnementale en vue d'établir l'éco-profil du système étudié n'est pas une problématique d'aide à la décision

2.3.2 Complémentarité

Plusieurs méthodes d'AMCD ont été utilisées à plusieurs niveaux de la réalisation de l'ACV. Ces investigations ont été recensées [127]. Le tableau 2.2 suivant liste les étapes qui ont amené plusieurs chercheurs à recourir à l'aide à la décision et les méthodes utilisées afin d'apporter des compléments à cette méthodologie d'évaluation environnementale. Les méthodes listées ci-dessous sont décrites dans le tableau 2.4.

Tableau 2.2. Aide multicritère à la décision pour l'ACV: étapes et méthodes

Etapes du cycle de vie	Objectifs	Méthodes utilisées
Définition des objectifs et du champ de l'étude	Aider au choix des alternatives faisables et des catégories d'impacts appropriées	MAVT (Multi Attribute Value Theory) [128]
Analyse de l'inventaire du cycle de vie	Etablissement d'un ensemble de critères pour la modélisation du cycle de vie.	MAUT (Multi Attribute Utility Theory) [129, 130]
Evaluation des impacts du cycle de vie	Classification des émissions Caractérisation, agrégation et définition des catégories d'impacts	MAUT [118] AHP (Analytic Hierarchy Process) [131] MAVT/ MAUT [132, 133, 134, 127]
Interprétation	Distinguer les meilleures alternatives	PROMETHEE [135, 136] ELECTRE [133]

2.4 Choix d'une méthode multicritère pour l'interprétation des résultats de l'ACV

Dans le but d'éco-concevoir des produits textiles, le (ou les) décideur(s) est (sont) amené(s) à choisir un scénario de cycle de vie parmi plusieurs autres. Le choix doit être fait en prenant en compte l'aspect environnemental. Dans ce contexte, on cherche à analyser les résultats de l'ACV des scénarios comparés par une méthode d'aide multicritère à la décision. Dans ce qui suit, une action a analysée par l'AMCD est un scénario évalué par l'ACV. Un critère est un impact environnemental. La performance $g_j(a)$ du critère à l'action a est donc la valeur $g_j(a)$ quantifiée par une méthode d'AICV de l'impact environnemental engendré par le scénario a .

2.4.1 Formulation de la problématique

A ce stade, il est impératif de définir clairement la problématique abordée qui consiste à interpréter les résultats de l'ACV afin de comparer plusieurs scénarios et établir un classement en optimisant simultanément plusieurs impacts environnementaux. Dans une stratégie de développement durable, outre les aspects économique et environnemental, l'aspect social doit être pris en compte. La problématique est donc multicritère puisque la prise de décision est basée sur plusieurs critères (impacts environnementaux, impacts sociaux, critères économiques). Ici, il ne s'agit pas de rechercher un optimum puisque les conditions d'une approche par optimisation ne sont pas réunies. En effet, l'existence d'une solution optimale est coordonnée par trois contraintes [137]:

- les différentes actions doivent être exclusives
- l'ensemble de ces actions doit être exhaustif (solutions possibles/impossibles, considérées/négligées) : dans la filière textile caractérisée par la diversité des matières, de procédés de fabrication et des manières d'utilisation (évoquée en 1.2 et explicitée en 4.2), cette condition n'est pas toujours remplie.
- Si la préférence du décideur entre les différentes actions (la préférence stricte et l'indifférence) est non transitive (ou aussi dite intransitive : action a est préférable à b et b est préférable à c mais a n'est pas préférable à c) ou si l'indifférence est intransitive (exemple des sandwichs avec de plus en plus de pain et de moins en moins de fromage de telle sorte le choix soit indifférent entre deux sandwich successifs mais

entre le premier et le dernier ce n'est pas le cas) : la non maîtrise des aspects environnementaux et sociaux conduit à un manque de sensibilité dans l'évaluation des différents scénarios d'où la difficulté de mettre en œuvre une méthode d'optimisation.

La méthode choisie pour aider à la comparaison et la recherche d'un scénario est donc l'une des méthodes d'analyse multicritère. Ces dernières étant nombreuses, une classification des problématiques, en quatre catégories reprises dans le tableau 2.3 [138] réduit le nombre de méthodes susceptibles d'être utilisées dans ces travaux. La problématique alpha correspond à un choix final d'une seule action. La problématique bêta amène à l'établissement d'un tri des actions dans des classes prédéfinies : bonnes, moyennes et mauvaises. La problématique gamma conduit à un rangement décroissant des actions. La dernière catégorie comprend les problématiques delta qui amènent à la description des actions et leurs conséquences.

Tableau 2.3. Les quatre problématiques de référence [138]

Problématique	Objectif	Résultat
α	Eclairer la décision par le choix d'un sous-ensemble aussi restreint que possible en vue d'un choix final d'une seule action, ce sous-ensemble contenant de meilleures actions ou, à défaut, des actions « satisfaisantes ».	Un choix ou une procédure de sélection
β	Eclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie, les catégories étant définie a priori en fonction de normes ayant trait à la suite à donner aux actions qu'elles sont destinées à recevoir.	Un tri ou une procédure d'affectation
γ	Eclairer la décision par un rangement obtenu en regroupant tout ou partie (les « plus satisfaisantes ») des actions en classes d'équivalence, ces classes étant ordonnées, de façon complète ou partielle, conformément aux préférences.	Un rangement ou une procédure de classement
Δ	Eclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences	Une description ou une procédure cognitive

A première vue, la problématique d'éco-conception du produit textile pourrait être dans l'une des trois premières catégories, ou même dans une combinaison des trois premières catégories. Cependant, en tenant en compte de la réalité industrielle dans la filière textile, il n'est pas toujours possible d'adopter un choix unique de la meilleure action (résultat de la problématique alpha). Finalement, la problématique retenue pour ces travaux est une problématique gamma ($P\gamma$) : «Les classes de $P\gamma$ ne relèvent pas d'une définition a priori: la signification de chacune (les classes destinées à recevoir des actions) n'est que relative

puisque'elle dépend de sa position dans le classement » [138]. En effet, le classement des scénarios permettra au décideur de choisir un scénario moins impactant qu'un autre s'il n'est pas capable de prendre le meilleur du point de vue développement durable.

Une fois la problématique définie, l'identification des décideurs est aussi importante pour bien choisir la méthode d'AMCD. En effet, Bernard Roy a défini deux démarches possibles [138] :

- Une démarche descriptive qui consiste à élaborer la modélisation des préférences en raisonnant dans le cadre des hypothèses suivantes :
 - 1) il existe un décideur qui prédétermine sans ambiguïté la manière dont deux actions a et b se comparent : ceci implique que, antérieurement à l'étude, un système relationnel de préférences¹⁸ préexiste quelque part mais son fondement n'est pas pour autant explicite pour un autre décideur.
 - 2) Il s'agit de donner une description qui permet de « prédire » comment deux actions se comparent en supposant qu'il n'y a aucune relation d'incomparabilité et qu'il y a une structure de préordre complet, comme par exemple une fonction d'utilité. Alors que ce n'est pas le cas des scénarios de cycle de vie des produits textiles [139].
- Une démarche constructive qui consiste à élaborer la modélisation des préférences en privilégiant les points de vue ci-après :
 - 1) Deux acteurs concernés par la décision, ayant à comparer deux actions potentielles a , b peuvent émettre, à leur sujet, des jugements de préférence différents, voire conflictuels.
 - 2) Soit parce que son opinion n'est pas faite, soit parce qu'il reconnaît la pertinence des certains arguments, un acteur (qu'il participe ou non à la prise de décision) peut être amené à modifier ses préférences.
 - 3) Il existe des axes de signification concrets à partir desquels chaque acteur, concerné par la décision, élabore, transforme, justifie ses préférences.

¹⁷ Il s'agit de la comparaison des actions en faisant apparaître la préférence et l'indifférence.

- 4) Il s'agit de tirer parti des axes de signification familiaux aux différents acteurs pour concevoir une famille cohérente de critères permettant de construire un ou plusieurs systèmes relationnels de préférences [...].

Il est bon de rappeler que le décideur dans ce contexte peut être le concepteur, le fabricant, le distributeur ou même l'utilisateur du produit textile. Par conséquent, les jugements de préférences sont forcément différents, non stables et pas suffisamment argumentés de par les influences d'ordre stratégique pour ces trois premiers acteurs et médiatique pour le consommateur. En effet, le concepteur préfère les scénarios qui réduisent voire évitent une taxe écologique par exemple alors que le consommateur préfère les scénarios mis en avant par un marketing vert (matières naturelles, ressources renouvelables,...).

2.4.2 Justification du choix

Certes les décideurs optent pour certaines méthodes d'AMCD parmi plusieurs autres en fonction de la problématique abordée mais aussi en fonction des propriétés des méthodes qui traitent la matrice d'évaluation des actions par rapport à chaque critère. Le tableau 2.4 suivant décrit ces méthodes et recense leurs avantages et inconvénients. Une classification de ces méthodes dans trois attitudes dites approches opérationnelles selon l'agrégation des critères (plus simplement, la compensation des bonnes notes par les mauvaises) est proposée [138] :

- L'agrégation complète : approche du critère unique de synthèse évacuant toute incomparabilité (ou approche opérationnelle 1) comme par exemple la somme pondérée.
- L'agrégation partielle : approche de surclassement de synthèse acceptant l'incomparabilité (ou approche opérationnelle 2). Elle distingue quatre situations fondamentales de préférence entre deux actions a et b : l'indifférence, la préférence stricte, la préférence faible et l'incomparabilité qui sont représentées par les relations binaires suivantes :
 - $a I b$: « a et b sont indifférentes ou sensiblement équivalentes ».
 - $a P b$: « a est préférée à b ».
 - $a Q b$: « a faiblement préférée à b » ou « b n'est pas préférée à a ».
 - $a R b$: « a est incomparable à b », dans le cas où les trois situations précédentes seraient absentes.

- L'agrégation locale : approche de jugement local interactif avec itérations essai-erreur (ou approche opérationnelle 3). On part alors d'une action aussi bonne que possible et on tente de voir s'il n'y a pas, dans son voisinage, d'autres actions qui lui seraient préférées.

Le tableau 2.4 suivant résume les principes méthodologiques de l'agrégation des critères et décrit les principaux avantages et inconvénients de chaque méthode :

Tableau 2.4. Les principes méthodologiques de l'agrégation des critères: avantages et inconvénients

Agrégation des critères	Méthodologie et méthodes	Avantages	Inconvénients
Complète	Il s'agit de la compensation entre critères par une fonction mathématique aboutissant à une valeur unique de l'action à partir des valeurs par rapport aux différents critères. Les principales fonctions d'agrégations : par somme pondérée, additive (UTA : Utilités additives), multiplicative (MAUT : Multiple Attribute Utility Theory).	Convient aux problématiques où les actions sont nombreuses	Complète transitivité (risque d'écraser les nuances en voulant tout agréger) [140] Difficulté de détermination de la fonction d'agrégation [123]
Partielle	Comparaison des actions par paires par rapport à chaque critère et la détermination si, selon des conditions préétablies, l'une surclasse (est au moins aussi bonne que) l'autre ou pas. Parmi les méthodes d'agrégation partielle, les plus connues sont les méthodes des familles ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la Réalité) [141] et PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) [142].	Richesse des relations possibles entre les actions (indifférence, incomparabilité, préférence forte ou faible). Absence des contraintes de transitivité (de la préférence ou l'indifférence). Traitement des critères séparément, donc ils peuvent être de natures très différentes (qualitatifs, quantitatifs). Ces méthodes s'appliquent bien à la gestion environnementale [143].	L'analyse des résultats est parfois difficile et sensible (incluant l'incomparabilité) Les opérations de comparaison des variantes deux à deux sont nombreuses dans le cas où le nombre d'actions est grand.
Locale	On part alors d'une action aussi bonne que possible et on tente de voir s'il n'y a pas, dans son voisinage, d'autres actions qui lui seraient préférées. Cette recherche se fait de façon itérative et interactive avec le décideur,	Adaptées aux situations où il y a un nombre quasi infini de variantes	Le contenu théorique de ces méthodes est souvent inaccessible à un non-spécialiste. Méthodes très complexes et souvent irréalistes vis-à-vis de l'imprécision des données [143]

Notre objectif consiste à comparer les résultats de l'ACV de plusieurs scénarios pour établir un ordre d'importance des impacts engendrés et retenir les meilleurs scénarios en combinant des critères (impacts environnementaux) hétérogènes dont les valeurs sont sujettes à des imprécisions et des incertitudes. Il ne s'agit donc pas de la recherche d'un optimum mais plutôt d'un bon compromis. Les avantages de l'agrégation partielle des critères, nous conduisent au choix de cette approche opérationnelle (2). En effet, la richesse des relations possibles entre les actions (indifférence, préférence forte, préférence faible et incomparabilité), la considération de critères de natures différentes et ne pouvant pas être compensés (le cas des impacts environnementaux), la considération de la non transitivité de la préférence et de l'indifférence (paradoxe de Condorcet) et finalement la modélisation floue de la préférence dans un contexte de traitement d'informations imprécises tel que le cas de l'ACV, sont les spécificités appuyant ce choix.

Tenant compte de la problématique abordée qui est classée dans la catégorie des problématiques gamma, et associées à une démarche constructive, les méthodes qui sont envisageables dans ces investigations, sont les méthodes de surclassement : ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, PROMETHEE I et PROMETHEE II.

La méthode choisie dans ce qui suit est PROMETHEE. Fondée sur un modèle de préférences floues, cette méthode modélise aux mieux les imprécisions liées aux données de l'ACV. De plus, dès lors que l'une quelconque des conditions énoncées par [123] est remplie, on peut estimer qu'elle constitue un élément de contexte favorable à l'usage d'une procédure d'agrégation multicritère (PAMC dites de type II) dont PROMETHEE fait partie [123]. Ce qui est le cas pour les conditions n° 2, 3 et 4 [123]:

- « La condition n°1 : parmi les critères, il en est un au moins dont les performances prennent leurs valeurs dans une échelle " faussement quantitative" » : ce critère n'est pas une mesure. « La condition n°2 : on observe une forte hétérogénéité quant à la nature des performances lorsque l'on passe d'un critère à un autre [...] rendant difficile et/ou artificiel leur codage en vue de les exprimer en une unité commune ». C'est le cas des impacts environnementaux classés dans des différentes catégories d'impacts et exprimés en unités de mesure non équivalentes. « La condition n°3 : la compensation d'une perte sur un critère donné par un gain sur un autre critère s'opère de façon complexe et/ou en liaison avec des systèmes de valeurs entre lesquels la modélisation n'a pas à prendre partie ». La non maîtrise du domaine écologique

notamment des degrés de gravité des impacts environnementaux rentre dans cette condition.

- « La condition n°4 : certains des critères sont des pseudo-critères et il paraît souhaitable de tenir compte des seuils d'indifférence et/ou de préférence qui leurs sont associés pour obtenir les préférences globales ». La préférence stricte ou l'indifférence stricte par rapport aux impacts environnementaux (critères) sont difficilement formulées, d'où l'intérêt d'une modélisation floue entre deux seuils d'indifférence. Les imprécisions liées aux résultats de l'ACV traités par l'analyse multicritère appuient cette condition. De ce fait, on appellera dans la suite simplement critère les critères et pseudo-critères.

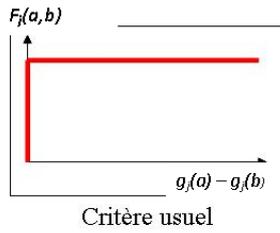
Finalement, le choix de PROMETHEE a aussi résulté d'une facilité d'usage. En effet, cette méthode se décline sous la forme d'un outil associé à une interface graphique conviviale, elle permet donc un traitement facile des résultats de l'ACV et une vérification simplifiée de la robustesse des résultats.

2.4.3 Principes méthodologiques

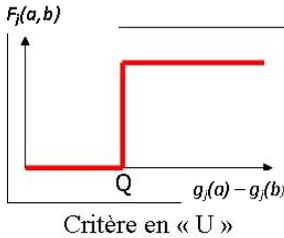
La méthode PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation) [142] consiste à construire une relation de surclassement entre les actions par l'établissement de la notion de préférence large¹⁹ qui prend valeur entre 0 et 1 pour des écarts entre les valeurs des critères compris entre les deux seuils d'indifférence Q et de préférence P (figure 2.3).

Six types de fonction sont possibles pour modéliser les préférences du décideur. En effet, pour deux scénarios a et b , l'évaluation du scénario a par rapport au $j^{\text{ème}}$ critère est $g_j(a)$ et celle de b est $g_j(b)$. La fonction de préférence de a par rapport à b au $j^{\text{ème}}$ critère est $F_j(a,b)$, un nombre compris entre 0 et 1 qui croît avec l'écart $g_j(a) - g_j(b)$ en fonction de la manière dont la préférence est modélisée (figure 2.3). En pratique les petits écarts positifs ($g_j(a) - g_j(b)$) ne peuvent pas être considérés comme des préférences strictes, d'où la notion de préférence faible et préférence forte.

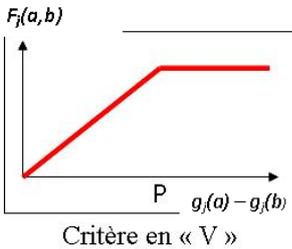
¹⁹ La préférence au sens large est constituée des relations binaires P et Q : $a P b$: « a est préférée à b » ; $a Q b$: « a faiblement préférée à b » ou « b n'est pas préférée à a ».



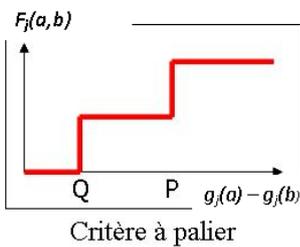
→ La préférence est stricte dès que l'écart est strictement positif



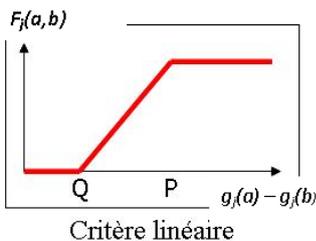
→ La préférence est stricte dès que l'écart est strictement supérieur à un seuil d'indifférence (Q)



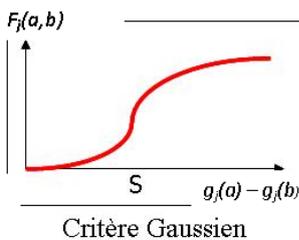
→ La préférence croît avec l'écart jusqu'à un seuil de préférence (P)



→ La préférence est moyenne pour l'écart compris entre un seuil d'indifférence (Q) et un seuil de préférence (P) et elle est stricte pour l'écart strictement supérieur à un seuil de préférence (P)



→ La préférence croît avec l'écart compris entre un seuil d'indifférence (Q) et un seuil de préférence (P) et elle est stricte pour l'écart strictement supérieur à un seuil de préférence (P)



→ La préférence croît avec l'écart suivant une loi gaussienne d'écart-type S

Figure 2.3. La préférence dans PROMETHEE

2.4.3.1 PROMETHEE I

Cette méthode établit un classement acceptant l'incomparabilité pour n actions selon k critères: on calcule, après avoir attribué un poids w_j à chaque critère, pour chaque couple (a, b) d'actions, les flux entrant et sortant de chaque nœud (action) à partir du degré de surclassement $\pi(a,b)$:

$$\pi(a,b) = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^k w_j F_j(a,b), \text{ où } P = \sum_{j=1}^k w_j$$

$F_j(a,b)$ est la fonction de préférence ayant valeurs entre 0 et 1 pour les écarts $g_j(a) - g_j(b)$ comme modélisé dans la figure 2.3 ci-avant.

Le flux sortant ou « puissance » :

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(a,b)$$

Le flux entrant ou « faiblesse » :

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{b \in A} \pi(b,a)$$

On en déduit les situations de surclassement, d'indifférence et d'incomparabilité suivantes :

- « a surclasse b » ou « a est préférable à b » :

$$\begin{aligned} aSb \quad & \text{si } \phi_a^+ > \phi_b^+ \text{ et } \phi_a^- < \phi_b^- \text{ ou} \\ & \text{si } \phi_a^+ = \phi_b^+ \text{ et } \phi_a^- < \phi_b^- \text{ ou} \\ & \text{si } \phi_a^+ > \phi_b^+ \text{ et } \phi_a^- = \phi_b^- \end{aligned}$$

- « a est indifférent à b » :

$$aIb \quad \text{si } \phi_a^+ = \phi_b^+ \text{ et } \phi_a^- = \phi_b^-$$

- Sinon a et b sont incomparables.

2.4.3.2 PROMETHEE II

PROMETHEE II établit un classement sans incomparabilité : cette méthode calcule la qualification des actions (puissance moins faiblesse) puis établit un classement sans incomparabilité, selon l'ordre des qualifications.

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

$$aSb \quad \text{si } \phi_a > \phi_b$$

$$aIb \quad \text{si } \phi_a = \phi_b$$

On obtient ainsi un classement total des actions. Donc, pour ces travaux, PROMETHEE II ne s'applique pas.

2.5 Conclusion

La liaison entre l'aide multicritère à la décision et l'analyse du cycle de vie a toujours été étroite dès le début du fondement de cette dernière. Différentes approches ont été proposées afin de réaliser des objectifs qui se croisent. Dans le cadre de ces investigations, la méthode de surclassement PROMETHEE I est choisie pour compléter l'ACV dans l'étape d'interprétation des résultats dans le cas d'études comparatives de plusieurs scénarios de cycle de vie. Certes, cette approche en elle-même a été adoptée auparavant dans des applications d'évaluations environnementales, citons par exemple le domaine de construction des bâtiments [135] et l'industrie automobile [136]. Cependant, le domaine d'application à savoir le secteur textile reste insuffisamment exploré par ces méthodes. Définir les paramètres spécifiques à ce contexte décisionnel, tel est l'objectif de ces travaux. En outre, la réalisation de l'ACV textile est assez complexe et l'interprétation des résultats ne l'est pas moins : faciliter cette tâche en appliquant une méthode d'AMCD est un exercice nécessaire.

Chapitre 3

Modélisation et évaluation de la chaîne d'approvisionnement textile

Sommaire

3.1 Introduction	104
3.2 Choix du scénario de référence	105
3.2.1 Le tee-shirt en coton, un produit significatif du secteur textile de l'habillement _____	105
3.2.2 L'Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt _____	109
3.3 Evaluation des impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt	116
3.3.1 Résultats de l'ACV _____	117
3.3.2 Imprécisions et incertitudes : analyse de sensibilité _____	124
3.3.2.1 Incertitudes relatives au choix de l'unité fonctionnelle _____	125
3.3.2.2 Incertitudes relatives à l'inventaire du cycle de vie _____	126
3.3.2.3 Choix de la méthode d'analyse des impacts du cycle de vie _____	129
3.4 Prise en compte des critères sociaux liés aux pays de production	133
3.5 Conclusion	138

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de modéliser et d'évaluer la chaîne d'approvisionnement textile. Vu la diversité des produits, des matières, des procédés, des chaînes d'approvisionnement et même des conditions d'utilisation, une modélisation générale n'est pas possible dans la limite du temps alloué à la préparation de ce mémoire. Dès lors, le choix d'un exemple représentatif est nécessaire afin de localiser les impacts environnementaux majeurs de la supply chain textile. L'outil choisi pour réaliser cet objectif, est l'Analyse du Cycle de Vie, dont l'efficacité a été démontrée au premier chapitre (paragraphe 1.5). En ce qui concerne le scénario de référence (section 3.2), il s'agit du tee-shirt en 100% coton, c'est un choix basé sur la simplicité du produit textile afin de faciliter la réalisation de l'ACV qui, malgré ce choix, reste assez contraignante en termes de collecte de données.

L'ACV réalisée en sections 3.2 et 3.3, a été basée sur les principes de la norme ISO 14040. Le choix des données de l'ICV a été validé, a priori, par la méthode d'évaluation de la qualité des données de l'ICV selon les indicateurs définis par [57] et la classification des données utilisées selon leurs origines (mesurées, calculées, estimées et de la littérature) comme le préconise la norme ISO14040. L'analyse de sensibilité des résultats de l'ACV vis à vis de certaines incertitudes et imprécisions a été réalisée afin de montrer l'influence de ces choix sur les résultats finaux.

Finalement, l'évaluation sociale faite dans ce chapitre en section 3.4 consiste à localiser les points critiques de la supply chain textile. Cette évaluation qui est plutôt qualitative est basée sur la vérification des conventions de l'OIT ratifiées par les pays de production et sur un état de l'art des différents audits sociaux réalisés dans l'industrie de l'habillement dans deux pays de production à savoir la Chine et la Turquie.

3.2 Choix du scénario de référence

3.2.1 Le tee-shirt en coton, un produit significatif du secteur textile de l'habillement

Le tee-shirt est un produit textile omniprésent dans toutes les collections de l'habillement. Les importations mondiales de ce produit de 2002 à 2006 sont en hausse d'un taux annuel moyen de 14% atteignant 26 milliards de dollars américains. L'Union Européenne avec un tiers des importations globales en 2006, est le marché le plus important dans le monde [144]. Outre sa valeur économique, malgré sa simplicité, le tee-shirt est un produit textile qui peut être destiné à plusieurs cibles de clientèles. En effet, d'un article permanent classé parmi les sous-vêtements à un article de mode classé parmi les articles saisonniers, le tee-shirt peut être fabriqué avec plusieurs matières (coton, polyester, viscose, nylon, etc.) et approvisionné différemment. Il peut même avoir plusieurs fonctions, en plus de la prestance sociale, telles que la protection médicale, par exemple, le tee-shirt "pace protector" conçu pour protéger les porteurs de stimulateur cardiaque des ondes électromagnétiques en en supprimant jusqu'à 92%. Les procédés de fabrication pour ce produit sont diversifiés, d'où la multiplicité de choix des scénarios de production. D'un tricot coupé cousu²⁰ à un tricot « fully fashioned²¹ » ou même intégral²², à partir d'un fil en coton cardé de la filature conventionnelle ou de la filature open-end ou même d'un fil retors en coton peigné, le tee-shirt se décline sur plusieurs gammes de qualité. Il peut aussi subir certains traitements de fonctionnalisation tels que les traitements antitache, antimicrobiens, anti-UV... La chaîne d'approvisionnement du tee-shirt est très étendue géographiquement. En effet, pour un tee-shirt conçu en Californie et distribué au Nevada aux Etats Unis, la fibre peut provenir de Turquie pour être filée, tricotée et confectionnée en Thaïlande²³.

²⁰ Coupé cousu : le tricot est fait en un panneau, puis les pièces constitutives du vêtement (dos, devant, manches, etc.) sont coupées et ensuite cousues.

²¹ Fully fashioned : les grandes pièces constitutives du vêtement sont entièrement tricotées ensuite cousues.

²² Intégral : le tricot est entièrement tricoté en une seule pièce.

²³ <http://www.patagonia.com/eu/frFR/footprint/index.jsp>.

En ce qui concerne le coton, le choix est basé sur le fait qu'il est la matière la plus utilisée dans le textile de l'habillement (figure 3.1).

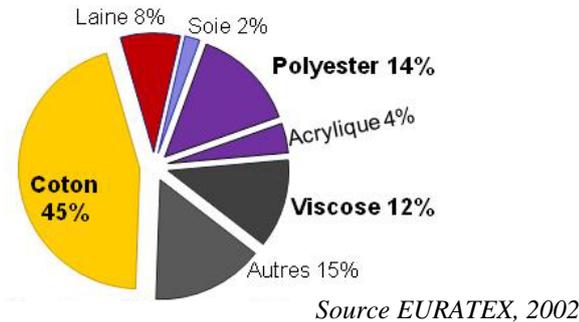
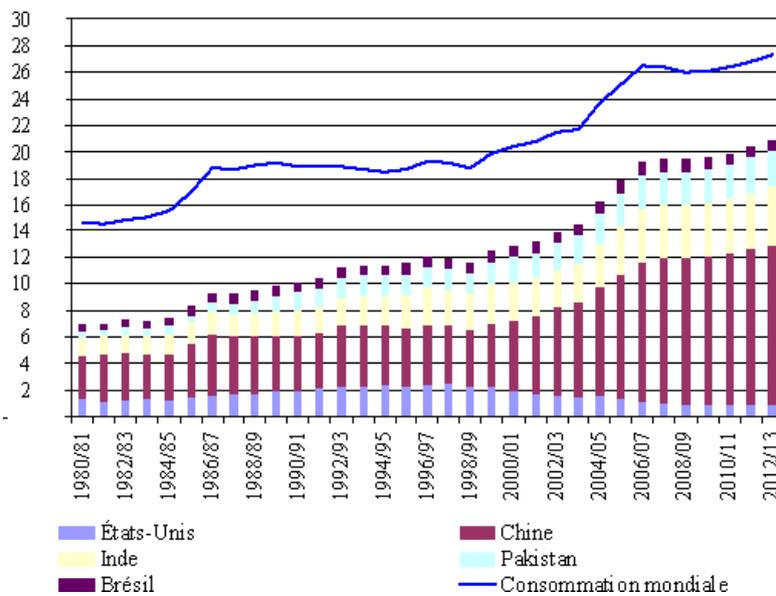


Figure 3.1. Principales fibres utilisées dans l'industrie du textile de l'habillement

A l'échelle mondiale, la consommation de fibres de coton pour le secteur industriel du textile de l'habillement est toujours en hausse notamment dans les pays où l'industrie textile est en pleine prospérité grâce à une main d'oeuvre bon marché (Figure 3.2).



Source: Secrétariat de la CNUCED d'après les statistiques du Comité consultatif international du coton (CCIC)

Figure 3.2. Evolution de la consommation mondiale ainsi que des consommations nationales de fibres de coton dans les principaux pays producteurs de textiles entre 1980/1981 et 2012/2013 en millions de tonnes

Vu les impacts environnementaux et sociaux de la production du coton, en plus de son importante utilisation dans le domaine textile, son évaluation mérite d'être réalisée en tant que scénario de référence.

Du point de vue social, la production de coton fournit directement près de 350 millions d'emplois (culture, transport, égrenage, emballage, stockage) [145]. Les conditions de travail ne sont pas toujours convenables à cause des grandes quantités de pesticides et d'agents défoliants utilisées notamment dans les pays où l'égrenage manuel est privilégié car il est moins coûteux et a un rendement en fibres plus élevé. En effet, le pourcentage de déchets varie selon la méthode d'égrenage. L'égrenage manuel génère peu de déchets 0,03-0,32 Kg par kilogramme de coton fibres. L'égrenage par « machine-picking » génère 0,09 à 0,42 Kg par kilogramme de coton fibres. L'égrenage par « machine-stripping » génère 0,95 à 2,91 Kg par kilogramme de coton fibres [13].

Du point de vue environnemental, l'agriculture de coton, qui s'étale sur 31 millions d'hectares dans le monde, est parmi les plus épuisantes pour les sols et les plus consommatrices en eau (7000 à 9000 m³/ha) ce qui entraîne des impacts considérables. Par exemple la mer d'Aral a diminué de trois quarts au cours des dernières décennies à cause de l'agriculture du coton. L'utilisation massive de pesticides, d'engrais et d'agents défoliants a des impacts sur l'environnement.

Le scénario de référence contient aussi les procédés textiles les plus utilisés pour le tee-shirt en coton (d'après nos connaissances et les données de certaines entreprises textiles) et les étapes d'utilisation et de fin de vie les plus probables en s'appuyant sur des statistiques relatives au comportement du consommateur [12]. Quant à la chaîne d'approvisionnement, le scénario de référence choisi (cf. figure 3.3) consiste en une production en Chine qui est le principal fournisseur textile pour l'Union Européenne grâce à une baisse des prix jusqu'à 36,2% pour les tee-shirts entre 2004 et 2005 [146]. On considère les fibres de coton de la province du Xinjiang qui est la première région produisant 21,50% de la production chinoise en coton [147]. La province de Jiangsu, située sur la côte Est auprès des ports internationaux tels que le port de Nanjing est la première région en production textile en Chine (23% de la production en valeur textile de l'habillement en 2001) [148]. L'étape de fabrication du tee-shirt est alors considérée avoir lieu à Jiangsu.

Les étapes de distribution, d'utilisation et de fin de vie sont supposées avoir lieu en France.

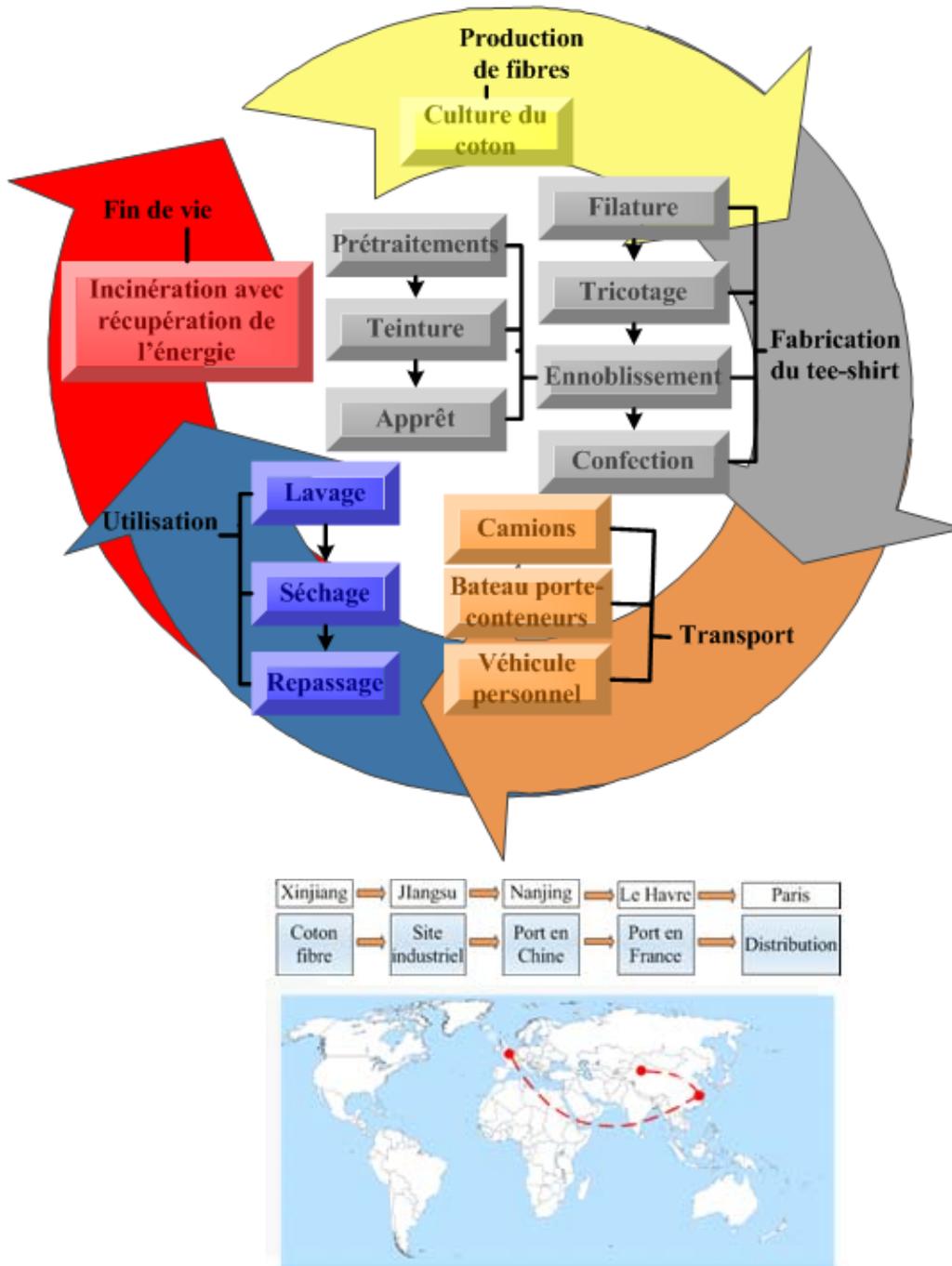


Figure 3.3. Scénario de référence pour la modélisation et l'évaluation de la supply chain textile

3.2.2 L'Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt

L'Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt a été réalisée selon les principes de la norme ISO 14040 [44] telle qu'elle est expliquée dans la section 1.5.1 du chapitre 1 et brièvement décrite dans ce qui suit. Les principes de la méthode sont récapitulés dans la figure 3.4 suivante.

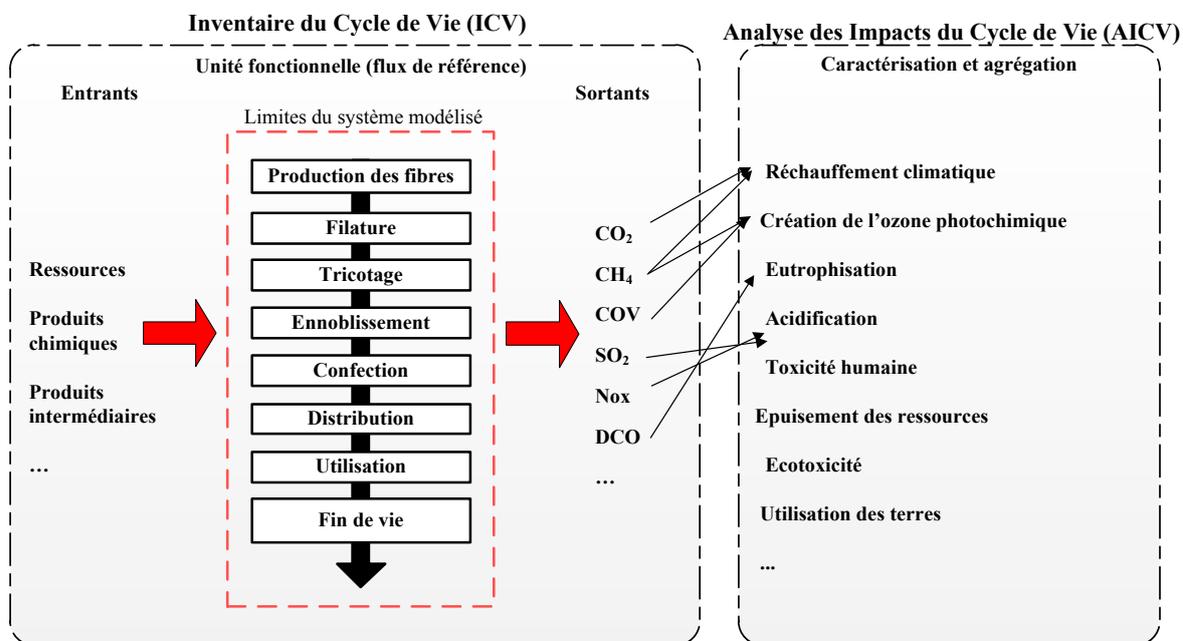


Figure 3.4. Analyse du Cycle de Vie du tee-shirt : modélisation du système, recensement des flux entrants et sortants et quantification des impacts

Les objectifs de cette étude consistent en un premier lieu, à modéliser et évaluer la chaîne d'approvisionnement textile d'un tee-shirt en coton afin de localiser les impacts majeurs sur l'environnement. En second lieu, comparer plusieurs alternatives de chaîne d'approvisionnement de tee-shirt et distinguer les meilleures du point de vue environnemental.

- La fonction du système et l'unité fonctionnelle : la fonction principale du tee-shirt étant l'habillement, l'unité fonctionnelle évaluée est « *porter un tee-shirt pendant 30 jours pour une durée d'un an* ». Pour cette unité de service, le flux de référence considéré est un tee-shirt dont le nombre d'utilisations pendant un an est estimé égal à 30 en supposant faire un lavage, un séchage dans le sèche-linge et un repassage après chaque utilisation. En réalité, le flux de référence est conditionné par le comportement du consommateur. Explicitement, le nombre d'utilisations par an du tee-shirt varie

d'un consommateur à un autre. En effet, si un consommateur porte un tee-shirt pendant 30 jours par an, il a besoin d'un tee-shirt par an. S'il a par exemple, 6 tee-shirts, les 6 durent 6 ans. Par contre, si un consommateur porte un tee-shirt pendant 180 jours par an, la réflexion doit être orientée vers la durée de vie du tee-shirt. Plus la durée de vie du tee-shirt est augmentée, plus le nombre de tee-shirts utilisés par an est réduit ce qui permet de réduire les impacts environnementaux liés à la production et à la distribution. Toutefois, la durée de vie du tee-shirt ne dépend pas seulement de la qualité du produit mais aussi d'une obsolescence perçue du consommateur liée à l'effet de mode, l'envie de renouvellement, l'addiction au shopping, etc. Dès lors, le modèle défini et les hypothèses considérées doivent prendre en compte la corrélation entre la segmentation des consommateurs (privilégiant la qualité et / ou le prix et /ou le design) et l'usure du produit. Dans ce qui suit, la durée de vie du tee-shirt évalué est estimée égale à 30 utilisations ce qui correspond à un tee-shirt basique de basse qualité.

- Les frontières du système : le flux de référence est un tee-shirt de 250g en 100% coton, teint avec un colorant réactif noir. Il est lavé à 40°C car c'est la température de lavage qui est de plus en plus choisie avec 44% de lavages à 40°C, la température moyenne de lavage en 2005 en France est 41°C [12]. Il est séché dans le sèche-linge et repassé à une température correspondant au niveau coton (3 points).

- La règle d'affectation : la fibre n'étant pas le produit unique de l'agriculture du coton, une affectation (ou aussi appelée imputation ou « allocation ») est appliquée en se basant sur une règle d'affectation économique. En effet, on a en masse presque 2 fois plus de graines que de fibres alors que le prix des fibres est au moins 9 fois supérieur à celui des graines. La règle d'affectation doit être alors économique puisque les fibres sont plus valorisées que les graines et constituent le produit principal qui est le flux de référence du processus élémentaire. Pour cela, on calcul un coefficient d'imputation C_F pour affecter les flux générés au cours des étapes de culture et d'égrenage en fonction des coproduits fibre de coton et graines de coton et ne garder dans l'inventaire que les flux relatifs aux fibres [91, 149], comme suit :

$$C_F = \frac{F_{mF} \times m_F}{F_{mF} \times m_F + F_{mG} \times m_G}$$

$$C_F = 0,84$$

Avec P_F le prix de vente des fibres = 1,10 euros/Kg (37% en masse) et P_G le prix de vente des graines = 0,12 euros/Kg (63% en masse) [150, 151].

- Les hypothèses et limitations: d'une manière générale, la construction de l'infrastructure, la production et la maintenance des machines utilisées ne sont pas modélisées dans le système étudié. Seules les étapes décrites ci-dessus (figure 3.3) sont modélisées. La production des flux élémentaires (produits chimiques, eau adoucie, ressources énergétiques, etc) ainsi que l'acheminement de ces produits (les moyens de transport et la production des carburants consommés) ont été modélisés. Par contre la production des pesticides, de l'huile d'ensimage et de la paraffine utilisée en tricotage n'a pas été modélisée. En ce qui concerne le fil à coudre utilisé dans la confection, sa production n'a pas été prise en compte par approximation en se basant sur les règles décrites par la norme ISO 14040 et illustrées dans le chapitre 1, paragraphe 1.5.1.2. Le transport de la lessive dans l'étape d'utilisation n'a pas été pris en compte car il est estimé négligeable. Si le transport est par véhicule (le moyen de transport le plus polluant utilisé par le consommateur), cela concerne aussi d'autres achats d'où une part négligeable dans les impacts engendrés par le transport de la lessive.

La principale limitation de cette étude, concerne la culture du coton. Les données d'ICV de la culture de coton en Chine étant indisponibles, des calculs ont été faits pour estimer ces données à partir de la littérature. En addition à la variation des régimes d'agriculture dans une même région [92], le climat est un facteur important influençant la consommation d'eau pour l'irrigation. Par exemple, les conditions climatiques pour la production de coton sont plus favorables aux Etats-Unis (deuxième pays producteur de coton). En effet, puisque l'évaporation de l'eau est plus faible, 516 mm dont 311 mm proviennent de la pluie, suffisent pour le cotonnier. Par contre, en Chine (premier pays producteur de coton) l'évaporation d'eau est plus importante. Par conséquent, la quantité d'eau nécessaire pour l'irrigation est égale à 718 mm dont 44,5% en moyenne provient de l'irrigation partielle [147]. Pour certaines régions notamment Xinjiang qui est le point de départ du scénario de référence évalué ci-après, le taux d'irrigation artificielle est de 100% [152]. Le rendement plus élevé en

coton fibres en Chine (1058 Kg/ha contre 757 Kg/ ha aux Etats Unis, en 2003 [150]) est expliqué par l'utilisation de plus grandes quantités d'engrais et de pesticides comme le montre le tableau 3.1 suivant:

Tableau 3.1. Comparaison des quantités d'engrais chimiques et de pesticides utilisées en Chine et aux Etats Unis

	Engrais N (Kg/ ha)	Engrais P (Kg/ ha)	Engrais K (Kg/ ha)	Pesticides (Kg/ ha)
Chine, 2001	360 [153]	105 [153]	9 ²⁴ [153]	87,5 [154]
Etats unis [109]	84,7	34,2	37,9	6,13

Le rendement moyen annuel du coton chinois étant supérieur de 1,4 fois sur la période de 1997 à 2001 [147], les quantités d'eau et d'engrais K utilisées par Kg de fibres restent inférieures. En ce qui concerne les ressources énergétiques, la consommation à l'hectare est supposée égale pour tous les scénarios. Les données d'ICV pour la culture du coton ont donc été adaptées pour la Chine à partir des données d'ICV de la base de données US LCI database [109] et des données citées ci-dessus.

Afin d'obtenir des résultats fiables, l'ACV doit être réalisée avec des données relatives à la localisation géographique du processus. En effet, pour les ressources énergétiques, le mix utilisé n'est pas le même pour chaque pays comme le montre la figure 3.5 suivante.

²⁴ Les valeurs des engrais N et P pour la Chine sont les quantités moyennes utilisées par les agriculteurs alors que la valeur de l'engrais K pour la Chine est la valeur recommandée par [160] car la quantité moyenne utilisée n'est pas retrouvée.

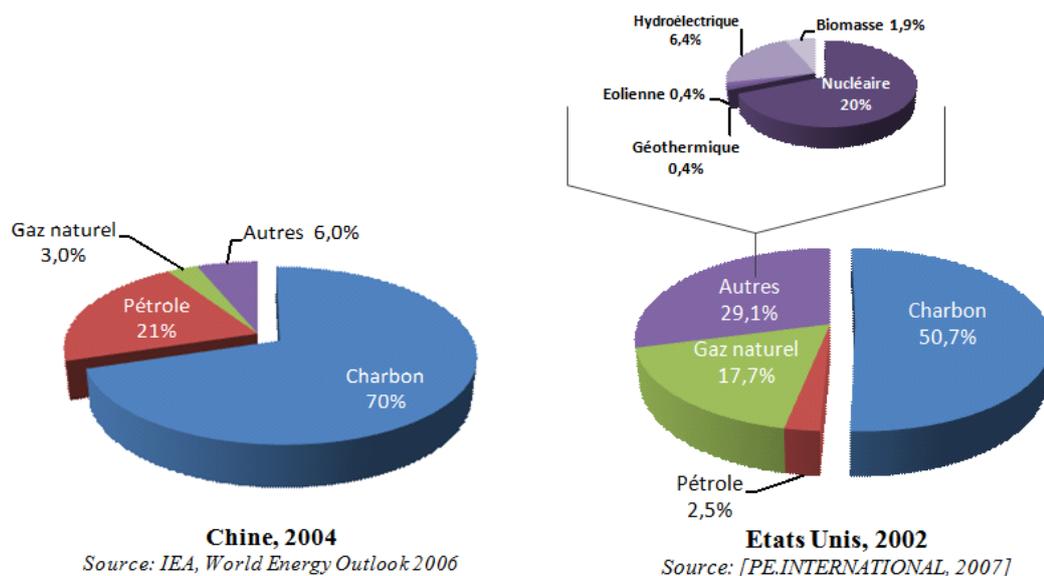


Figure 3.5. Sources de l'énergie électrique en Chine et aux Etats Unis

La contrainte qui représente une seconde limitation dans cette ACV est l'indisponibilité des données d'ICV pour les processus de production de carburant et d'énergie en Chine. Un choix parmi les processus les plus proches (disponibles dans la base de données GaBi 4 [73]) est fait pour chaque étape du cycle de vie du tee-shirt.

L'insuffisance de connaissances liée à la composition de la lessive, à l'efficacité énergétique des produits électroménagers et l'incertitude liée aux habitudes d'utilisation et d'entretien du tee-shirt par le consommateur représentent des limitations supplémentaires.

- Les exigences portant sur les données : les données utilisées pour l'inventaire du cycle de vie ont été collectées à partir de différentes sources telles qu'elles sont classées dans le chapitre 1 (cf. 1.5.1.2.1). L'étape de collecte des données, a été l'étape la plus consommatrice en temps (état de l'art de la littérature, recensement des fournisseurs de bases de données d'ICV, sélection des données, etc.) et en ressources (achat de bases de données, déplacements pour effectuer les mesures, etc.). Elle a été réalisée en respectant les exigences décrites par la norme ISO 14040. En ce qui concerne la validation de la qualité des données sélectionnées, la méthode qualitative décrite en chapitre 1 (cf. 1.5.1.2.2) a été appliquée et illustrée dans ce qui suit. Une analyse de sensibilité a également été faite pour tester la sensibilité des résultats aux données de l'ICV. Afin de vérifier la robustesse des résultats par rapport aux

imprécisions et incertitudes liées aux données d'ICV, aux hypothèses, aux modèles utilisés et même aux méthodes d'AICV, il importe de distinguer ces types d'incertitudes et de vérifier leurs influences sur les résultats (cf. 3.3.2).

Les processus d'ennoblissement, de transport, d'incinération, de production de carburants et d'énergie (électrique et thermique) ainsi que de la fabrication de matériaux secondaires utilisés dans les différentes étapes du cycle de vie du tee-shirt ont été récupérés de la base données GaBi 4 [73]. Les processus élémentaires modélisés pour l'ACV du tee-shirt qui ont nécessité la collecte de données sont les suivants :

- la culture du coton-fibres (avec un coefficient d'affectation de 0,84),
- la filature conventionnelle cardée d'un fil en 100% coton de titre Nm 40/1,
- le tricotage, sur un métier circulaire, d'un jersey en 100% coton à partir d'un fil Nm 40/1 avec une LFA²⁵ de 400 mm par 100 mailles et une jauge²⁶ de 20 aiguilles/ pouce,
- la confection d'un tee-shirt en 100% coton de 250 g,
- et l'utilisation du tee-shirt : lavage à 40°C programme coton, séchage dans le sèche-linge à haute température, repassage pendant 3 minutes à température correspondant au niveau coton (3 points) avec un fer à repasser de puissance 1900 KW.

L'évaluation de la qualité des données sélectionnées pour l'ICV des processus élémentaires est récapitulée dans les tableaux 3.2 et 3.3 suivants.

Le tableau suivant représente la répartition des données par rapport aux catégories de la norme ISO 14040. En effet, le pourcentage représente le ratio entre le nombre de données de la catégorie et le nombre total des données pour chaque processus. Dans la norme ISO 14040, la catégorie « données de la littérature » est incluse dans la catégorie « données calculées ». L'objectif de la représenter séparément dans le tableau 3.2 est de montrer la disponibilité de très peu de données dans la littérature pour l'ACV textile. Les données mesurées sont relevées

²⁵ La Longueur de Fil Absorbée (mailles plus ou moins grosses).

²⁶ C'est le nombre des aiguilles par pouce (1pouce=2,54 cm), elle définit la taille de la maille.

dans des entreprises textiles en Tunisie. Certes, le score de l'indicateur géographique de ces données est faible. Mais, les scores des indicateurs technologiques et temporels sont élevés comme indiqué dans le tableau 3.3.

Tableau 3.2. Classification des données de l'ICV des processus élémentaires selon leurs origines

	Culture du coton	Filature	Tricotage	Confection	Lavage	Séchage et repassage
Données mesurées	0%	71,4%	80%	25%	0%	0%
Données de la littérature²⁷	15,6%	14,3%	0%	0%	13,3%	0%
Données calculées	68,8%	14,3%	20%	50%	80%	100%
Données estimées	15,6%	0%	0%	25%	6,7%	0%

Des facteurs d'incertitudes peuvent être attribués à chaque indicateur au niveau de chaque processus comme expliqué au chapitre 1 (cf. 1.5.1.2.2).

Tableau 3.3. Evaluation de la qualité des données de l'ICV des processus élémentaires selon les indicateurs définis par [152]

	Culture du coton	Filature	Tricotage	Confection	Lavage	Séchage et repassage
Fiabilité	3	1	1	1	3	3
Exhaustivité	2	2	2	2	2	2
Corrélation temporelle	4	1	1	1	2	2
Corrélation géographique	4	4	4	4	1	1

²⁷ Les données de cette catégorie sont des données trouvées dans la littérature. Par exemple, le rendement en coton-fibres à l'hectare en Chine est une donnée trouvée dans la littérature alors que la quantité d'eau d'irrigation est une donnée qui n'a pas été trouvée dans la littérature. Elle a été calculée à partir d'autres données de la littérature qui sont les conditions climatiques en Chine et le besoin en eau du cotonnier dans la région concernée.

	Culture du coton	Filature	Tricotage	Confection	Lavage	Séchage et repassage
Corrélation technologique	2	2	2	2	3	3

Les scores de 1 à 5 représentent la qualité des données de la meilleure (1) à la plus faible (5) (cf. 1.5.1.2.2).

3.3 Evaluation des impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt

Les impacts évalués dans cette étape de l'étude sont : la consommation d'eau²⁸ (exprimée en Kg), la consommation d'énergie (le pouvoir calorifique inférieur²⁹ exprimé en MJ), et les indicateurs de la méthode CML 2001 mise à jour en décembre 2007 dont la description est faite en annexe 2, à savoir :

- Le potentiel d'épuisement des ressources (ADP) exprimé en Kg Sb³⁰ équivalent
- Le potentiel d'acidification (AP) de l'air exprimé en Kg SO₂ équivalent
- Le potentiel d'eutrophisation (EP) exprimé en Kg phosphate équivalent
- Le potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau (FAETP) exprimé en Kg DCB (dichlorobenzène) équivalent
- Le potentiel de réchauffement climatique³¹ (GWP 100 ans) exprimé en Kg CO₂ équivalent
- Le potentiel de toxicité pour l'homme (HTP) exprimé en Kg DCB équivalent

²⁸ La quantité d'eau utilisée pour la production de l'énergie n'est pas prise en compte.

²⁹ Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est l'énergie thermique libérée par la réaction de combustion à l'exclusion de la chaleur de vaporisation de l'eau formée par la combustion. Cette énergie peut être entièrement récupérée si la vapeur d'eau émise est condensée. Dans ce cas, on parle de pouvoir calorifique supérieur (PCS). Le PCI est donc le rendement minimal (énergie récupérée par rapport à l'énergie libérée du combustible).

³⁰ Sb est le symbole chimique de l'Antimoine qui se trouve dans certains endroits sous forme de minerais riches.

³¹ La quantité de CO₂ absorbée par la culture du coton n'est pas prise en compte.

- Le potentiel d'écotoxicité aquatique marine (MAETP) exprimé en Kg DCB équivalent
- Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'Ozone (ODP) exprimé en Kg R11³² équivalent
- Le potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP) exprimé en Kg éthylène équivalent
- Le potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP) exprimé en Kg DCB équivalent

La méthode CML 2001 est choisie pour évaluer les impacts du cycle de vie du tee-shirt. D'une part, car il s'agit d'une approche « midpoint » afin d'éviter l'incertitude liée au passage au niveau « endpoints » en réduisant le nombre de catégories comme explicité dans le chapitre 1 (cf. 1.4.1.3). D'autre part, la méthode CML 2001 permet l'évaluation des impacts majeurs sur l'environnement tels que l'épuisement des ressources, la pollution de l'eau, la pollution de l'air et la toxicité. Par ailleurs, les indicateurs de catégories d'impacts de la méthode CML 2001 sont plus faciles à exploiter. Par exemple, la toxicité du sol est exprimée en Kg équivalent DCB dans le modèle de caractérisation de la méthode CML 2001 alors qu'elle est exprimée en m³ de sol dans le modèle de caractérisation de la méthode EDIP 1997 et en Kg équivalent triéthylène glycol (TEG) dans le sol dans Impact 2002+. Pour les autres méthodes, cette catégorie d'impact n'est pas évaluée ou bien elle est incluse dans une catégorie d'impact au niveau « endpoints ». Par exemple, dans EDIP 2003, la toxicité du sol n'est pas évaluée alors que dans Eco-indicateur, la toxicité est incluse dans la catégorie d'impact « dommages aux écosystèmes » et elle est exprimée en % d'espèce de plantes.m².an.

3.3.1 Résultats de l'ACV

L'étape de fabrication du tee-shirt consomme presque 7 fois la quantité d'eau consommée par son utilisation (figure 3.6). Ceci est dû à l'agriculture du coton qui consomme 96 % de la quantité d'eau nécessaire pour toute l'étape de fabrication du tee-shirt.

³² R11 ou aussi appelé CFC-11 (Chlorofluorocarbure) est un fluide frigorigène qui appauvrit la couche d'ozone.

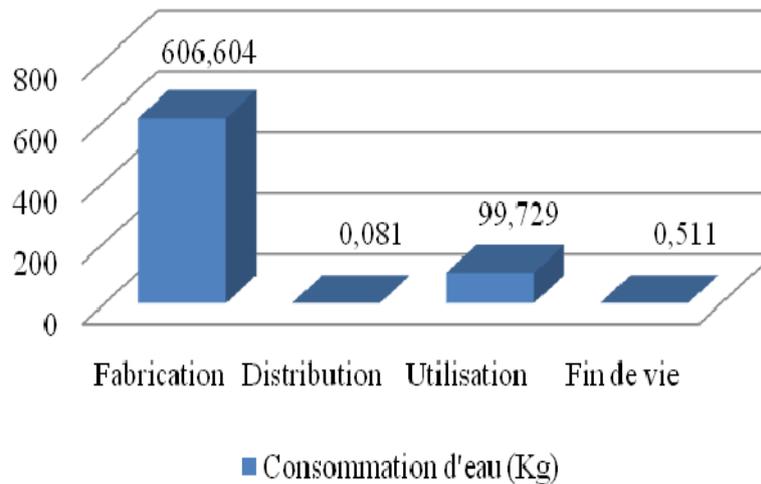


Figure 3.6. Consommation totale d'eau du cycle de vie du tee-shirt en coton

En ce qui concerne la consommation d'énergie, les deux parties les plus énergivores dans le cycle de vie du tee-shirt en coton sont l'utilisation pendant toute la durée de vie et la fabrication du tee-shirt qui engendrent la consommation de 48% chacune de l'énergie totale consommée (cf. figure 3.7). Notons que si la température de lavage augmente à 60°C (qui est une température de lavage possible pour les textiles en coton), la part de l'utilisation du tee-shirt augmente à 52% de l'énergie consommée tout au long du cycle de vie. L'étape de fin de vie consiste à incinérer le tee-shirt et récupérer l'énergie thermique évaluée à 0,24 MJ. Cette valeur n'a pas été déduite de ce graphe.

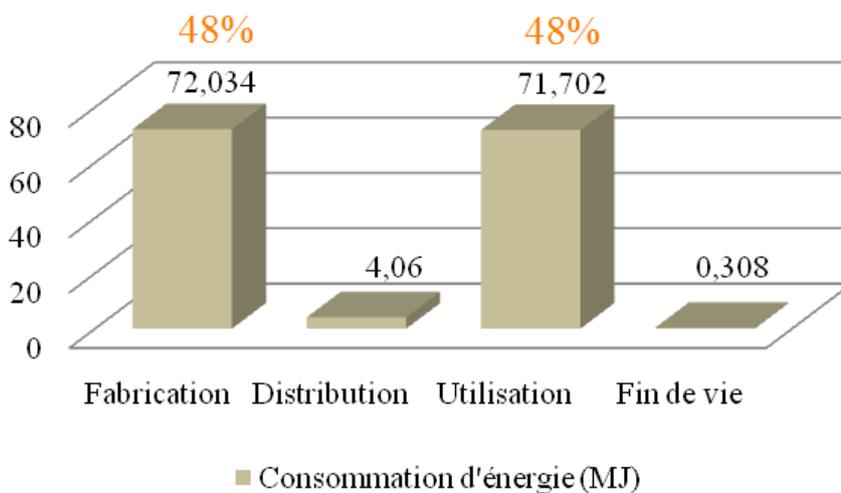


Figure 3.7. Consommation totale d'énergie du cycle de vie du tee-shirt en coton

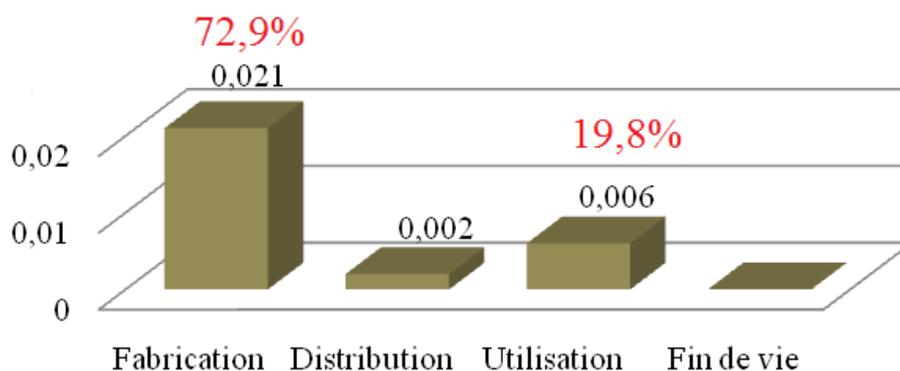


Figure 3.8. Potentiel d'épuisement des ressources (ADP) du cycle de vie du tee-shirt en coton en Kg Sb équivalent

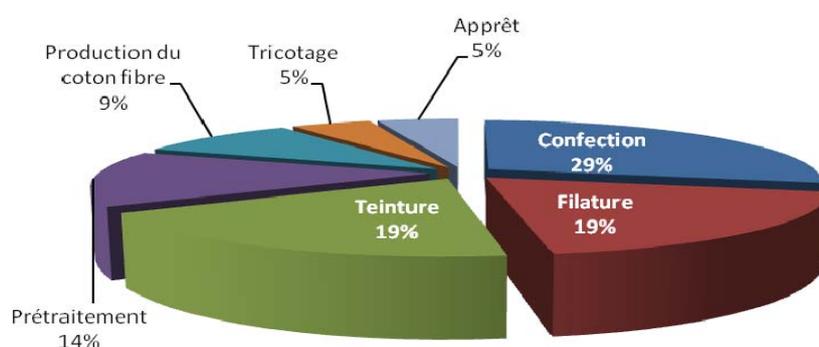


Figure 3.9. Potentiel d'épuisement des ressources (ADP) de l'étape de fabrication du tee-shirt en coton

Quant aux impacts évalués selon la méthode CML2001, l'épuisement des ressources est engendré plutôt par l'étape de fabrication (cf. figure 3.8) à 72,9%. Ceci est dû à la consommation de ressources énergétiques notamment à l'étape de confection comme explicité dans le chapitre 1 (cf. 1.5.1.2) et le montre la figure 3.9. Ici, notons la différence entre la consommation d'énergie en termes de pouvoir calorifique inférieur (PCI) (figure 3.7) et le potentiel d'épuisement des ressources (figure 3.8) qui comprend les ressources non renouvelables énergétiques en plus d'autres ressources minérales (l'[annexe A1.3](#) détaille les ressources prises en compte dans la mesure de cet impact). En effet, la part d'utilisation est évaluée à 19,8% en potentiel d'épuisement de ressources. Ceci est dû au fait que l'énergie consommée pendant l'utilisation provient du mix énergétique en France qui est constitué de 78% d'énergie nucléaire, de 11,8% d'énergie hydraulique et de très peu d'énergie fossile [73]. Ce qui génère un pouvoir calorifique élevé mais une consommation en ressource plus faible, d'où un potentiel d'épuisement de ressource plus faible. L'intérêt d'évaluer la consommation

d’énergie en PCI et en ressources est de montrer qu’une grande consommation d’énergie n’est pas toujours équivalente à une grande consommation de ressources. Il est aussi important de mentionner que les impacts des déchets de la production de l’énergie nucléaire ne sont pas évalués dans la méthode CML 2001.

La figure 3.10 permet de comparer les étapes du cycle de vie du tee-shirt coton en termes d’impacts environnementaux.

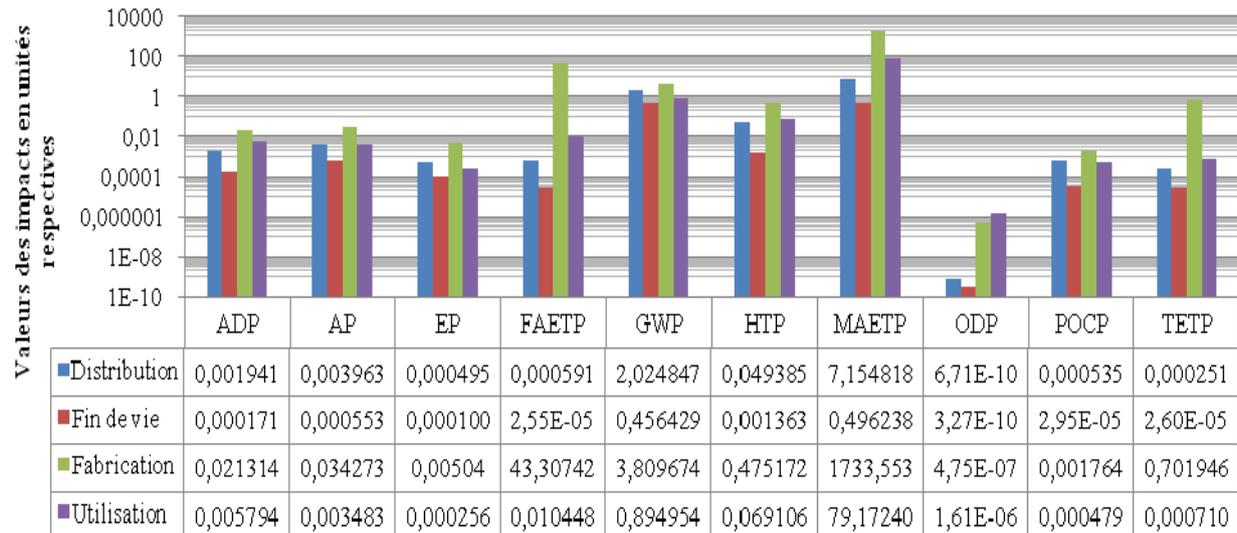


Figure 3.10. Les impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt en coton : comparaison des étapes

Pour chaque impact, la localisation des causes est analysée comme suit:

- potentiel d’acidification de l’air (AP) : la fabrication engendre 81,5% de l’impact total du cycle de vie principalement à cause de la culture du coton à 48,7% et des processus de production de l’énergie à 51% de l’impact de la fabrication , la distribution engendre 9% par les processus de transport et l’utilisation engendre 8% principalement par le processus de production de l’énergie et à moindre importance par le processus de production de la lessive.
- potentiel d’eutrophisation (EP) : engendré à 86% par l’étape de fabrication sachant que la culture du coton seule engendre 70% de l’impact total du cycle de vie entier du tee-shirt à cause des pesticides et d’engrais, puis à moindre importance (8% de l’impact total du cycle de vie entier du tee-shirt) par le transport maritime et le transport par véhicule personnel, engendrant respectivement 40% et 43% de cet impact à l’étape

distribution. L'utilisation engendre presque 4% de l'impact total du cycle de vie entier du tee-shirt principalement à cause de la production de la lessive.

- potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau fraîche (FAETP) engendrée par les émissions dans l'eau (souterraine) de la culture du coton.
- potentiel de réchauffement climatique (GWP) (figure 3.11)
 - à l'étape de fabrication dû aux processus de production de l'énergie pour les processus énergivores de la fabrication, à la culture du coton à cause des émissions, dans l'air, suite à l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides et à l'ennoblissement à cause des émissions relatives à l'utilisation de produits chimiques (principalement lors de la teinture et le débouillissage du coton).
 - à l'étape de distribution dû aux processus de transport et de production des carburants.
 - à l'étape d'utilisation dû aux processus de production de l'énergie avec une part de 17% de cet impact engendrée par la production de la lessive pour le lavage.
 - à l'étape de fin de vie du tee-shirt dû au processus d'incinération.

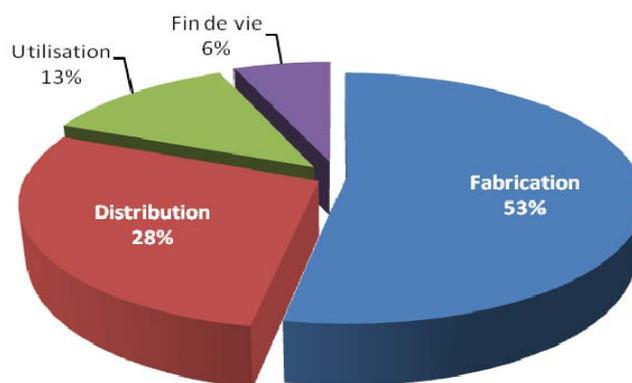


Figure 3.11. Potentiel de réchauffement climatique (GWP) : comparaison des étapes du cycle de vie du tee-shirt

- potentiel de toxicité humaine (HTP) : ceci est engendré par l'agriculture du coton et par les processus de production de l'énergie.

- potentiel d'écotoxicité aquatique marine (MAETP) : ceci est engendré principalement par les processus de production de l'énergie dans la fabrication, la distribution et l'utilisation et par le processus d'incinération.
- potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) : 77% de cet impact tout au long du cycle de vie du tee-shirt est engendré par l'utilisation à cause du processus de production de l'énergie électrique selon le mix énergétique en France.
- potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP): ceci est engendré principalement par :
 - les processus de production de l'énergie d'où un important impact des processus les plus énergivores notamment la confection, la filature, l'ennoblissement et à moindre importance le tricotage.
 - l'agriculture du coton avec une part de 18% par rapport aux étapes de la fabrication, à cause des émissions dans l'air, suite à l'utilisation des pesticides et des engrais chimiques.
- potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP): l'agriculture du coton est l'étape qui a le plus d'impact avec 99% à cause des émissions, dans le sol, suite à l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides.

Afin de mieux distinguer les impacts majeurs de chaque étape du cycle de vie du tee-shirt coton, le tableau 3.4 reprend les étapes principales à savoir la fabrication, la distribution, l'utilisation et la fin de vie ainsi que les processus élémentaires générant ces impacts.

Tableau 3.4. Localisation des impacts majeurs du cycle de vie du tee-shirt coton

Étapes principales du cycle de vie du tee-shirt	Impacts majeurs identifiés	Part de l'étape par rapport à l'impact engendré	Processus élémentaires générant les impacts majeurs
Fabrication	Potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau fraîche (FAETP)	100%	Culture du coton
	Potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP)	99%	Culture du coton

3.3 Evaluation des impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt

Etapes principales du cycle de vie du tee-shirt	Impacts majeurs identifiés	Part de l'étape par rapport à l'impact engendré	Processus élémentaires générant les impacts majeurs
	Potentiel d'écotoxicité aquatique marine	95,2%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel d'eutrophisation (EP)	86%	Culture de coton
	Potentiel d'acidification (AP)	81,6%	Culture de coton
	Potentiel de toxicité humaine (HTP)	80,1%	Culture de coton, processus de production de l'énergie
	Potentiel d'épuisement de ressources (ADP)	72,8%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP)	62,9%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	53%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	22,6%	Processus de production de l'énergie
Distribution	Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	28%	Processus de transport, processus de production des carburants
	Potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP)	19%	Processus de transport par véhicule personnel essence 1.4-2L, EURO3 ³³
	Potentiel d'acidification (AP)	10%	Processus de transport
Utilisation	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP)	77,3%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel d'épuisement de ressources (ADP)	20%	Processus de production de l'énergie, production de la lessive
	Potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP)	17%	Processus de production de l'énergie, production de la

³³ Les normes d'émissions EURO sont listées en annexe 1.

Étapes principales du cycle de vie du tee-shirt	Impacts majeurs identifiés	Part de l'étape par rapport à l'impact engendré	Processus élémentaires générant les impacts majeurs
			lessive
	Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	12%	Processus de production de l'énergie
	Potentiel de toxicité humaine (HTP)	11,5%	Processus de production de l'énergie
Fin de vie	Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	7%	Processus d'incinération

3.3.2 Imprécisions et incertitudes : analyse de sensibilité

Des incertitudes peuvent survenir tant au niveau de la réalisation de l'ICV que dans l'évaluation des impacts du cycle de vie. Ces incertitudes peuvent aussi intervenir à l'étape de définition de l'unité fonctionnelle. Plusieurs types d'incertitudes existent. En effet, il s'agit soit d'une incertitude liée au modèle, aux hypothèses et choix pris en compte, soit d'une imprécision au niveau des données à cause de la variabilité (spatiale, temporelle et technologique). Dans ces cas, l'analyse de sensibilité est indispensable pour vérifier la robustesse des résultats de l'AICV.

L'analyse de sensibilité présentée pour valider a posteriori les choix de données d'ICV et montrer l'influence de ces choix sur les résultats finaux n'est pas exhaustive. En effet, l'incertitude liée à la prise de mesures pour la filature, le tricotage et la confection ainsi que la variabilité de données de la composition de la lessive pour le lavage et de l'efficacité énergétique de la machine à laver, du sèche-linge et du fer à repasser n'ont pas été prises en compte. Cependant, les incertitudes majeures relatives aux hypothèses de l'unité fonctionnelle, à la culture du coton et au choix de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie sont illustrées dans ce qui suit.

3.3.2.1 Incertitudes relatives au choix de l'unité fonctionnelle

Pour l'unité fonctionnelle (UF) évaluée « *porter un tee-shirt pendant 30 jours pour une durée d'un an* », la durée de vie estimée du tee-shirt est exprimée en fonction du nombre de lavages égal à 30 lavages pour le segment de marché considéré. Si on détermine le flux de référence en fonction de la durée de vie du tee-shirt estimée égale à 30 lavages et des habitudes du consommateur en France : 14,4 lavages/ mois³⁴, on utilise 6 tee-shirts par an. Si, par exemple, la durée de vie du tee-shirt est augmentée à 35 lavages, le flux de référence devient 5 tee-shirts par an au lieu de 6. La variation des résultats pour une durée de vie comprise entre 27 et 31 lavages est de 0 à 5% par rapport au scénario de référence. Si la durée de vie augmente au-delà de 31 lavages, les impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt diminuent (tableau 3.5). Ceci montre que plus la qualité du tee-shirt est meilleure, plus la durée de vie est grande, plus les impacts environnementaux du cycle de vie du tee-shirt sont réduits.

Tableau 3.5. Pourcentages de variation des résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie par rapport au scénario de référence en fonction des hypothèses de choix la durée de vie estimée en nombre de lavages

Nombre de lavages	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Flux de référence (1 an)	6 tee-shirts					5 tee-shirts						
TETP	98%	99%	99%	100%	101%	84%	85%	86%	86%	87%	87%	88%
POCP	99%	99%	100%	100%	100%	84%	84%	84%	85%	85%	85%	85%
ODP	100%	100%	100%	100%	100%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%
MAETP	100%	100%	100%	100%	100%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%
HTP	99%	99%	100%	100%	100%	84%	84%	85%	85%	85%	86%	86%
GWP	99%	99%	100%	100%	100%	84%	84%	85%	85%	85%	86%	86%
FAETP	100%	100%	100%	100%	100%	84%	84%	84%	84%	84%	84%	84%

³⁴ www.scienceinthebox.com

Nombre de lavages	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Flux de référence (1 an)	6 tee-shirts					5 tee-shirts						
EP	92%	95%	97%	100%	103%	88%	90%	92%	94%	96%	98%	100%
AP	98%	99%	99%	100%	101%	84%	85%	85%	86%	86%	87%	87%
ADP	100%	100%	100%	100%	100%	83%	83%	83%	83%	83%	83%	83%

3.3.2.2 Incertitudes relatives à l'inventaire du cycle de vie

Malgré le nombre d'études d'ACV réalisées pour évaluer les produits textiles en coton (références citées en 1.5.2), les données disponibles ne sont pas forcément adéquates au scénario choisi au paragraphe précédent (3.2). En effet, la culture du coton aux Etats Unis est très différente de celle en Chine vu le climat (taux d'irrigation artificielle), la nature du sol (rendement, insectes et maladies attaquant la plante, etc.). L'analyse de sensibilité des données de l'ICV issues de l'adaptation des données disponibles de la culture du coton aux Etats Unis en fonction de certains facteurs liés à l'agriculture du coton en Chine comme explicité en 3.2.2 est présentée dans la figure 3.12 suivante.

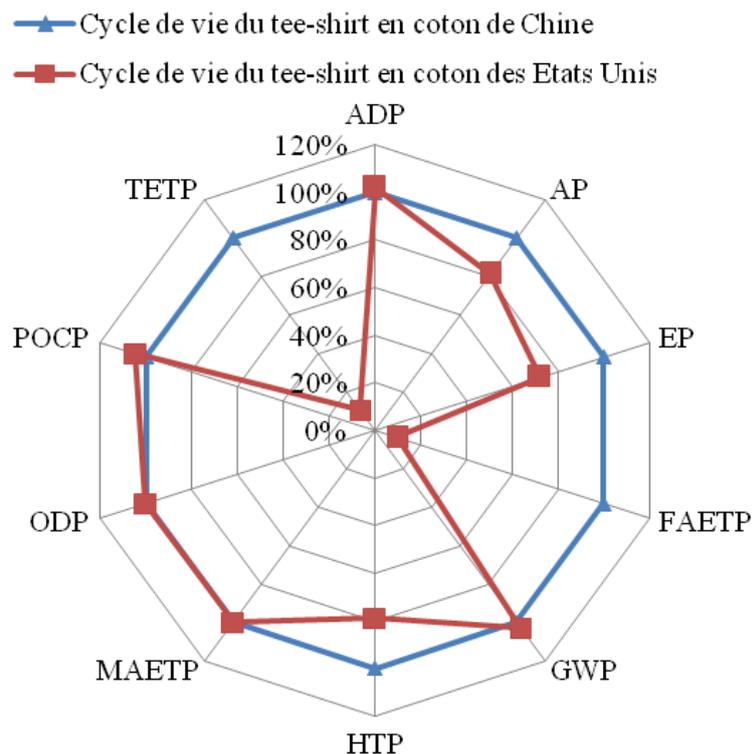


Figure 3.12. Analyse de sensibilité des résultats par rapport aux données de l'ICV de l'étape de production des fibres

Les variations majeures, comme on peut le prédire à partir de la comparaison faite dans le tableau 3.1 du paragraphe 3.2.2, concernent les potentiels d'écotoxicité terrestre et aquatique de l'eau fraîche qui sont 10 fois moins élevés aux Etats Unis qu'en Chine vu les quantités moins importantes utilisées d'engrais chimiques et de pesticides. Les potentiels d'acidification, d'écotoxicité humaine et d'eutrophisation sont entre 20 et 30 % plus faibles pour l'agriculture du coton aux états unis selon les données d'ICV de la base de données US LCI [109] et les données calculées pour la Chine. Les potentiels d'épuisement de ressources et de la création de l'ozone photochimique sont légèrement plus élevés, entre 2 et 4%, pour l'agriculture du coton aux Etats Unis qu'en Chine. Ceci est expliqué par le fait que la quantité d'énergie considérée à l'hectare est supposée égale alors que le rendement en Chine est supérieur ce qui amortit la quantité d'énergie utilisée pour fabriquer un tee-shirt.

Certes, cette analyse de sensibilité montre bien l'influence des données choisies pour l'ICV sur les résultats et l'importance de la corrélation géographique en choisissant a priori ces données. Cependant, à cause de la variation des résultats, on ne peut pas valider a posteriori les données.

L'étape de production des fibres comprend un autre type de variabilité, à savoir l'affectation (ou l'imputation) des impacts de l'agriculture non pas à 100% à la fibre mais plutôt à 84% puisqu'elle n'est pas le seul produit valorisé de cette activité comme illustré au paragraphe 1.5.1.2. Cette règle d'affectation étant économique, se base sur le prix de vente des fibres et du pourcentage d'égrenage. Ces deux paramètres sont variables en fonction du cours de la fibre et en fonction de la méthode d'égrenage utilisée. [90] n'a pas pris en compte cette règle d'affectation car la valorisation récente du coproduit qui est la graine n'était pas encore connue. Tandis que [91] et [147] ont considéré que cette affectation doit être considérée ce qui est bien cohérent avec les principes de la norme ISO 14040. En revanche, les facteurs d'affectations respectivement considérés sont 0,85 et 0,82 ce qui révèle une incertitude supplémentaire à ce niveau.

L'analyse de sensibilité représentée dans la figure 3.13 ci-dessous montre l'influence du choix de l'affectation sur les résultats de l'évaluation des impacts du cycle de vie du tee-shirt. En effet, une variation de 7%, 12, 3%, 18,5 et 18,4% est observée respectivement au niveau des potentiels d'acidification, d'eutrophisation, d'écotoxicité aquatique et terrestre. Les autres résultats demeurent presque stables.

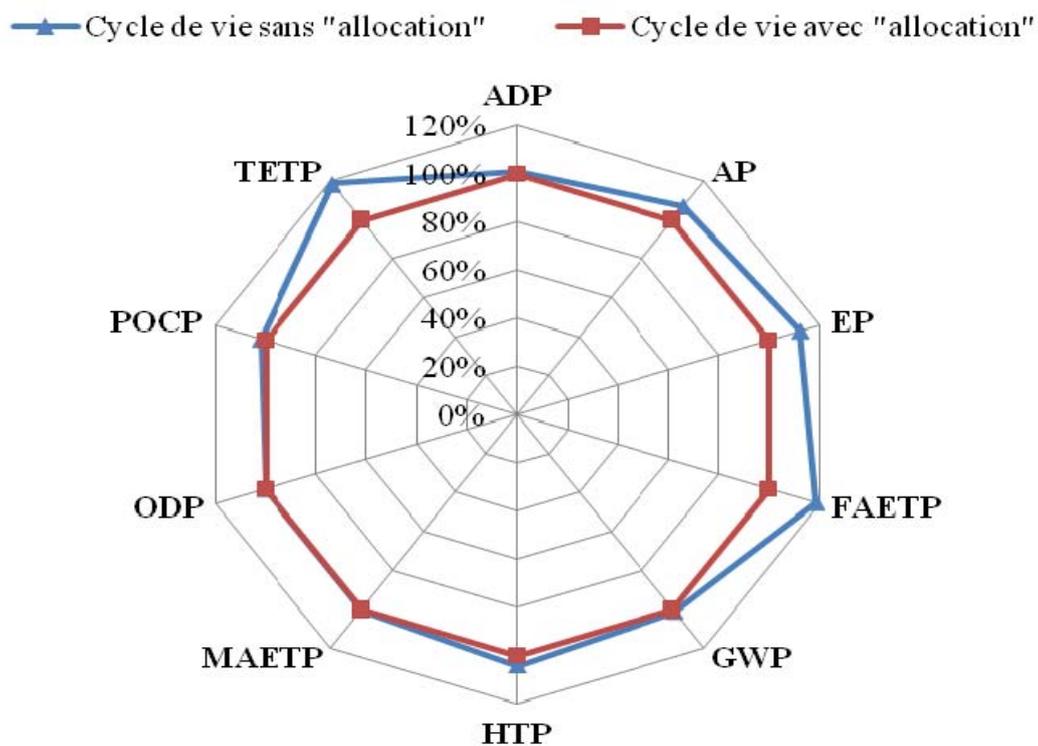


Figure 3.13. Comparaison des résultats en tenant en compte la règle d'affectation fibres/graines de coton

L'incertitude évaluée par l'analyse de sensibilité au niveau de l'étape d'utilisation concerne la température de lavage du tee-shirt coton et par conséquent la variabilité de la quantité d'énergie utilisée dans l'ICV. En effet, le coton peut être lavé à 60°C (En France 21% du linge est lavé à cette température³⁵). En passant de 40°C à 60°C, on multiplie par 1,8 la quantité d'électricité consommée [12]. Ceci augmente le potentiel de création de l'ozone photochimique de 13% à cause du processus de production de l'électricité nécessaire pour le lavage du tee-shirt tout au long de sa durée de vie. Le reste des impacts restent presque stables.

3.3.2.3 *Choix de la méthode d'analyse des impacts du cycle de vie*

Les résultats de l'évaluation environnementale varient aussi selon la méthode d'évaluation choisie. Ceci revient à la variation au niveau du modèle de caractérisation de ces méthodes. Le choix des impacts évalués ci-après et des méthodes est basé sur la comparabilité des modèles de caractérisation des méthodes d'AICV. En effet, les résultats des méthodes d'évaluation au niveau « endpoint » telles qu'Eco-indicateur 99 ne sont pas comparables à ceux des méthodes d'évaluation « midpoint » telle que CML 2001. De ce fait, les méthodes comparées dans ce qui suit sont : CML2001, EDIP 1997, EDIP 2003, IMPACT 2002+ (I02+) et TRACI. Les impacts évalués par ces méthodes dans une approche « midpoint » sont le potentiel de réchauffement climatique, le potentiel d'acidification, le potentiel de création de l'ozone photochimique, le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone et le potentiel d'eutrophisation. En ce qui concerne les autres impacts, la catégorie n'est pas modélisée dans ces méthodes d'AICV et parfois le modèle de caractérisation n'est pas le même. Par exemple, le potentiel d'épuisement de ressources calculé dans la méthode CML 2001 en Kg Sb équivalent, n'est pas modélisé dans les autres méthodes. Le potentiel d'écotoxicité terrestre calculé en Kg équivalent dichlorobenzène dans la méthode CML2001 est calculé dans la méthode IMPACT 2002+ en Kg équivalent triéthylène glycol (TEG) émis dans le sol.

³⁵ www.scienceinthebox.com

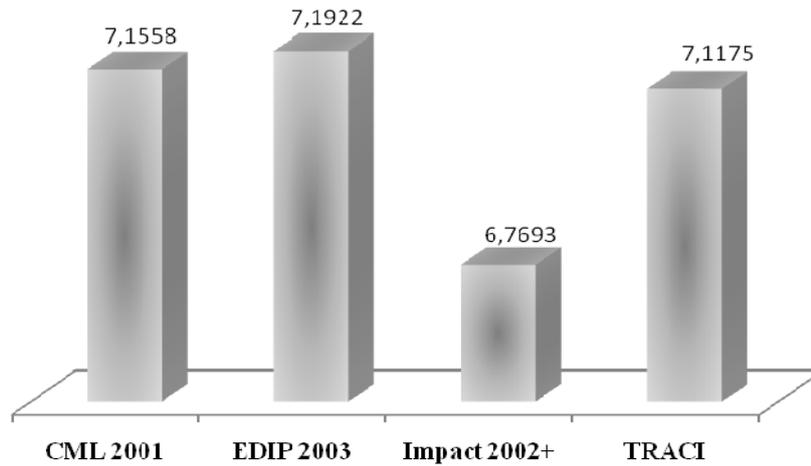


Figure 3.14. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, IMPACT 2002+ et TRACI pour l'évaluation du potentiel de réchauffement climatique en Kg CO₂ équivalent

Cette comparaison (figure 3.14) montre qu'il n'y a pas de variation importante au niveau des résultats selon les méthodes CML 2001, EDIP 2003 et TRACI. La valeur trouvée par la méthode IMPACT 2002+ est inférieure car la durée d'évaluation de l'impact de réchauffement climatique est fixée à 500 ans ce qui amortit l'impact par rapport à la durée de 100 ans prise en compte dans les autres méthodes.

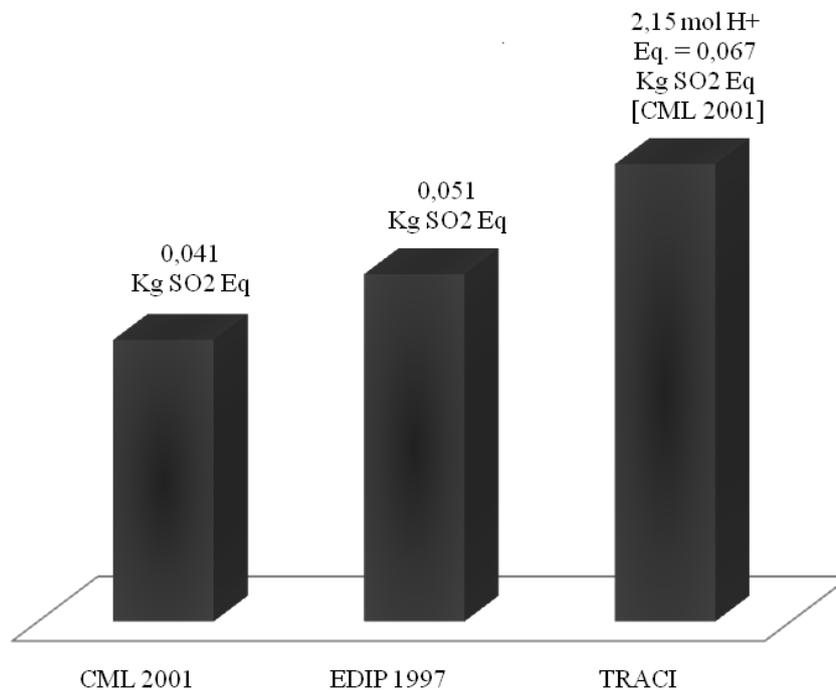


Figure 3.15. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 1997 et TRACI pour l'évaluation du potentiel d'acidification

La différence des résultats de l'évaluation du potentiel d'acidification entre ces trois méthodes (figure 3.15) est entre 13% et 62%.

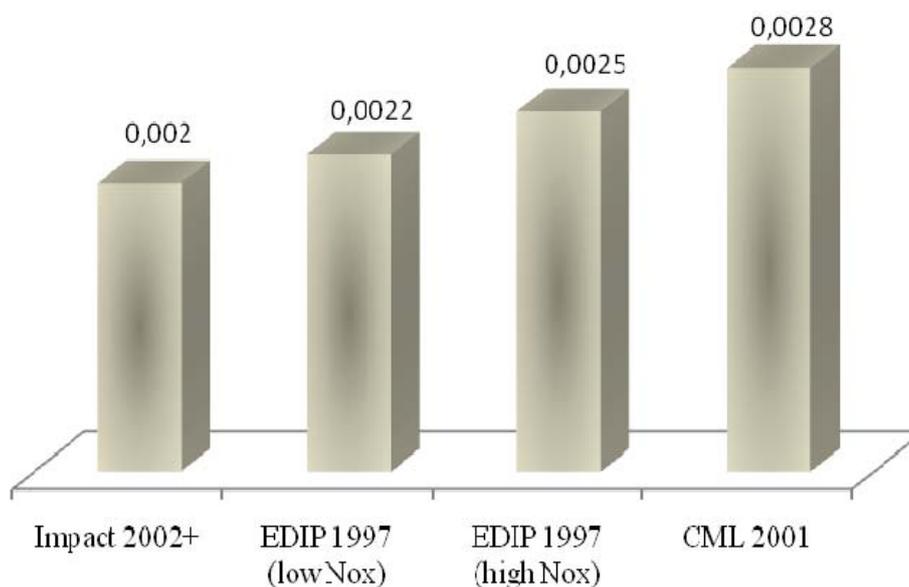


Figure 3.16. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 1997 et IMPACT 2002+ pour l'évaluation du potentiel de création de l'ozone photochimique en Kg C₂H₄ équivalent

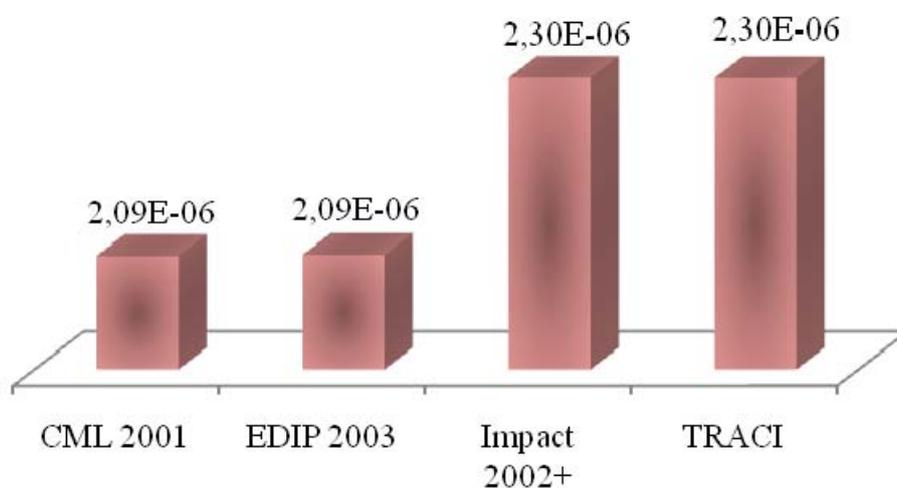


Figure 3.17. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, TRACI et IMPACT 2002+ pour l'évaluation du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone en Kg R11 équivalent

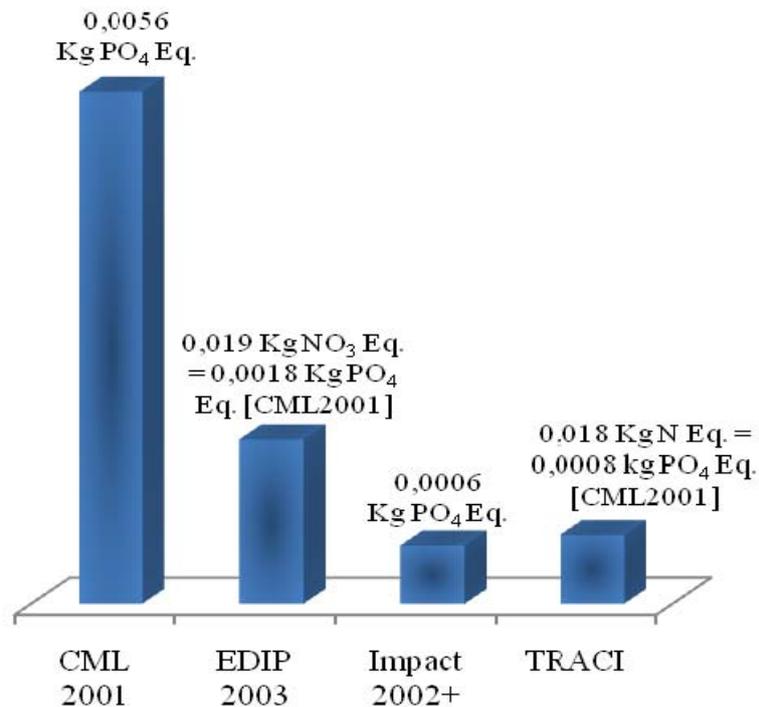


Figure 3. 18. Comparaison des méthodes CML 2001, EDIP 2003, IMPACT 2002+ et TRACI pour l'évaluation du potentiel d'eutrophisation en Kg phosphate équivalent

Les trois dernières figures (3.16, 3.17 et 3.18) montrent qu'il y a une différence entre les méthodes CML 2001, EDIP 1997 ou 2003, IMPACT 2002+ et TRACI au niveau des résultats de l'évaluation des potentiels de création de l'ozone photochimique, de l'appauvrissement de la couche d'ozone et surtout de l'eutrophisation. Ceci est dû à l'absence ou la différence des facteurs de caractérisation de certaines méthodes. Par exemple, l'ammoniaque émis dans l'eau fraîche de la culture du coton n'est pas pris en compte dans le modèle de caractérisation du potentiel d'eutrophisation de la méthode IMPACT 2002+ alors qu'un kilogramme d'ammoniaque émis dans l'eau fraîche est considéré équivalent à 0,2 Kg phosphate dans la méthode EDIP 2003, équivalent à 0,33 dans la méthode CML2001 et à 0,32 dans la méthode TRACI.

L'évaluation des étapes du cycle de vie par plusieurs méthodes d'AICV est aussi différente comme le montre la figure 3.19 suivante :

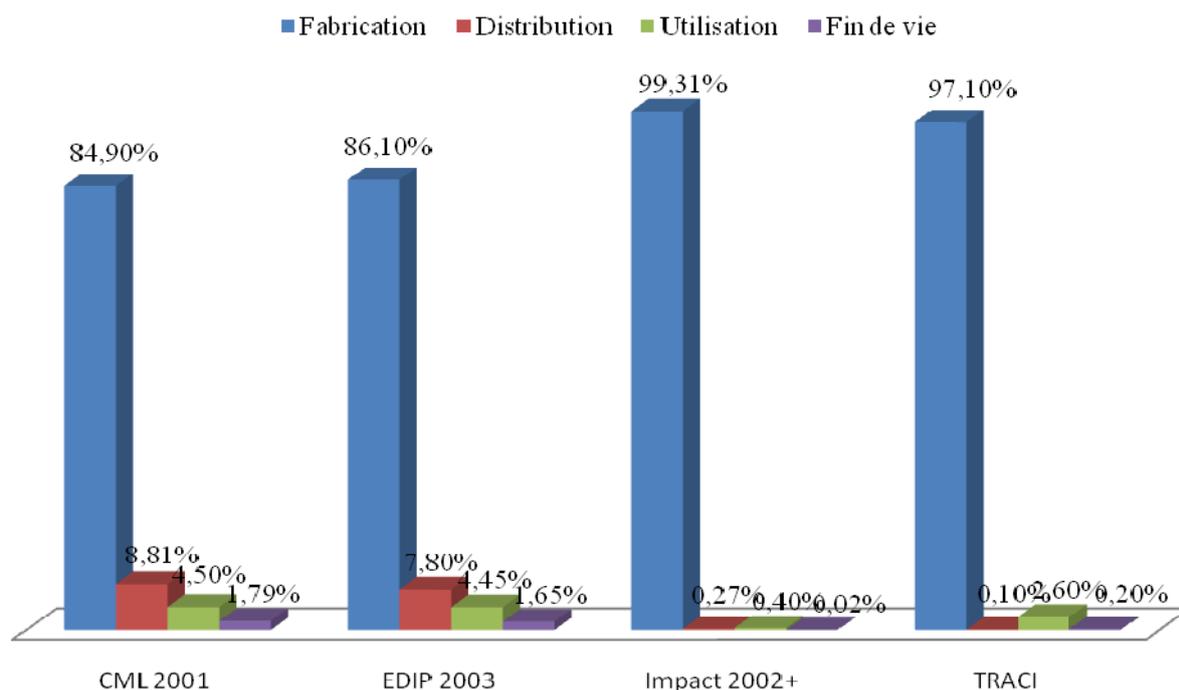


Figure 3.19. Comparaison des parts de chaque étape du cycle de vie du tee-shirt dans le potentiel d'eutrophisation par différentes méthodes d'AICV

L'évaluation environnementale du scénario de référence est basée sur une analyse quantitative détaillée par le biais de la méthode d'analyse du cycle de vie. La réalisation de cet exercice ainsi que les résultats obtenus constituent une partie du chapitre suivant. En ce qui concerne l'évaluation sociale de ce scénario, une analyse qualitative basée sur une liste d'indicateurs est réalisée dans la section suivante. Un exemple est illustré en comparant deux lieux de production de textiles.

3.4 Prise en compte des critères sociaux liés aux pays de production

La filière textile est aussi caractérisée par l'importance des impacts sociaux, notamment ceux listés dans le paragraphe 1.3 et dont l'évaluation quantitative par l'ACV reste encore à une étape précoce de développement. Dans ce qui suit une analyse sociale est illustrée en se basant sur certains indicateurs qu'on appellera aussi critères tels que le salaire, le niveau de vie, le temps de travail et les conventions de l'OIT.

Le choix des critères évalués ci-après est basé sur les données disponibles dans la littérature (rapports d'audits sociaux, articles des ONG, conventions de l'OIT, etc.). Relativement au scénario de référence du tee-shirt, le pays de production textile est la Chine où 19 millions d'employés travaillent dans le secteur textile (ce qui correspond à 71% des employés dans ce secteur dans le monde [75]). L'évaluation des aspects sociaux est différente d'un pays à un autre. Afin d'illustrer cette variabilité, le tableau 3.6 ci-dessous consiste à comparer l'état existant des aspects sociaux de l'industrie textile en Chine et en Turquie qui est le quatrième fournisseur de vêtements dans le monde (en 2002). En 2004, le secteur du textile et de l'habillement représente 11% de l'emploi total et 30% de l'emploi industriel³⁶.

Les critères choisis sont :

- le salaire net en euros par mois : la référence étant le salaire minimum légal fixé par les autorités locales, l'évaluation de ce critère est basée sur la comparaison avec l'état existant observée dans l'industrie textile. Par exemple, en Chine, le salaire mensuel moyen en période de pointe d'un travailleur de l'habillement dans une entreprise privée détenue partiellement ou totalement par des investisseurs étrangers varie entre 44 et 112 euros par mois. La valeur retenue pour l'évaluation est la moyenne de 78 euros par mois, sachant que la période d'arrêt de travail pendant la basse saison qui n'est pas payée, n'est pas prise en compte.
- les dépenses d'une personne en euros par mois : ce critère permet de juger le salaire perçu suffisant ou pas. L'évaluation de ce critère consiste à calculer les dépenses mensuelles moyennes en termes de nourriture, hygiène corporelle, vêtement et logement.
- le temps de travail en nombre d'heures par mois : l'évaluation de ce critère consiste à comparer le temps de travail légal et le temps de travail observé dans les entreprises textiles.
- certaines conventions de l'OIT à savoir la convention n°155 sur la sécurité et la santé des travailleurs, la convention n°87 sur la liberté syndicale, la convention n°98 sur le droit d'organisation et de négociation collective, la convention n°138 sur l'élimination du travail des enfants, la convention n°29 sur le travail forcé, la convention n°111 sur la discrimination (emploi et profession) et la convention n°100 sur la légalité de rémunération. L'évaluation de ces critères est basée sur la ratification des conventions par le pays concerné. La ratification

³⁶ www.ec.europa.eu

de certaines conventions n'implique pas forcément la bonne application de leurs principes. En effet, les observations de l'état existant permettent une évaluation plus réaliste de ces critères. Par exemple, la convention n°155 sur la sécurité et la santé des travailleurs a été ratifiée par la Chine. Cependant, il a été constaté qu'il n'y a pas d'équipements de protection ni de communication sur les mesures de sécurité des travailleurs et que des accidents de travail ont eu lieu dans des entreprises textiles. En ce qui concerne la convention n°138 sur l'élimination du travail des enfants, le travail des jeunes filles est difficilement évaluable car les conditions sociales telles que la pauvreté imposent cette situation.

- la veille sur l'engagement social des entreprises textiles : l'évaluation de ce critère est liée aux législations, aux normes et aux organismes existant dans le pays concerné.

Tableau 3.6. Evaluation des critères sociaux selon le pays de production

Critères sociaux	Chine		Turquie	
	Loi / Convention	Etat existant observé	Loi / Convention	Etat existant observé
Salaire net en €/ mois	39,85 ³⁷	78 [79]	161,21 [85]	207 [85]
Dépenses d'une personne €/mois		35 [79]		298,19 [85]
Temps de travail h/ mois	156 ³⁸	336,5 [79]	225 [85]	288 [85]
Convention sur la sécurité et la santé des travailleurs (convention de l'OIT n°155)	OUI	accidents de travail, absence d'équipements de protection, et manque de communication sur les mesures de sécurité [79, 155]	OUI	assistance médicale, mesures de sécurité, pas d'accidents de travail graves à part les chocs électriques [86]
La liberté syndicale (convention de l'OIT n°87)	NON		OUI	
Le droit d'organisation et de négociation collective (convention de l'OIT n°98)	NON		OUI	

³⁷ <http://www.chinalaborwatch.org/>

³⁸ Article 41 de la loi de travail en Chine <http://www.china-labour.org.hk>

3.4 Prise en compte des critères sociaux liés aux pays de production

Elimination du travail des enfants (convention de l'OIT n°138)	OUI	jeunes filles âgées de 14 à 16 ans qui ont fuit la pauvreté de leur village, job d'été ou apprentissage, salaire inférieur et pas de contrat [79]	OUI	Le pourcentage d'emploi des enfants âgés de 6 à 11 ans est de 1,3 % en 1994. 35% des jeunes filles qui travaillent ont choisi l'industrie textile contre 14% des garçons travailleurs. [81]
Travail forcé (convention de l'OIT n°29)	NON		OUI	
Discrimination (emploi et profession) (convention de l'OIT n°111)	NON		OUI	
Egalité de rémunération (convention de l'OIT n°100)	OUI		OUI	
Normes, législations, organismes d'audits / RSE	OUI	Nouvelle loi de travail + CSC9000T (Norme de RS chinoise), comité de H&S [79]	OUI	SA8000, Compagnes vêtements propres, Fair Wear Foundation (FWF), Ethical Trading Initiative (ETI), Fair Labelling Organisation (FLO), Fair Labour Association (FLA), Consortium des droits de travailleurs [86]

Dans l'attente de la définition des critères sociaux par les spécialistes dans le domaine tels que les laboratoires de recherche en sociologie et la prise en compte de ces critères par les normes par exemple, l'évaluation des aspects sociaux telle qu'elle vient d'être présentée est une démonstration de l'importance de ces impacts et leur prise en compte dans le choix du meilleur scénario de production du point de vue développement durable. Néanmoins, plusieurs faiblesses se présentent notamment l'incertitude des données sur lesquelles l'évaluation a été basée telles que le salaire réel perçu, le temps de travail effectif et les conditions de travail dans les entreprises textiles. De ce fait, dans ce qui suit, cette évaluation n'est pas prise en compte dans le choix du meilleur scénario du point de vue développement durable.

3.5 Conclusion

La réalisation de l'analyse du cycle de vie du tee-shirt détaillée dans ce chapitre a pour objectif :

- d'illustrer l'application de cet outil dans la filière textile et les différents problèmes à résoudre dans ce cadre à savoir l'indisponibilité et la variabilité des données ;
- de montrer l'importance de la vérification de la robustesse des résultats par rapport à plusieurs types d'incertitudes liées aux méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie en plus de l'imprécision des données ;
- de poser la question de recherche dont la réponse est donnée dans le chapitre suivant: comment compléter cette méthodologie pour aboutir à une interprétation facile fondée sur une approche scientifique tenant compte des incertitudes évoquées précédemment.

En ce qui concerne l'évaluation des impacts sociaux, plusieurs questions s'imposent, faut-il quantifier cet impact ? Sur quels repères doit-on se baser ? Les réponses pertinentes à cette question ne peuvent être données que par les spécialistes du domaine social.

L'ACV du tee-shirt en 100% coton réalisée dans ce chapitre permet de localiser *les impacts majeurs de chaque étape du cycle de vie* d'un produit représentatif de l'industrie textile de l'habillement. En effet, les étapes les plus impactant sont la fabrication et à moindre importance, l'utilisation. Malgré l'étendue géographique de la chaîne d'approvisionnement, la

distribution a une part de 28% seulement du cycle de vie du tee-shirt dans le potentiel de réchauffement climatique qui est l'impact majeur de cette étape. En ce qui concerne l'étape de fin de vie, les impacts sont négligeables et la récupération de l'énergie constitue un point positif.

Les résultats de l'évaluation permettent aussi de déterminer *les causes des impacts majeurs* à savoir la culture du coton conséquente sur les potentiels d'écotoxicité aquatique et terrestre et les processus de production de l'énergie engendrant plusieurs impacts aux étapes de fabrication et d'utilisation. Finalement, la consommation excessive de l'énergie peut avoir des impacts différents selon la source de l'énergie. En effet, l'utilisation consomme une quantité presque égale à celle consommée par la fabrication. Cependant, les impacts engendrés ne sont pas les mêmes car le mix énergétique est différent : l'utilisation engendre 77,3% du potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone alors que les impacts majeurs dus à la production de l'énergie pour la fabrication sont les potentiels d'épuisement des ressources, de réchauffement climatique et d'écotoxicité aquatique marine.

Se focaliser sur un seul produit textile, à savoir le tee-shirt en 100% coton, n'implique pas l'existence d'une modélisation unique. En effet, pour un même produit textile, des centaines de scénarios sont possibles et par conséquent, les résultats de l'évaluation environnementale et sociale sont différents. La diversité des scénarios textiles pour un même produit est illustrée dans le chapitre suivant. La comparaison d'un nombre important de scénarios du cycle de vie d'un produit textile n'est pas toujours triviale. En effet, en se basant sur les résultats de l'évaluation des impacts environnementaux par l'ACV de certains exemples, la prise de décision pour choisir le meilleur scénario est compliquée vu l'hétérogénéité des impacts pris en compte et l'inaptitude à juger la gravité des écarts au niveau de ces critères. D'où le besoin d'appliquer une méthode d'aide multicritère à la décision pour interpréter les résultats de l'ACV et aboutir à une évaluation concluante du point de vue environnemental.

Chapitre 4

L'aide multicritère à la décision pour le classement des scénarios selon les critères du développement durable

Sommaire

4.1	Introduction	141
4.2	Diversité des scénarios du cycle de vie du tee-shirt	141
4.2.1	Scénarios possibles de fabrication	143
4.2.2	Résultats de l'ACV de quelques exemples de produits	148
4.2.2.1	Diversité par fibre	149
4.2.2.2	Diversité par filature	150
4.2.2.3	Diversité par tricotage	154
4.2.2.4	Diversité par Apprêts	156
4.2.2.5	Scénarios analysés	157
4.3	Définition du modèle de décision	161
4.3.1	Choix des critères	161
4.3.2	Choix des seuils de préférence et d'indifférence pour chaque critère	162
4.3.3	Pondération des critères	163
4.4	Résultats du surclassement	165
4.4.1	Pondérations égales des critères	165
4.4.2	Pondération double du critère GWP	168
4.4.3	Pondération selon l'importance relative de l'impact maximal	170
4.5	Conclusion	174

4.1 Introduction

L'évaluation environnementale par l'ACV est sujette à une multitude d'incertitudes, imprécisions et variabilités qui se conjuguent avec la diversité des matières, des procédés textiles, des lieux de production, des stratégies d'approvisionnement, des usages et même des solutions de gestion de la fin de vie des produits telle qu'évoquée au chapitre 1.

Ce chapitre illustre la diversité des scénarios de production textile, évalue les impacts environnementaux de certains exemples de scénarios du cycle de vie du tee-shirt dans la section 4.2 et aide au choix de scénario dans les sections 4.3 et 4.4. Pour ce faire, l'utilisation d'une méthode de surclassement à savoir PROMETHEE I est expliquée dans ce qui suit. Le modèle de décision est constitué des alternatives qui sont les scénarios sélectionnés du cycle de vie du tee-shirt, les critères qui sont les impacts environnementaux de ces scénarios calculés par la méthode CML 2001, la fonction de préférence linéaire entre deux seuils définis en fonction du problème et les poids des critères qui sont discutés en fin de ce chapitre.

4.2 Diversité des scénarios du cycle de vie du tee-shirt

La section suivante décrit la manière de faire varier les scénarios de production textile et illustre cette diversité pour un même produit qui est le tee-shirt. En effet, la diversité des scénarios du cycle de vie du produit textile peut intervenir au niveau de toutes les étapes à savoir la fabrication (de la fibre au produit fini), la distribution, l'utilisation et la fin de vie. Les résultats de l'ACV du tee-shirt en coton montrent que les étapes ayant plus d'impacts sur l'environnement sont la fabrication et l'utilisation. Certes, la distribution n'a pas un impact négligeable. Cependant la diversité de ses scénarios est directement liée à la stratégie de Sourcing des donneurs d'ordre dans le domaine textile et à la méthode de gestion des approvisionnements. La réduction des impacts environnementaux de cette étape, revient donc à réduire les distances parcourues pour l'acheminement de la marchandise. Du point de vue cycle de vie, le choix du meilleur scénario (compromis entre les lieux de production et la stratégie de gestion des approvisionnements) consiste aussi à évaluer l'étape de fabrication qui peut être différente d'un pays à un autre en ce qui concerne le mix énergétique, l'aspect technologique, l'efficacité énergétique des machines, etc. Quant à l'étape d'utilisation, la réduction des impacts revient à bien choisir la composition de la lessive et à ne pas dépasser

les quantités recommandées, à réduire la température de lavage, à préférer le séchage à l'air ambiant et à bien choisir les machines économiques car une grande différence de consommation d'eau et d'énergie peut avoir lieu comme le montre le tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1. Réduction de la consommation d'eau et d'énergie par l'amélioration technologique des machines à laver [120]

Année de construction	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2004
Consommation d'énergie (KWh/Kg)								
30°C	0,18	0,16	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07
40°C	0,29	0,26	0,22	0,18	0,15	0,13	0,12	0,11
60°C	0,53	0,47	0,40	0,34	0,27	0,23	0,22	0,20
90°C	0,87	0,76	0,65	0,55	0,44	0,38	0,36	0,32
Consommation d'eau (L/Kg)								
Pour toute température	39,9	35,2	30,6	25,9	21,2	15,8	12,1	9,7

Du point de vue cycle de vie, la réduction des impacts de l'étape d'utilisation consiste aussi à prendre en compte l'étape de fabrication puisque certains choix notamment du cycle de lavage et de la température de repassage et de séchage dépendent de la matière utilisée et des processus de fabrication.

L'étape de fabrication engendre une grande partie des impacts environnementaux du cycle de vie du produit textile comme le montre le tableau 3.4 du paragraphe 3.3.1. En outre, les choix considérés à cette étape doivent être pris en compte pour choisir les scénarios diversifiés au niveau de la distribution ou l'utilisation ayant les impacts environnementaux les plus bas. Dès lors, la diversité des scénarios de cette étape est illustrée dans ce qui suit et une comparaison de certains scénarios est réalisée au chapitre 4 afin de montrer l'influence de ces variations sur la prise de décision dans l'optimisation du cycle de vie du produit textile notamment du tee-shirt. L'incinération, avec récupération de l'énergie, du produit textile en fin de vie étant considérée, dans ce cas, comme une étape compensatoire du cycle de vie, la diversité qui y est liée n'est pas présentée.

4.2.1 Scénarios possibles de fabrication

Certains procédés et produits sont choisis en fonction de la fibre traitée puisque les fibres disponibles n'ont pas les mêmes caractéristiques (par exemple le coton, à base de cellulose qui est un polymère naturel est hydrophile alors que le polyester qui est à base de polyéthylène téréphtalate qui est un polymère synthétique est hydrophobe), donc ils n'ont pas les mêmes réactions chimiques notamment avec les colorants et les produits de fonctionnalisation. Les procédés de fabrication du fil dépendent aussi de la fibre. Il s'agit de la polymérisation et du filage pour les fibres artificielles et synthétiques alors qu'il s'agit de l'agriculture et l'élevage pour les fibres végétales et animales. Les procédés de prétraitements sont différents d'une fibre à l'autre. Par exemple, le débouillissage pour éliminer les cires, pectines, et protéines est spécifique au coton. Pour résumer cette diversité, le tableau 4.2 ci-dessous liste les principales étapes de la fabrication qui varient en fonction de la fibre utilisée. Il est à noter que les étapes de l'ennoblissement, qui sont présentées au niveau étoffe ci-après, peuvent être effectuées au niveau du fil.

Tableau 4.2: Diversité des procédés de fabrication en fonction de la fibre

		Fibres naturelles				Fibres artificielles			Fibres synthétiques		
		CO	Lin	WO	Soie	VI	Lyocell	AC	PES	PA	PAC
Fabrication des fibres	Agriculture	X	X								
	Elevage			X	X						
	Extraction de la cellulose					X	X	X			
	Polymérisation à partir du pétrole								X	X	X
Fabrication du fil	Filage					X	X	X	X	X	X
	Filature	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fabrication de l'étoffe (tissage ou tricotage)											

		Fibres naturelles				Fibres artificielles			Fibres synthétiques		
		CO	Lin	WO	Soie	VI	Lyocell	AC	PES	PA	PAC
Ennoblement: prétraitements	Flambage	X									
	Mercerisage	X									
	Désencollage – désensimage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Débouillissage	X									
	Blanchiment	X		X					X	X	X
	Carbonisage			X							
	Thermo-fixation								X	X	X
	Alcalinisation								X		
Teinture: colorants	Acides			X	X					X	
	Directs	X	X			X	X				
	Dispersés							X	X	X	
	Réactifs	X	X			X					
	Cationiques	X		X							X
	De cuve	X									
Teinture: machines	Overflow	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Autoclave (beam)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Jigger	X	X	X		X	X	X	X	X	X

		Fibres naturelles				Fibres artificielles			Fibres synthétiques		
		CO	Lin	WO	Soie	VI	Lyocell	AC	PES	PA	PAC
	Par jet	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Foulard	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Produit de fonctionnalisation	Adoucissage	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Antistatique								X	X	X
	Infroissabilité	X	X	X	X	X	X	X			
	Anti-tâche	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Ignifugation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Confection											

CO : coton, WO : laine, VI : viscose, PES : polyester, PA : polyamide, PAC : Acrylique

La diversité au niveau de l'étape de fabrication ne concerne pas seulement les produits utilisés (colorants, produits auxiliaires, produits de fonctionnalisation, etc.) mais aussi les procédés. En effet, certains procédés de la filature tels que le peignage sont spécifiques aux fibres naturelles (pour éliminer les fibres courtes dans le but d'améliorer la qualité du fil). En ce qui concerne le matériel de la teinture, le choix dépend de certains paramètres tels que la matière à teindre (bourre, filés en bobines ou en écheveaux, tissus, tricots, articles confectionnés), le mode de teinture (discontinu, contexture, pénétration dans le bain), la nature de la matière à teindre (résistance, contexture, pénétration dans le bain) et le colorant utilisé. Quant à la fabrication de l'étoffe, le choix du procédé dépend plutôt du produit fini (à base de tricot ou de tissu). La figure 4.1 suivante illustre la diversité des scénarios possibles pour un produit textile de l'habillement. Ces choix sont représentés par l'ensemble de tous les traits de liaison entre les différents procédés. Une sélection des scénarios possibles d'un tee-shirt en 100% coton est représentée par l'ensemble des traits noirs plus épais. En calculant le nombre de combinaisons possibles des choix au niveau de chaque étape de la fabrication, d'un même

produit textile à savoir le tee-shirt en 100% coton, 720 scénarios de fabrication sont possibles si on considère la diversité au niveau de la fibre de coton concernant le type d'agriculture (le coton bio ou en anglais « organic cotton » et le coton génétiquement modifié ou en anglais « biotechnological cotton »).

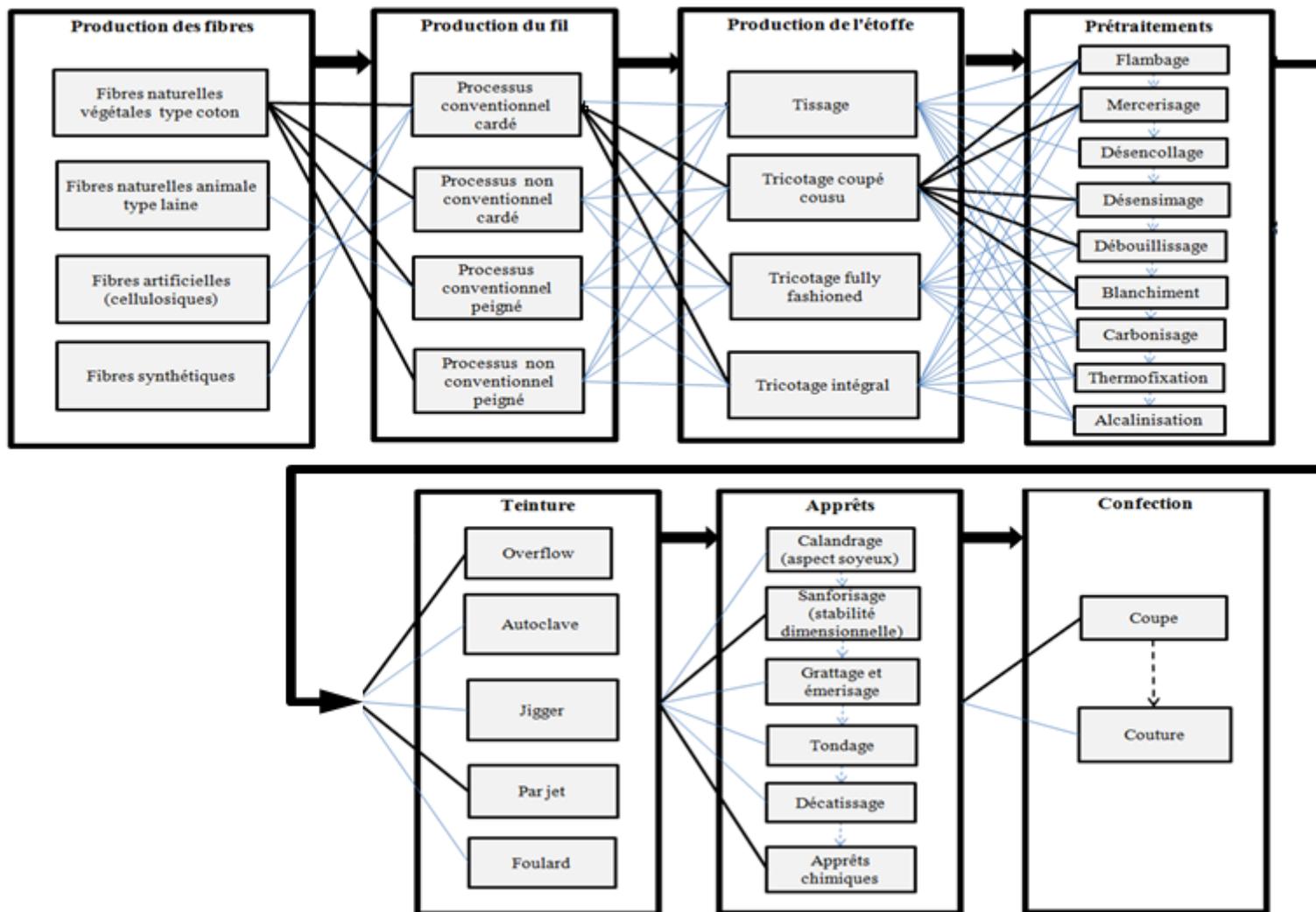


Figure 4. 1. Diversité des scénarios de fabrication d'un produit textile, le tee-shirt coton

L'évaluation environnementale par l'ACV de ces scénarios peut révéler des impacts différents d'où la complexité de la prise de décision pour choisir un scénario du point de vue environnemental. Dans ce qui suit, les résultats de l'ACV de quelques exemples appuient l'importance de la prise en compte de cette diversité dans la filière textile.

4.2.2 Résultats de l'ACV de quelques exemples de produits

Afin d'illustrer la diversité décrite précédemment, une variation des scénarios possibles est faite sur quatre niveaux :

- Au niveau de la fibre: en choisissant quatre matières différentes : une fibre naturelle, le coton (CO), une fibre artificielle, la viscose (VI), une fibre synthétique, le polyester (PES). Ce choix couvre les trois premières fibres du textile de l'habillement avec une part de 71 % des fibres utilisées. La quatrième matière choisie est le Lyocell (LYO) qui est une alternative à la viscose engendrant moins d'impacts au niveau de la production de la fibre.
- Au niveau de la filature du coton: en choisissant un fil cardé (C), un fil peigné (P) issus de la filature conventionnelle et un fil cardé issu de la filature non conventionnelle appelée Open-end (OE).
- Au niveau du tricotage : en choisissant le tricotage « coupé cousu » (CC), « fully fashioned » (FF) et « intégral » (I).
- Au niveau des apprêts : en ajoutant le traitement « easy-care » (EC).

Les combinaisons possibles de la variation des procédés du tricotage pour les tee-shirts en coton, viscose, lyocell et polyester, de la variation des procédés de la filature et du produit de fonctionnalisation (apprêt) pour le tee-shirt en coton et de la variation des procédés de teinture pour le tee-shirt en polyester aboutissent à 30 scénarios listés dans le tableau de l'annexe 3. Ces scénarios sont appelés en utilisant l'abréviation des procédés variés dans l'ordre suivant :

FIBRE_FILATURE_TRICOTAGE_APPRET

Par exemple le scénario CO_OE_I_EC est l'abréviation du scénario

COTON_OPEN-END_INTEGRAL_EASY-CARE

Pour les scénarios des fibres viscose (VI) et lyocell (LYO), les procédés de filature, de teinture et d'apprêts sont uniques, d'où la suppression des abréviations de ces processus du nom du scénario. Trois scénarios de tricotage (CC pour coupé cousu, I pour Intégral et FF pour fully fashioned) sont modélisés pour chacune des quatre fibres. En ce qui concerne, les scénarios du polyester, un procédé de teinture supplémentaire est évalué à savoir la teinture en autocalve (TA).

4.2.2.1 Diversité par fibre

La variation des quatre scénarios de tee-shirt : coton (CO_C_CC), viscose (VI_CC), Lyocell (LYO_CC) et polyester (PES_CC) ne concerne pas seulement la variation des procédés de fabrication des matières. En effet, les procédés d'ennoblissement varient en fonction de la fibre (tableau 4.2). les lieux de production de la fibre ne sont pas les mêmes : la région de production choisie pour le polyester est la même où se fait la production textile qui est Jiangsu et celle de la production de la viscose et le Lyocell est Nanjing (distante de 200 Km de Jiangsu où il y a les entreprises textiles de la filature, du tricotage, de l'ennoblissement et de la confection). La région de culture du coton est la même que le scénario de référence qui est Xinjiang distante de 3000 Km de Jiangsu. En ce qui concerne l'utilisation, les températures de repassage et de séchage ne sont pas les mêmes et le cycle de lavage est différent. La fin de vie considérée pour les quatre scénarios est l'incinération.

Certes ces matières ont des propriétés différentes en termes de résistance à l'usure d'où une durée de vie différente pour chaque tee-shirt :

- Coton : ténacité à sec en N/Tex : 0,3 – 0,4, au mouillé +10% à 20%
- Viscose : ténacité à sec en N/Tex 0,18 – 0,3, au mouillé 0,1 – 0,2 N/Tex
- Polyester : ténacité à sec en N/Tex 0,3 – 0,65

Cependant, l'hypothèse qui a été retenue pour cette évaluation est que la durée de vie est la même pour les quatre tee-shirts car ce paramètre est incertain puisqu'il est lié au comportement du consommateur.

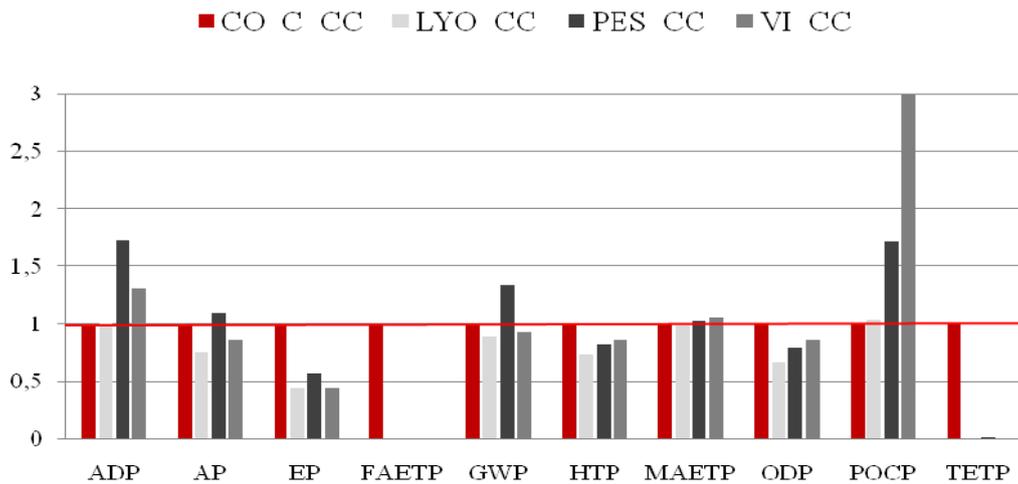


Figure 4.2. Comparaison des scénarios du cycle de vie des tee-shirts coton, lyocell, polyester et viscose avec normation à 1 pour le scénario de référence du tee-shirt en coton

La figure 4.2 ci-dessus montre que les impacts du cycle de vie des quatre scénarios sont différents notamment au niveau des potentiels d'écotoxicité de l'eau fraîche et du sol où le coton est le plus impactant. Les potentiels de création de l'ozone photochimique et d'épuisement des ressources sont plus importants pour le polyester et la viscose que pour les autres. Cette comparaison révèle les impacts majeurs de chaque scénario mais elle ne permet pas d'attribuer une note globale quant aux impacts engendrés par chaque scénario.

4.2.2.2 Diversité par filature

La filature est la phase de fabrication du fil. Elle est constituée de plusieurs étapes (figure 4.3), d'où l'utilisation de machines différentes (figure 4.4).

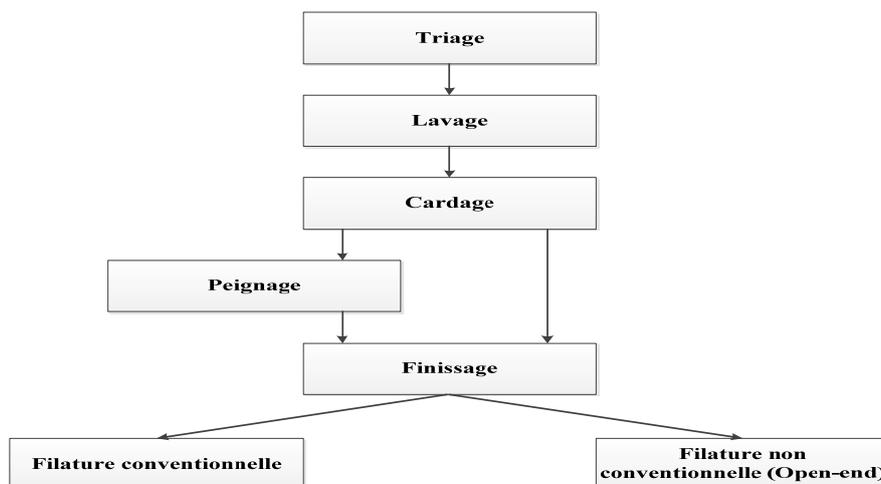


Figure 4.3. Les étapes de la filature

La variation des scénarios possibles modélisés et évalués dans ce qui suit (Figure 4.4) a été considérée pour l'alternative du tee-shirt en coton : un scénario cardé (CO_C_CC), un scénario peigné (CO_P_CC) et un scénario Open-end (CO_OE_CC). En ce qui concerne la filature du polyester, de la viscose et du Lyocell, le processus considéré est le conventionnel cardé :

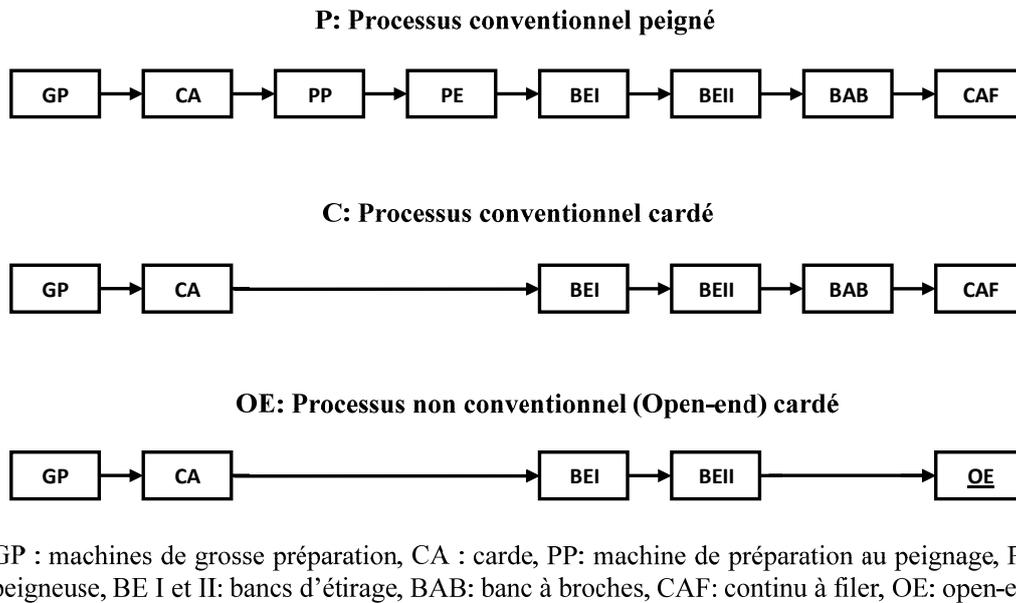


Figure 4.4. Les trois scénarios de filature du coton considérés

La différence entre les 3 scénarios consiste à varier les machines, d'où une variation de la consommation d'énergie. L'évaluation des impacts du cycle de vie (Figure 4.5) des trois scénarios montre que la différence entre les résultats concerne majoritairement les impacts liés aux processus de production de l'énergie tels que l'écotoxicité aquatique marine (MAETP) et le réchauffement climatique (GWP). Le peignage nécessite plus de matière entrante car il engendre 32% de déchets contre 17% pour le cardage et 14% pour l'open-end, ce qui a plus d'impacts liés à la culture du coton tels que l'écotoxicité aquatique de l'eau fraîche (FAETP).

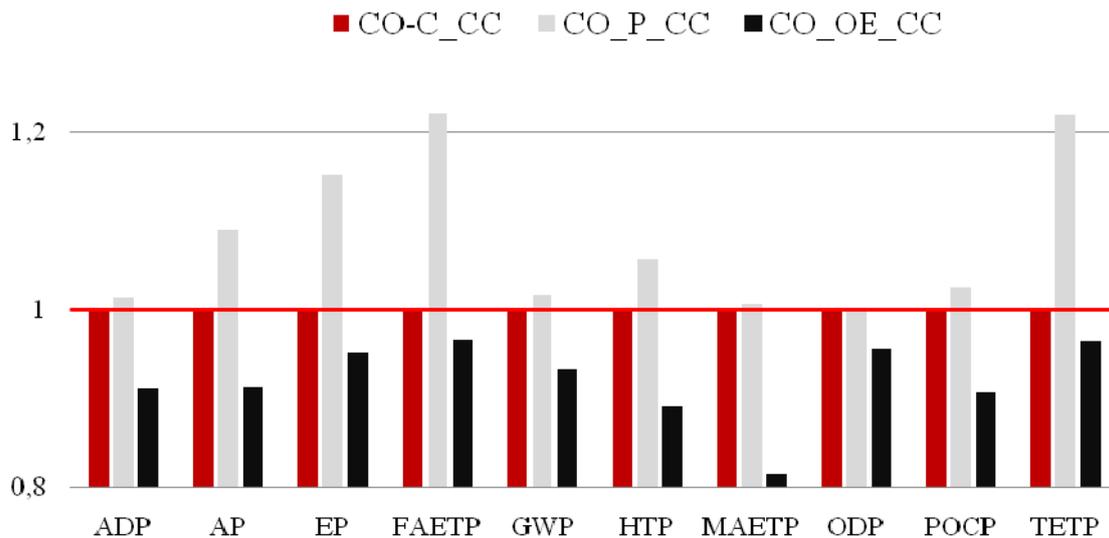


Figure 4.5. Evaluation des impacts du cycle de vie des trois alternatives du tee-shirt en coton en variant le processus de filature avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC

Le processus conventionnel peigné, utilisant un plus grand nombre de machines est le plus consommateur d'énergie. Par conséquent, il est le plus impactant en termes de GWP et de HTP. Inversement, le processus open-end cardé est le moins impactant puisqu'il implique trois machines en moins par rapport au processus conventionnel peigné. Ainsi, le choix de ce dernier, comme étant le meilleur scénario de fabrication respectant l'environnement, paraît trivial. Cependant, en tenant en compte le cycle de vie entier, le paramètre « durée de vie » du tee-shirt en se focalisant seulement sur la qualité, peut-il avoir une influence considérable sur les résultats ?

En admettant que le tee-shirt peut atteindre sa fin de vie par une obsolescence perçue par le consommateur ou par un degré d'usure et la rapidité de son apparition ce qui est directement lié à la qualité du fil (donc du tee-shirt). Le fil en coton peigné a la meilleure qualité car les fibres courtes sont éliminées par le peignage, donc la régularité qui est un parmi les critères définissant une bonne qualité du fil est assurée.

Afin de déterminer le paramètre « usure », des essais expérimentaux ont été réalisés sur des échantillons de tricots correspondant à des tee-shirts de basse qualité (Nm 40 cardé et open-end). En effet, on considère que le tee-shirt est usé à l'apparition de bouloches (suite aux frottements dus à l'utilisation et à l'entretien) et n'est plus utilisable à l'apparition de trous. Pour quantifier ces aspects, la résistance à l'abrasion des étoffes a été déterminée par la méthode Martindale (Figure 4.6).



Figure 4.6. Détermination de la détérioration de l'éprouvette selon la norme NF EN ISO 12947-2 (04/99)

Les résultats de ce test sont listés dans le tableau 4.3 ci-dessous :

Tableau 4.3. Détermination de la détérioration de deux échantillons de tee-shirt selon la norme NF EN ISO 12947-2 (04/99)

Echantillons	Tricot jersey à partir d'un fil de Nm 40 en 100% coton	
	CO_C_CC	CO_OE_CC
Processus de filature	Conventionnel cardé (C)	Open end (OE)
Nombre de tours des disques abrasifs correspondant aux premières bouloches	6 000	3 000
Nombre de tours des disques abrasifs correspondant au premier trou	22 700	22 700

Les tests sur le coton peigné révèlent une augmentation de la durée de vie de 13% en moyenne en se basant seulement sur « l'usure » ce qui n'est pas significatif car une variation de la durée de vie du tee-shirt entre -10% et + 26% n'a pas d'impacts sur les résultats (c.f. tableau 3.5).

Les bouloches sont les premiers signes d'usure. En se basant sur ce critère, on remarque que la durée de vie du tee-shirt CO_C_CC est le double de celle du tee-shirt CO_OE_CC ce qui modifie le cycle de vie en prenant en compte 15 utilisations au lieu de 30 et en majorant par un facteur 2 les étapes de fabrication et de distribution. Les résultats s'inversent et le scénario CO_OE_CC devient le plus impactant comme le montre la figure 4.7 ci-dessous.

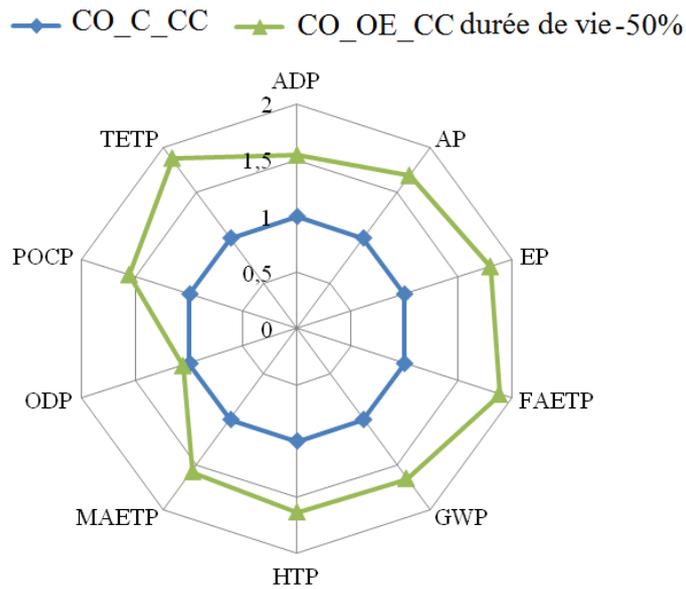


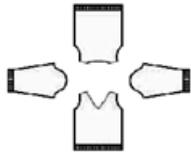
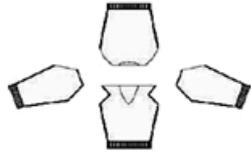
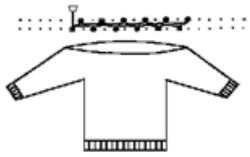
Figure 4.7. Résultats de l'ACV en tenant en compte la durée de vie basée sur l'usure correspondante à chaque scénario : CO_C_CC avec normation à 1, CO_OE_CC

Certes le paramètre «usure» est indispensable pour obtenir des résultats d'ACV fiables. Cependant, ce critère n'est pas déterminant car la sensibilité du consommateur par rapport à l'apparition des bouloches est variable (on peut continuer à utiliser le tee-shirt même en présence de bouloches ou on peut retirer ces dernières). En revanche, l'apparition d'un trou détermine la fin de vie du tee-shirt qui est identique pour les deux scénarios, d'où la considération de la même durée de vie pour les trois scénarios de filature pour la suite. De plus, la durée de vie est surtout liée à la perception du consommateur influencée par d'autres paramètres tels que l'effet de mode, l'envie de changement, etc.

4.2.2.3 Diversité par tricotage

La variation du procédé du tricotage « coupé cousu » en « fully fashioned » ou « intégral » consiste à changer la machine et le produit sortant. Par conséquent, en addition à la différence des consommations d'énergie des trois procédés, la quantité de matière entrante varie comme l'indique le tableau 4.4 suivant.

Tableau 4.4. Comparaison des trois procédés de tricotage d'un pullover en laine [156]

Technologie	Coupé cousu	Fully fashioned	Intégral
			
Fabrication d'un pull-over de 300 g			
Entrants			
Matières premières (g)	415 à 442	325 à 340	318 à 325
Energie (Wh)	352	1376	3250
Sortants			
Déchets : matières premières (g)	116 à 132 (30 à 35%)	25 à 40 (8 à 12%)	9 à 16 (3 à 10%)

En comparant au fully fashioned (FF) et à l'intégral (I), le procédé coupé cousu (CC) consomme moins d'énergie à l'étape de fabrication du tricot mais nécessite des tâches supplémentaires à la confection (coupe et couture). Ce qui engendre une consommation d'énergie plus élevée à cette dernière étape. A cause des déchets issus de la coupe, le procédé coupé cousu requiert une quantité plus grande de matière entrante ce qui engendre plus d'impacts à l'étape de production des fibres. Ici, on fait face à un problème de transfert de pollution. L'ACV des trois alternatives du tricotage du tee-shirt coton cardé (CO_C) (figure 4.8) confirme que le CO_C_CC est le plus impactant sur l'environnement malgré une consommation d'énergie inférieure respectivement de 4 fois et 9 fois par rapport au CO_C_FF et au CO_C_I. En comparant les deux scénarios CO_C_FF et CO_C_I, on trouve que le premier est meilleur au niveau des impacts ADP, AP, GWP, HTP, MAETP, ODP et POCP qui sont majoritairement liés aux processus de production de l'énergie mais il est plus impactant sur l'eutrophisation, l'écotoxicité de l'eau fraîche et l'écotoxicité terrestre qui sont liés à la culture du coton puisque le fully fashioned nécessite plus de matière entrante que l'intégral.

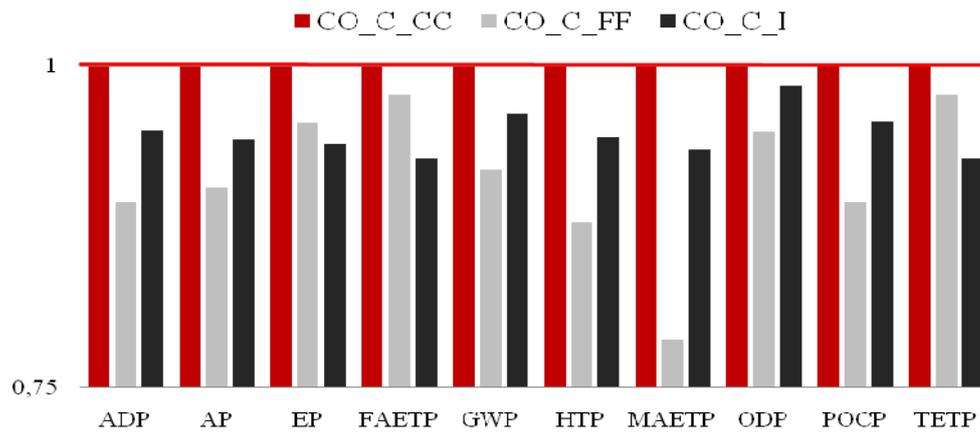


Figure 4.8. Evaluation des impacts du cycle de vie des trois alternatives de tee-shirt coton en variant les procédés du tricotage avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC

Dans ce cas, l'analyse multicritère permettra de faire le choix entre les scénarios CO_C_FF et CO_C_I.

4.2.2.4 Diversité par Apprêts

L'objectif de l'utilisation des produits de fonctionnalisation est l'ajout de propriétés supplémentaires au vêtement telles que l'infroissabilité, l'ignifugation, l'imperméabilité, etc. Ces traitements, facilitant la phase d'utilisation, peuvent avoir une influence sur les impacts environnementaux du cycle de vie. Dans la partie « What if » de l'ACV, on va appliquer un apprêt « easy-care » (EC) qui rend le repassage inutile. Ainsi, les impacts qui sont liés au processus de production de l'énergie diminuent légèrement comme le montre la figure 4.9 suivante.

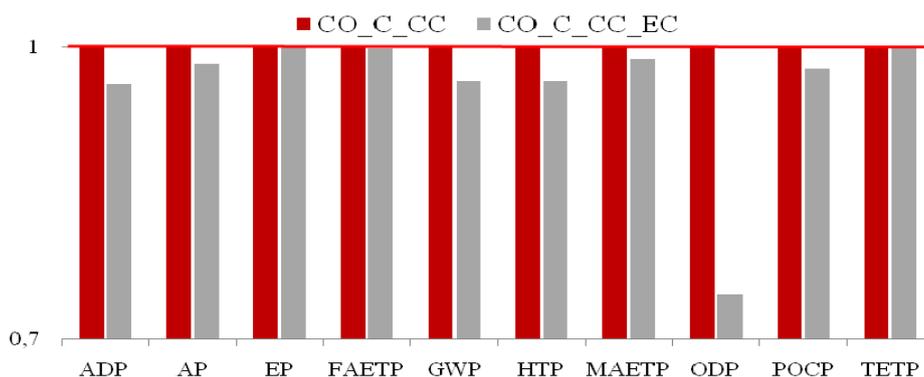


Figure 4.9. Evaluation des deux alternatives de tee-shirt en coton en ajoutant un apprêt easy-care (CO_C_CC_EC) avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC

L'apprêt « easy-care » confère au tee-shirt une meilleure résistance à l'abrasion, d'où une durée de vie supérieure de 33% en moyenne en se basant seulement sur l'usure. Cette valeur a été déterminée expérimentalement sur des échantillons textiles avec et sans apprêt « easy-care » en vérifiant :

- la résistance à l'abrasion par le martindale,
- la solidité de la teinture au frottement par le Crock Meter,
- la solidité de la teinture au lavage.

L'ACV des deux alternatives de tee-shirt en fonction du produit de fonctionnalisation en tenant en compte le paramètre usure et en supprimant le repassage (figure 4.10), montre que ce traitement réduit tous les impacts environnementaux du cycle de vie.

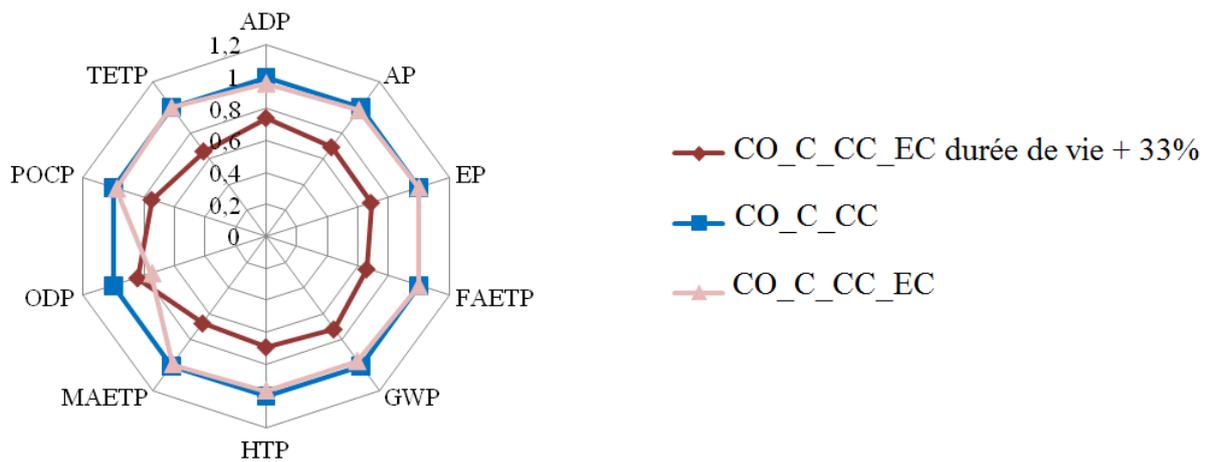


Figure 4.10. Evaluation des impacts du cycle de vie des scénarios de tee-shirt: CO_C_CC et CO_C_CC_EC en tenant en compte la durée de vie basée sur l'usure avec normation à 1 pour le scénario CO_C_CC

La durée de vie du tee-shirt n'est pas caractérisée par ces tests uniquement puisqu'elle est aussi définie par une obsolescence perçue par le consommateur. De ce fait, la caractérisation des usages réels correspondants à chaque segment de marché (produits haut de gamme, articles de mode, ...) peut avoir d'autres influences sur les résultats. Ainsi, des études complémentaires pourraient être réalisées pour prendre en compte ces autres paramètres.

4.2.2.5 Scénarios analysés

Les résultats de l'ACV de ces scénarios sont résumés dans le tableau 4.5 suivant :

Tableau 4.5. Résultats de l'ACV des scénarios sélectionnés du cycle de vie du tee-shirt

	ADP	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
CO_C_CC	2,92E-02	4,23E-02	5,89E-03	4,33E+01	7,19E+00	5,95E-01	1,82E+03	2,09E-06	2,81E-03	7,03E-01
CO_C_CC_EC	2,81E-02	4,15E-02	5,90E-03	4,33E+01	6,93E+00	5,74E-01	1,80E+03	1,56E-06	2,75E-03	7,04E-01
CO_C_FF	2,61E-02	3,83E-02	5,63E-03	4,24E+01	6,61E+00	5,23E-01	1,43E+03	1,98E-06	2,51E-03	6,87E-01
CO_C_FF_EC	2,50E-02	3,76E-02	5,64E-03	4,23E+01	6,36E+00	5,02E-01	1,41E+03	1,45E-06	2,45E-03	6,89E-01
CO_C_I	2,77E-02	3,99E-02	5,53E-03	4,02E+01	6,92E+00	5,62E-01	1,70E+03	2,05E-06	2,69E-03	6,52E-01
CO_C_I_EC	2,66E-02	3,91E-02	5,53E-03	4,02E+01	6,67E+00	5,41E-01	1,68E+03	1,52E-06	2,62E-03	6,54E-01
CO_OE_CC	2,67E-02	3,86E-02	5,61E-03	4,18E+01	6,70E+00	5,30E-01	1,48E+03	1,99E-06	2,55E-03	6,78E-01
CO_OE_CC_EC	2,55E-02	3,79E-02	5,62E-03	4,18E+01	6,44E+00	5,10E-01	1,46E+03	1,46E-06	2,49E-03	6,80E-01
CO_OE_FF	2,36E-02	3,47E-02	5,35E-03	4,09E+01	6,13E+00	4,59E-01	1,10E+03	1,89E-06	2,26E-03	6,63E-01
CO_OE_FF_EC	2,25E-02	3,40E-02	5,36E-03	4,09E+01	5,88E+00	4,39E-01	1,08E+03	1,36E-06	2,20E-03	6,64E-01
CO_OE_I	2,54E-02	3,65E-02	5,27E-03	3,88E+01	6,47E+00	5,02E-01	1,39E+03	1,97E-06	2,45E-03	6,29E-01
CO_OE_I_EC	2,42E-02	3,57E-02	5,27E-03	3,88E+01	6,21E+00	4,81E-01	1,37E+03	1,44E-06	2,38E-03	6,31E-01
CO_P_CC	2,96E-02	4,61E-02	6,79E-03	5,29E+01	7,30E+00	6,29E-01	1,83E+03	2,09E-06	2,88E-03	8,57E-01
CO_P_CC_EC	2,85E-02	4,53E-02	6,79E-03	5,28E+01	7,05E+00	6,08E-01	1,81E+03	1,56E-06	2,82E-03	8,58E-01
CO_P_FF	2,65E-02	4,20E-02	6,51E-03	5,17E+01	6,72E+00	5,56E-01	1,44E+03	1,98E-06	2,58E-03	8,38E-01
CO_P_FF_EC	2,54E-02	4,13E-02	6,51E-03	5,17E+01	6,47E+00	5,35E-01	1,42E+03	1,45E-06	2,52E-03	8,39E-01

4.2 Diversité des scénarios du cycle de vie du tee-shirt

	ADP	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP
CO_P_I	2,81E-02	4,34E-02	6,36E-03	4,90E+01	7,03E+00	5,93E-01	1,71E+03	2,06E-06	2,75E-03	7,95E-01
CO_P_I_EC	2,70E-02	4,26E-02	6,36E-03	4,90E+01	6,77E+00	5,72E-01	1,69E+03	1,53E-06	2,69E-03	7,96E-01
LYO_CC	2,94E-02	3,19E-02	2,59E-03	5,39E-02	6,41E+00	4,37E-01	1,80E+03	1,39E-06	2,93E-03	4,40E-03
LYO_FF	2,63E-02	2,81E-02	2,39E-03	4,31E-02	5,83E+00	3,66E-01	1,40E+03	1,28E-06	2,62E-03	3,86E-03
LYO_I	2,77E-02	2,99E-02	2,44E-03	5,01E-02	6,14E+00	4,10E-01	1,66E+03	1,35E-06	2,77E-03	4,12E-03
PES_CC	5,06E-02	4,64E-02	3,37E-03	5,33E-02	9,65E+00	4,89E-01	1,86E+03	1,67E-06	4,83E-03	1,21E-02
PES_FF	4,71E-02	4,23E-02	3,16E-03	4,29E-02	9,02E+00	4,19E-01	1,47E+03	1,56E-06	4,49E-03	1,14E-02
PES_I	4,76E-02	4,37E-02	3,19E-03	5,05E-02	9,20E+00	4,64E-01	1,74E+03	1,64E-06	4,56E-03	1,13E-02
PES_TA_CC	4,65E-02	4,46E-02	3,19E-03	5,21E-02	9,08E+00	4,45E-01	1,76E+03	1,65E-06	4,64E-03	1,16E-02
PES_TA_FF	4,31E-02	4,06E-02	2,99E-03	4,16E-02	8,46E+00	3,76E-01	1,37E+03	1,55E-06	4,30E-03	1,09E-02
PES_TA_I	4,38E-02	4,20E-02	3,02E-03	4,93E-02	8,67E+00	4,23E-01	1,65E+03	1,63E-06	4,38E-03	1,08E-02
VI_CC	3,84E-02	3,67E-02	2,59E-03	7,13E-02	6,71E+00	5,15E-01	1,93E+03	1,81E-06	8,78E-03	9,17E-03
VI_FF	3,51E-02	3,27E-02	2,39E-03	6,02E-02	6,13E+00	4,42E-01	1,53E+03	1,70E-06	8,34E-03	8,53E-03
VI_I	3,60E-02	3,44E-02	2,45E-03	6,64E-02	6,43E+00	4,83E-01	1,78E+03	1,77E-06	8,21E-03	8,55E-03
	Valeur minimale					Valeur maximale				

Une analyse simplifiée de ces résultats révèle que les scénarios les plus impactant sont le :

- CO_P_CC ayant les valeurs les plus élevées en potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau fraîche (FAETP), en potentiel de toxicité humaine (HTP) et en potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP).
- PES_CC ayant les valeurs les plus élevées en acidification (AP), en potentiel de réchauffement climatique (GWP) et en potentiel d'épuisement des ressources (ADP).
- VI_CC ayant les valeurs les plus élevées en potentiel d'écotoxicité aquatique marine (MAETP) et en potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP).
- CO_P_CC_EC ayant la valeur la plus élevée en potentiel d'eutrophisation (EP) et en potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP).

Sachant qu'on ne sait pas si l'écotoxicité aquatique de l'eau fraîche (FAETP), la toxicité humaine (HTP) et l'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) sont plus ou moins graves que l'acidification (AP), le réchauffement climatique (GWP) et l'épuisement des ressources (ADP) ou plus ou moins graves que l'écotoxicité aquatique marine (MAETP) et la création de l'ozone photochimique (POCP) ou plus ou moins graves que l'eutrophisation (EP) et l'écotoxicité terrestre (TETP), on ne peut pas faire un jugement certain concernant le scénario le plus impactant. De même, la comparaison des autres scénarios ne permet pas de les classer selon leurs impacts environnementaux. En effet, il n'y a pas de scénario parfait: aucune solution particulière ne peut minimiser tous les impacts simultanément. D'où la complexité du problème de décision dans un contexte d'éco-conception. Le décideur doit intégrer un ensemble de critères qu'il voudrait optimiser de façon concomitante. Ce décideur qui peut être le concepteur ou le distributeur ou l'utilisateur du produit cherche à établir un ordre de préférences entre les scénarios modélisés précédemment. Dans ce qui suit on va éclairer la décision par le classement de ces scénarios selon leurs impacts environnementaux ce qui revient à résoudre la problématique répertoriée dans la catégorie de problématique gamma définie dans le chapitre 2 (cf. 2.4.1).

4.3 Définition du modèle de décision

L'aide à la décision est basée sur un modèle représentant les informations définies précédemment pour répondre au mieux au problème posé, qui consiste en l'occurrence à classer les scénarios du cycle de vie du tee-shirt en fonction de leurs impacts environnementaux du moins grave au plus grave. Le rangement est un préordre partiel obtenu en appliquant la méthode de surclassement PROMETHEE I choisie et définie dans le chapitre 2 (cf. 2.4.3). Les actions classées sont les scénarios listées dans le tableau de l'annexe 3 et évalués par l'ACV (tableau 4.5).

4.3.1 Choix des critères

L'ensemble des critères est constitué par les impacts environnementaux des scénarios du cycle de vie évalués dans le chapitre (cf. 3.3) en utilisant la méthode CML 2001 mise à jour en décembre 2007 à savoir

- Le potentiel d'épuisement des ressources (ADP)
- Le potentiel d'acidification (AP)
- Le potentiel d'eutrophisation (EP)
- Le potentiel d'écotoxicité aquatique de l'eau (FAETP)
- Le potentiel de réchauffement climatique (GWP 100 ans)
- Le potentiel de toxicité pour l'homme (HTP)
- Le potentiel d'écotoxicité aquatique marine (MAETP)
- Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'Ozone (ODP)
- Le potentiel de création de l'ozone photochimique (POCP)
- Le potentiel d'écotoxicité terrestre (TETP)

4.3.2 Choix des seuils de préférence et d'indifférence pour chaque critère

Dans cette application, le critère linéaire (cf. 2.4.3) a été choisi car il est plus réaliste et modélise mieux les préférences des décideurs qui sont souvent imprécises et incomplètement formulées.

Le seuil d'indifférence est la plus petite différence jugée significative. Le seuil de préférence est la différence minimale aboutissant à une préférence stricte. Pour déterminer ces deux seuils d'une manière objective et la plus réaliste possible, la pollution moyenne journalière par personne dans le monde a été considérée. Après simulations, le seuil d'indifférence retenu est égal à 2% de cette pollution et le seuil de préférence à 10% de cette pollution. Le calcul de ces valeurs est basé sur la méthode CML 2001 mise à jour en décembre 2007 et la population dans le monde au nombre de 6 671 226 000 habitants en 2007 [157]. Les pourcentages 2% et 10% correspondent respectivement à la part minimale et à la part maximale de la contribution de la catégorie des textiles aux impacts environnementaux générés par l'Union Européenne (cf. 1.5.1.2).

Les valeurs des impacts pour l'ensemble des scénarios analysés sont très resserrées pour la majorité des critères à savoir AP, EP, HTP, POCP, TETP et ADP (écart-type faible). La préférence de ces critères est modélisée au mieux entre les deux seuils choisis (figure 4.11 ci-dessous). Pour les critères FAETP, GWP et MAETP, les écarts entre les valeurs sont larges et dépassent souvent le seuil de préférence notamment pour les critères FAETP et MAETP. Dans ce cas, la préférence est stricte pour le scénario qui minimise ceux-ci. En ce qui concerne le critère ODP, les écarts entre les valeurs des impacts sont faibles et ne dépassent pas le seuil d'indifférence.

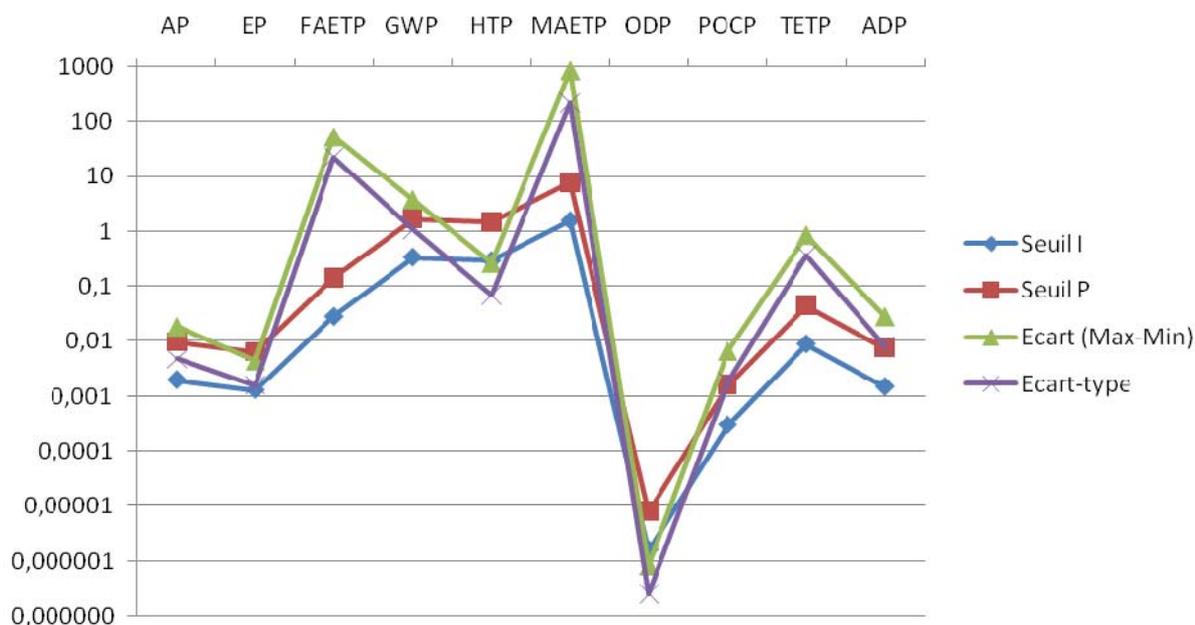


Figure 4.11. Positionnement des écarts entre les valeurs des critères entre les deux seuils Q et P choisis

4.3.3 Pondération des critères

L'attribution des poids aux critères n'est pas une tâche facile et elle est sujette à un débat concernant le point de vue du décideur. En effet, le choix des poids revient au décideur qui dans ce cas peut être un fabricant, un distributeur ou encore un consommateur. Le fabricant et le distributeur soucieux de la compétitivité dans leurs domaines d'activités et face aux différentes obligations réglementaires chercheront à réduire soit les impacts environnementaux concernés par celles-ci soit les impacts environnementaux auxquels s'intéressent le consommateur car ils sont les plus exposés par les médias. Ces impacts médiatisés sont le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources.

Dans un premier lieu, nous avons considéré une pondération pour le classement partiel des scénarios, évalués par l'ACV, par l'application de la méthode PROMETHEE I basée sur une importance égale pour l'ensemble des critères.

Dans un second lieu, une méthodologie de pondération plus réaliste et plus pragmatique est considérée en attribuant plus d'importance aux impacts majeurs engendrés par les scénarios. En effet, un poids w_j est attribué au $j^{\text{ème}}$ critère. Ce poids est d'autant plus grand que le critère (impact environnemental) est « important ». Ici, l'importance des impacts environnementaux

(k critères) est relative à la pollution journalière respective d'une personne dans le monde qu'on appellera I_j . En effet, plus l'impact est grand plus son poids est élevé. Le poids est alors une fonction définie comme suivant :

$$w_j = \frac{\max(i_{p,j} = 1..k)}{I_j}$$

Par exemple, le scénario CO_P_CC est le plus impactant en écotoxicité de l'eau fraîche. Il génère 52,86 Kg DCB équivalent dans l'eau fraîche ($\max(i_j, j=1..k) = 52,86$) ce qui correspond à presque 37 fois la moyenne mondiale du potentiel d'écotoxicité de l'eau fraîche (FAETP) engendré par une personne par jour ($I_j = 1,425$). D'où le poids du critère FAETP :

$$w_{FAETP} = \frac{\max(i_{p,j} = 1..k)}{I_j} = \frac{i_{CO_P_CC}}{I_j} = \frac{52,86}{1,425} = 37,09$$

Ce scénario est aussi le plus impactant en déplétion de la couche d'ozone. Il génère $0,21 \cdot 10^{-5}$ Kg R11 équivalent ce qui correspond à 2,6 % de la moyenne mondiale du potentiel de déplétion de la couche d'ozone (ODP) engendré par une personne par jour. Le critère FAETP a donc une plus grande importance que le critère ODP relativement à la pollution journalière par personne dans le monde. Par conséquent les poids respectifs des critères FAETP et ODP sont 37,09 et 0,026. Pour les autres critères, le poids est attribué de la même manière en calculant la part de l'impact maximal des scénarios par rapport à la moyenne mondiale journalière d'une personne comme explicité dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6. Méthodologie de calcul des poids des critères (impacts environnementaux)

	AP	EP	FAETP	GWP	HTP	MAETP	ODP	POCP	TETP	ADP
Impact journalier par personne (moyenne mondiale) (I_j)	0,098	0,065	1,425	17,166	14,908	79,672	7,9E-5	0,016	0,448	0,001
Impact maximal des scénarios ($\max(i_n)$)	0,046	0,007	52,862	9,645	0,629	1933,109	0,21E-5	0,008	0,858	0,051
Poids ($\max(i_n)/I_j$)	0,473	0,105	37,095	0,562	0,042	24,263	0,027	0,533	1,917	41,277

Cette pondération montre que les critères les plus importants sont donc le FAETP (problématique du coton), le MAETP (problématique de la viscose) et le critère ADP (problématique du polyester).

Des analyses de sensibilité ont été effectuées sur l'importance relative des critères. Elle consiste à augmenter le poids d'un certain critère et voir quels sont les scénarios favorisés par le critère mis en valeur par rapport au cas de départ où une pondération égale est attribuée aux critères.

Finalement, les intervalles de stabilité des poids des critères montreront à quel point les décisions liées aux classements obtenus sont robustes. Ces intervalles sont les valeurs minimales et maximales que les poids peuvent prendre sans changer le rangement initial.

4.4 Résultats du surclassement

Le graphe de surclassement partiel des scénarios (figure 4.12) est obtenu en calculant les flux sortant ou aussi appelés « puissance » Φ^+ et les flux entrant ou aussi appelés « faiblesse » Φ^- , comme illustré dans la définition de la méthode PROMETHEE I (cf. section 2.4.3.1).

La relation a surclasse b ($a S b$) est obtenue comme suivant:

$$\text{si } \Phi_a^+ > \Phi_b^+ \text{ et } \Phi_a^- < \Phi_b^- \text{ ou}$$

$$\text{si } \Phi_a^+ = \Phi_b^+ \text{ et } \Phi_a^- < \Phi_b^- \text{ ou}$$

$\text{si } \Phi_a^+ > \Phi_b^+ \text{ et } \Phi_a^- = \Phi_b^-$ Sinon les scénarios sont incomparables. En cas où les puissances et faiblesses sont égales les scénarios sont indifférents.

A partir du schéma représentant ces relations, le décideur peut prendre sa décision, les actions préférables se trouvent à l'origine des flèches.

4.4.1 Pondérations égales des critères

L'analyse de la figure 4.12 aboutit aux constatations suivantes :

- Le Lyocell est le meilleur parmi les 4 scénarios de choix de la fibre démontré dans la section 4.2.2.1 (figure 4.2). Cependant sa position dans le classement des 30 scénarios analysés est conditionnée par le procédé de tricotage choisi. En effet, si le tee-shirt en

Lyocell est coupé cousu (LYO_CC), le tee-shirt CO_OE_I_EC est légèrement meilleur.

- En ce qui concerne *le coton*, ce ne sont pas seulement les impacts liés au choix de la fibre qui importent dans le classement des scénarios CO, mais c'est plutôt les processus de filature et de tricotage. Par exemple, les scénarios CO_OE_FF et CO_OE_I sont classés parmi les premiers sur les 30 scénarios analysés alors que les scénarios CO_C_CC et CO_P_CC sont classés parmi les derniers.
- Le rang de la *viscose* paraît être bon. En effet, les scénarios VI_FF et VI_I sont surclassés par seulement 2 scénarios LYO et 3 scénarios CO_OE sur les 30 scénarios analysés. Les scénarios VI ont des notes élevées en puissance mais aussi des notes élevées en faiblesse ce qui conduit à une relation d'incomparabilité avec 9 scénarios tels que le LYO_CC, le CO_OE_I, le CO_C_FF, le CO_C_I et le CO_P_FF_EC. Ceci remet en doute le rang « bon » de la viscose. Vu la note élevée en faiblesse, le rang de la viscose est plutôt moyen.
- Le rang du *polyester* est moyen si la teinture est faite en autoclave et/ou si le tricotage est « fully fashioned ». Il est très mauvais si le polyester est coupé cousu (PES_CC, teinture en overflow). Pour tous les scénarios PES, la note en faiblesse est élevée ce qui les rend incomparables à la plupart des scénarios CO.

Ce classement montre aussi que le choix du procédé de tricotage a une influence importante sur les résultats et établit la relation de surclassement du procédé intégral (I) par le procédé « fully fashioned » (FF) pour tous les scénarios ce qui n'était pas certain dans la section 4.2.2.3.

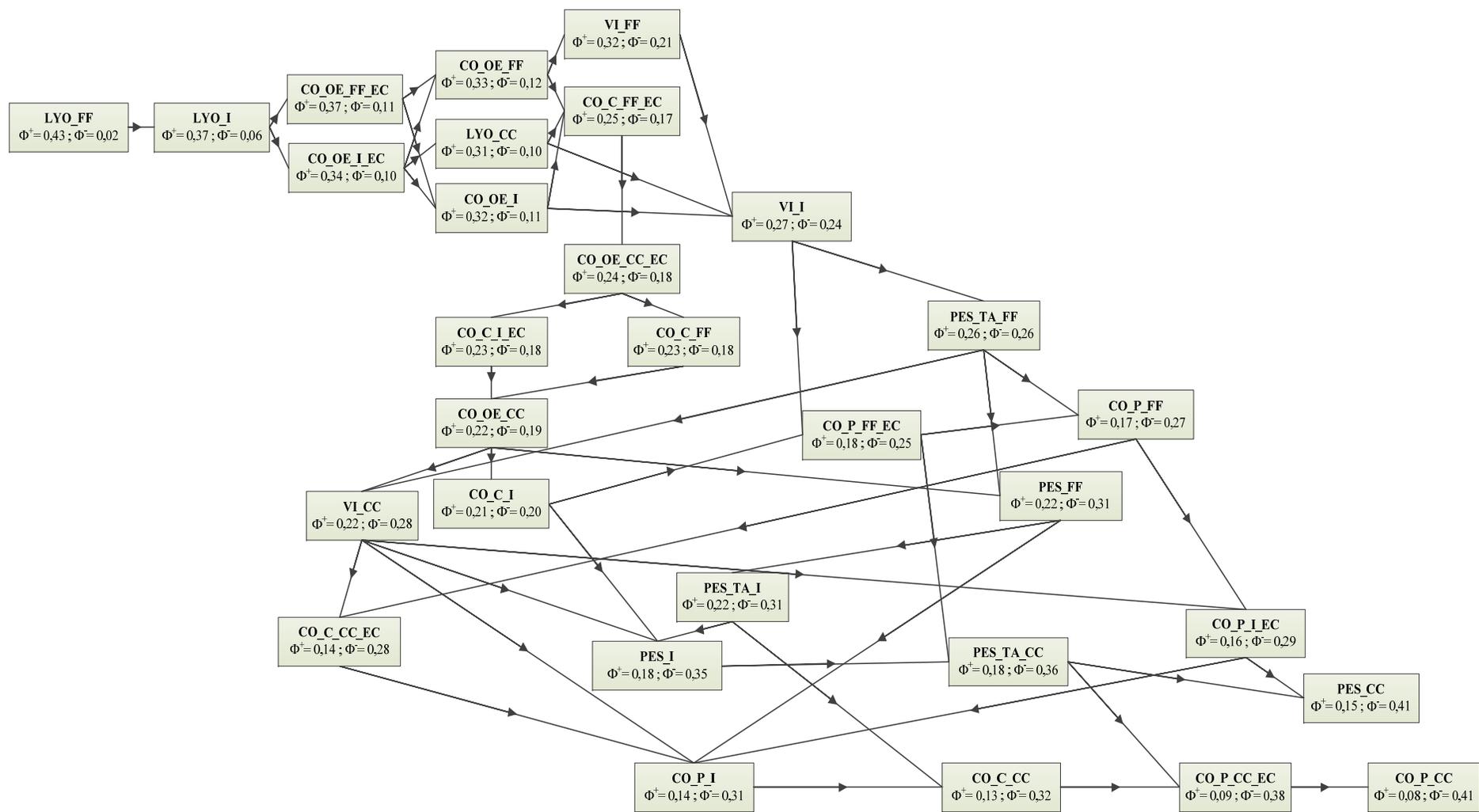


Figure 4.12: Classement partiel des scénarios avec des pondérations égales

Selon l'hypothèse qui consiste à considérer que les impacts environnementaux constituant les critères considérés ont le même degré de gravité, les intervalles de stabilité (tableau 4.8 suivant) montrent que la pondération de certains critères est sensible.

4.4.2 Pondération double du critère GWP

Si on considère que le potentiel de réchauffement climatique, par exemple, est 2 fois plus grave que les autres impacts, les résultats changent comme suit :

Tableau 4.7. Comparaison des classements partiels des scénarios selon la pondération

Poids égaux			Poids GWP x 2		
	Φ^+	Φ^-		Φ^+	Φ^-
LYO_FF	0,4286	0,0198	LYO_FF	0,4314	0,018
LYO_I	0,3678	0,0595	LYO_I	0,364	0,0541
CO_OE_FF_EC	0,3658	0,1146	CO_OE_FF_EC	0,3723	0,1041
CO_OE_I_EC	0,3422	0,1045	CO_OE_I_EC	0,3388	0,0951
CO_OE_FF	0,333	0,1184	CO_OE_FF	0,3327	0,1077
LYO_CC	0,3133	0,1046	LYO_CC	0,308	0,0961
CO_OE_I	0,3162	0,115	CO_OE_I	0,3098	0,1057
VI_FF	0,3187	0,2073	VI_FF	0,3199	0,1885
CO_C_FF_EC	0,2502	0,1693	CO_C_FF_EC	0,2516	0,1546
CO_OE_CC_EC	0,2385	0,1752	CO_OE_CC_EC	0,2395	0,1603
CO_C_I_EC	0,2285	0,1819	CO_C_I_EC	0,2286	0,169
CO_C_FF	0,2289	0,1826	CO_C_FF	0,2277	0,1691
CO_OE_CC	0,2194	0,1891	CO_OE_CC	0,2192	0,176
VI_I	0,2657	0,2443	VI_I	0,2644	0,2231
CO_C_I	0,2143	0,2021	CO_C_I	0,2134	0,1929
PES_TA_FF	0,2621	0,2598	CO_P_FF_EC	0,1893	0,2289
VI_CC	0,216	0,2802	VI_CC	0,2161	0,259
CO_P_FF_EC	0,1837	0,2504	PES_TA_FF	0,2422	0,3069
PES_FF	0,2177	0,3104	CO_P_FF	0,1717	0,2473
PES_TA_I	0,2165	0,3116	CO_P_I_EC	0,1605	0,2654
CO_P_FF	0,1673	0,267	CO_C_CC_EC	0,1499	0,2667
CO_P_I_EC	0,1553	0,286	CO_P_I	0,1487	0,2947
CO_C_CC_EC	0,1447	0,2829	PES_TA_I	0,1988	0,3568
CO_P_I	0,1438	0,3106	PES_FF	0,1986	0,3579
PES_I	0,1839	0,3511	CO_C_CC	0,1384	0,3051
PES_TA_CC	0,1808	0,3591	PES_I	0,1674	0,3957
CO_C_CC	0,1332	0,3153	PES_TA_CC	0,1649	0,4025
PES_CC	0,1525	0,4104	CO_P_CC_EC	0,104	0,3543
CO_P_CC_EC	0,0947	0,3754	CO_P_CC	0,0936	0,3956
CO_P_CC	0,0845	0,4094	PES_CC	0,1386	0,4531

Les meilleurs scénarios gardent leurs classements. Pour les autres, les changements majeurs sont en faveur des scénarios du tee-shirt en coton. En effet, la puissance Φ^+ augmente et/ou la faiblesse Φ^- diminue contrairement aux scénarios du tee-shirt en polyester ce qui change le classement partiel de ces scénarios. Dans le tableau 4.7, des couleurs arbitraires sont attribuées aux scénarios qui changent de classement pour faciliter la visualisation des évolutions. Certains scénarios deviennent incomparables et d'autres ne le sont plus, par exemple :

- Le scénario PES_TA_FF et le VI_CC deviennent incomparables alors que le PES_TA_FF était meilleur.
- Le scénario CO_C_FF surclasse le scénario CO_C_I_EC alors qu'ils étaient incomparables.

Le critère GWP est donc sensible et l'augmentation de son poids de 10 à 18% a changé le classement de certains scénarios. En effet, le critère GWP est stable pour un poids compris entre 9,96% et 10,41%. Les intervalles de stabilité des poids des autres critères sont listés dans le tableau 4.8.

Tableau 4. 8. Intervalles de stabilité des poids des critères dans le cas d'une pondération égale

	Pondération égale		
	Poids	Min	Max
AP	10,00%	9,45%	10,34%
EP	10,00%	9,46%	10,10%
FAETP	10,00%	9,94%	10,03%
GWP	10,00%	9,96%	10,41%
HTP	10,00%	0,00%	100,00%
MAETP	10,00%	9,66%	10,05%
ODP	10,00%	0,00%	100,00%
POCP	10,00%	9,96%	10,18%
TETP	10,00%	9,90%	10,03%
ADP	10,00%	9,97%	10,25%

Les écarts entre les valeurs des deux critères HTP et ODP pour les scénarios analysés sont inférieurs au seuil d'indifférence. Donc ces écarts étant considérés non significatifs, le changement de la pondération de ces deux critères (intervalle de stabilité [0, 100%]) n'a pas d'influence sur les résultats. En outre, ces critères ont des poids faibles selon la pondération relative à l'impact maximal des scénarios explicitée dans la section 4.3.3. Ceci est dû au fait que les scénarios analysés qui représentent bien le secteur textile en couvrant plus que 71% des fibres utilisées dans l'industrie textile de l'habillement n'ont pas d'impacts significatifs

sur l'ODP et la HTP. En revanche, une faible augmentation ou diminution du poids des critères AP, FAETP, GWP, MAETP, POCP et TETP change les résultats.

4.4.3 Pondération selon l'importance relative de l'impact maximal

Une pondération en fonction de la part de l'impact maximal des scénarios dans la pollution journalière par personne dans le monde, aboutit au classement partiel suivant :

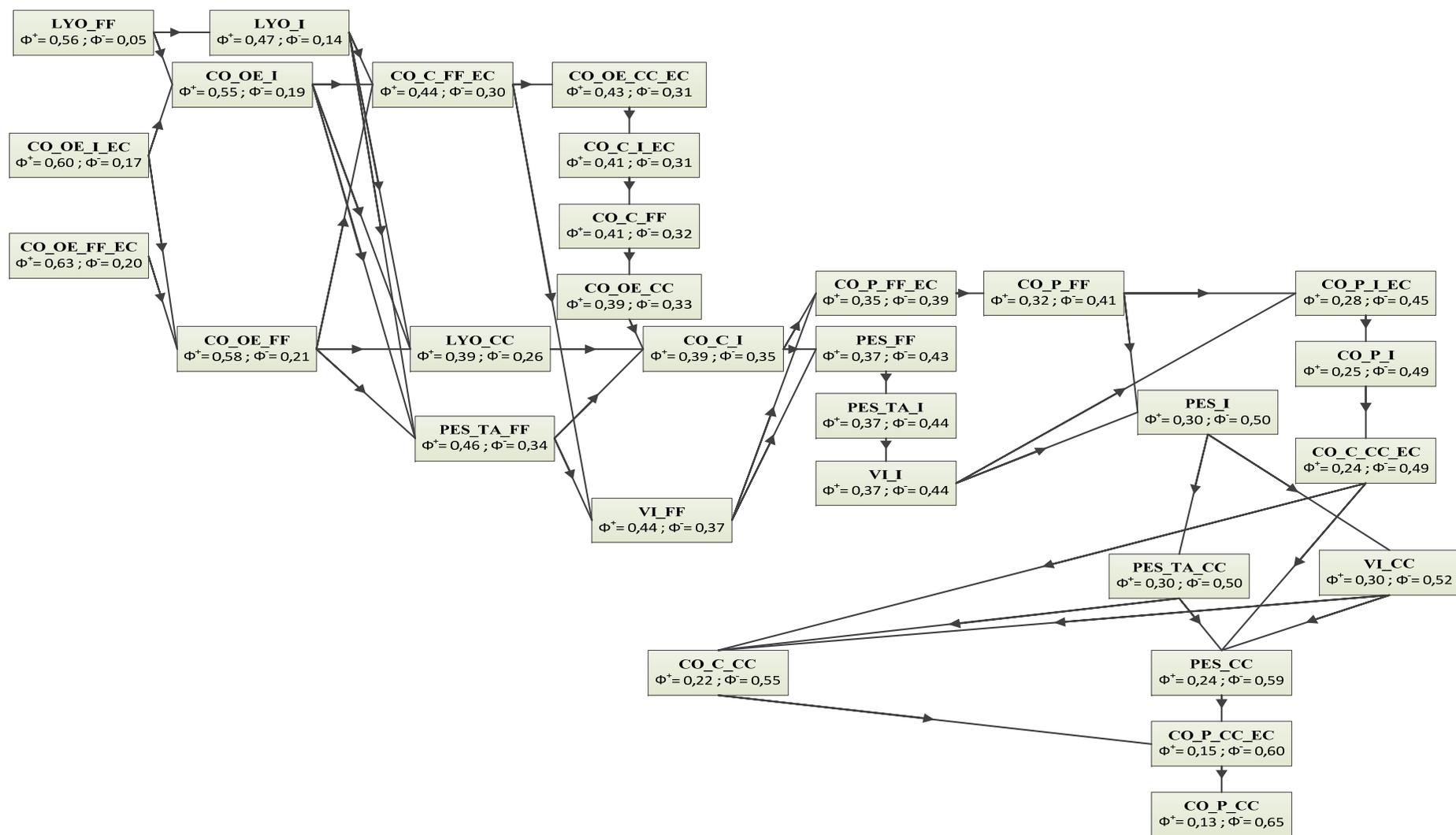


Figure 4.13. Classement partiel des scénarios avec une pondération en fonction de l'impact maximal des scénarios pour chaque critère

Ce changement de pondération modifie le classement des meilleurs et moyens scénarios mais ne change pas celui des mauvais scénarios d'un point de vue environnemental comme le montre le tableau 4.9 suivant.

Tableau 4.9. Comparaison des classements partiels des scénarios selon la pondération

Poids égaux			Poids $w_j = \max(i_n)/I_j$		
	Φ^+	Φ^-		Φ^+	Φ^-
LYO_FF	0,4286	0,0198	LYO_FF	0,5574	0,048
LYO_I	0,3678	0,0595	CO_OE_I_EC	0,5983	0,1684
CO_OE_FF_EC	0,3658	0,1146	CO_OE_FF_EC	0,631	0,2012
CO_OE_I_EC	0,3422	0,1045	CO_OE_FF	0,5773	0,2091
CO_OE_FF	0,333	0,1184	CO_OE_I	0,5531	0,1873
LYO_CC	0,3133	0,1046	LYO_I	0,4669	0,1433
CO_OE_I	0,3162	0,115	CO_C_FF_EC	0,4432	0,299
VI_FF	0,3187	0,2073	LYO_CC	0,3873	0,2553
CO_C_FF_EC	0,2502	0,1693	PES_TA_FF	0,4639	0,3449
CO_OE_CC_EC	0,2385	0,1752	CO_OE_CC_EC	0,4253	0,3098
CO_C_I_EC	0,2285	0,1819	CO_C_I_EC	0,4106	0,3146
CO_C_FF	0,2289	0,1826	CO_C_FF	0,4055	0,3226
CO_OE_CC	0,2194	0,1891	VI_FF	0,4428	0,3704
VI_I	0,2657	0,2443	CO_OE_CC	0,3916	0,3332
CO_C_I	0,2143	0,2021	CO_C_I	0,386	0,3463
PES_TA_FF	0,2621	0,2598	CO_P_FF_EC	0,3513	0,3892
VI_CC	0,216	0,2802	PES_FF	0,3749	0,4271
CO_P_FF_EC	0,1837	0,2504	PES_TA_I	0,3707	0,4359
PES_FF	0,2177	0,3104	VI_I	0,3677	0,4533
PES_TA_I	0,2165	0,3116	CO_P_FF	0,3162	0,4127
CO_P_FF	0,1673	0,267	CO_P_I_EC	0,2753	0,4543
CO_P_I_EC	0,1553	0,286	PES_I	0,3028	0,5005
CO_C_CC_EC	0,1447	0,2829	PES_TA_CC	0,2973	0,5039
CO_P_I	0,1438	0,3106	VI_CC	0,2996	0,5209
PES_I	0,1839	0,3511	CO_P_I	0,2512	0,4907
PES_TA_CC	0,1808	0,3591	CO_C_CC_EC	0,2386	0,4939
CO_C_CC	0,1332	0,3153	CO_C_CC	0,2174	0,5498
PES_CC	0,1525	0,4104	PES_CC	0,2363	0,5919
CO_P_CC_EC	0,0947	0,3754	CO_P_CC_EC	0,1535	0,5979
CO_P_CC	0,0845	0,4094	CO_P_CC	0,1318	0,6495

Les changements majeurs suite à cette pondération par rapport au cas où les poids des critères sont égaux concernent les scénarios du tee-shirt en viscose. En effet, le PES_I et le CO_P_FF_EC deviennent meilleurs que le VI_CC. Le VI_I qui était meilleur que le CO_P_FF_EC devient incomparable à celui-ci. Le PES_TA_FF, le CO_C_FF_EC et le

CO_OE_I deviennent meilleurs que le VI_FF. Le critère MAETP avec un poids égal à 24,263 est alors devenu déterminant dans le classement des scénarios. Par contre les critères FAETP et ADP avec des poids respectifs égaux à 37,095 et 41,277 n'ont pas d'influence sur le classement initial. En effet, les scénarios VI ont une faiblesse plus élevée ce qui justifie les résultats récapitulés ci-avant. Inversement, les scénarios CO gagnent surtout en puissance ce qui améliore le classement de certains comme le CO_OE_I_EC qui était légèrement meilleur que le LYO_CC devient clairement meilleur et le CO_OE_FF_EC qui était incomparable au LYO_CC devient clairement meilleur que celui-ci. En ce qui concerne le PES, les changements de résultats concernent tant la puissance que la faiblesse, surtout pour le PES_TA_FF ce qui le rend meilleur que le CO au niveau de certains scénarios tels que le CO_C_I et le CO_P_FF_EC.

En ce qui concernant la robustesse de cette pondération, les intervalles de stabilité des poids des critères sont plus larges pour la plupart des critères (EP, FAETP, GWP, MAETP, POCP, TETP et ADP) comme le montre le tableau 4.10 suivant :

Tableau 4. 10. Comparaison des intervalles de stabilité des poids des critères

	Importance égale			Importance relative		
	Poids	Min	Max	Poids	Min	Max
AP	10,00%	9,45%	10,34%	0,44%	0,00%	0,48%
EP	10,00%	9,46%	10,10%	0,10%	0,00%	2,77%
FAETP	10,00%	9,94%	10,03%	34,90%	34,89%	35,48%
GWP	10,00%	9,96%	10,41%	0,53%	0,00%	0,57%
HTP	10,00%	0,00%	100,00%	0,04%	0,00%	100,00%
MAETP	10,00%	9,66%	10,05%	22,83%	22,25%	22,86%
ODP	10,00%	0,00%	100,00%	0,02%	0,00%	100,00%
POCP	10,00%	9,96%	10,18%	0,50%	0,00%	0,61%
TETP	10,00%	9,90%	10,03%	1,80%	1,78%	2,74%
ADP	10,00%	9,97%	10,25%	38,83%	38,10%	38,85%

En comparant la stabilité des deux pondérations, les critères sont moins sensibles par rapport à l'augmentation ou la diminution des poids. Par exemple le critère GWP est sensible pour une diminution de 4% ou à une augmentation de 4,1% du poids initial pour une pondération égale pour tous les critères. Pour une pondération selon l'importance relative des critères par rapport à la pollution journalière d'une personne, Le critère GWP n'est pas sensible à une diminution jusqu'à 100% ou à une augmentation jusqu'à 7,5% de son poids initial. Cette pondération permet aussi de confirmer l'importance relative d'un nombre réduit de critères à considérer pour l'analyse de ces scénarios. En effet, la diminution du poids jusqu'à 0 des

critères AP, EP, GWP, HTP, ODP et POCP ne change pas le classement obtenu avec cette pondération. Finalement, ce classement revient à tenir compte des critères significatifs qui sont FAETP, MAETP, ADP et TETP (les impacts maximaux des scénarios relativement importants par rapport à la pollution mondiale journalière moyenne d'un individu).

4.5 Conclusion

Ce chapitre apporte une réponse à la question posée dans le chapitre 1, à savoir : « *comment rendre simple l'interprétation des résultats de l'ACV en vue d'une prise de décision raisonnée d'un bon compromis minimisant les impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit textile ?* ». Les résultats de notre travail de recherche sont obtenus en deux étapes :

- La première étape dont l'objectif est d'explicitier la diversité des scénarios, montre que l'analyse des résultats de l'ACV textile constitue un contexte décisionnel complexe et conflictuel. D'une part, les scénarios comparés sont très nombreux. Par exemple pour un tee-shirt en coton 720 scénarios de fabrication sont possibles. Si on varie la matière utilisée (viscose, polyester, polyamide, soie...), les processus de production possibles pour chacune, l'utilisation et la fin de vie, le nombre de scénarios possibles devient énormément grand. D'autre part, sur un échantillon de 30 scénarios de fabrication, les écarts entre les résultats d'ACV sont significatifs et difficilement interprétables. En effet, en optimisant de façon concomitante les impacts environnementaux évalués et listés dans le tableau 4.5, il nous est impossible de classer les 30 scénarios sans outil d'analyse. Ce travail nous permet alors de montrer la nécessité d'opter pour une méthode d'aide multicritère à la décision pour classer des scénarios selon leurs impacts environnementaux. Les résultats du surclassement partiel obtenu en appliquant la méthode PROMETHEE I dont le choix est justifié dans le chapitre 2, nous a permis de mettre en évidence plusieurs résultats probants du point de vue environnemental qui seront récapitulés en fin de cette section. Par exemple, le scénario CO_OE_FF_EC qui a la valeur minimale pour trois critères ADP, MAETP et POCP n'est finalement pas meilleur que le LYO_I qui ne minimise aucun critère. En outre, le coton qui est très impactant peut être parmi les meilleurs scénarios comme il peut être parmi les plus impactant ce qu'on ne peut pas prédire à partir des résultats de l'ACV.

- La deuxième étape dont l'objectif est d'expliquer comment appliquer la méthode PROMETHEE I dans un contexte environnemental du domaine textile, permet d'avancer les

potentialités mais aussi les limites de cette application. En premier lieu, la définition du modèle décisionnel est constituée de plusieurs choix à savoir, les critères, les seuils de préférence et la pondération des critères. Les critères que nous avons choisis sont les indicateurs d'impacts définis dans la méthode CML 2001 dont le choix est justifié dans la section 3.3 du chapitre 3. Il a été démontré aussi dans cette section, que ces critères sont sujets à des imprécisions à plusieurs niveaux. Ceci constitue un argument de choix de la modélisation floue de la préférence. La fonction de préférence choisie est alors linéaire entre deux seuils d'indifférence et de préférence. Le choix de ces seuils est basé sur la contribution de la catégorie des textiles aux impacts environnementaux générés par l'Union Européenne (tableau 1.7) qui est entre 2% et 10% du total des impacts générés par les catégories étudiées ayant des impacts potentiels. En second lieu, l'analyse de sensibilité de la pondération prouve que cette étape est cruciale et que les choix considérés à ce niveau dépendent du décideur et constitue son point de vue. En effet, le changement de pondération peut changer le classement des scénarios. Par exemple, l'attribution d'un poids plus important au critère GWP change le classement des scénarios moyens et mauvais mais les meilleurs gardent leurs positions. Cela veut dire que la classification des meilleurs scénarios n'est pas sensible au critère GWP.

Par ailleurs, notre choix de pondération consiste à considérer l'importance relative des impacts maximaux des scénarios analysés par rapport à la moyenne mondiale de la pollution journalière d'un individu. Par conséquent, le nombre de critères influents est réduit à 4 sur 10 et la pondération est plus stable donc la robustesse des résultats est meilleure. Parmi les critères qui ne sont pas influents on retrouve le critère GWP.

En ce qui concerne les résultats, le classement obtenu permet de répondre aux questions de comparaison et de choix des scénarios d'éco-conception textile et permet aussi de mettre en évidence les constatations suivantes :

- Le bon choix des procédés de fabrication notamment ceux du tricotage réduit considérablement les impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit à base d'une matière très polluante relativement à d'autres. Par exemple le tee-shirt en coton peut être très impactant s'il est peigné et coupé cousu (classé dernier sur les 30 scénarios analysés) et peut être classé parmi les premiers s'il est open-end et fully fashioned ou intégral. Dans cet exemple, le choix du processus open-end de la filature des fibres de coton réduit les impacts environnementaux. Rappelons ici que les résultats peuvent être inversés si la qualité du

produit est considérée (cf. 4.2.2.2). En effet, plus la durée de vie diminue, plus les impacts environnementaux augmentent et vice versa.

- Le produit de fonctionnalisation à savoir la résine « easy-care » améliore le classement des scénarios coton et ce en augmentant leur puissance et en réduisant leur faiblesse. Ce traitement améliorant la qualité du produit, augmente la durée de vie et réduit d'avantage les impacts de son cycle de vie (cf. 4.2.2.4).
- La teinture en autoclave du tee-shirt polyester améliore considérablement le classement des scénarios de celui-ci.

Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion générale

Dans le domaine textile de l'habillement, où tous les produits sont conçus pour inciter le client à acheter plus et plus fréquemment, il est impératif de repenser la manière de concevoir, de commercialiser, de consommer et de valoriser la fin de vie des produits afin de réduire les dégâts écologiques de plus en plus croissants. Ce secteur impliquant également une main d'œuvre immense, suscite une attention particulière concernant l'aspect social. Dans le cadre du développement durable, des nouvelles matières sont exploitées, des nouveaux procédés sont élaborés et des nouvelles stratégies sont appliquées. Cependant, il est important de vérifier si l'amélioration recherchée est atteinte ce qui revient à comparer plusieurs alternatives de conception en considérant simultanément tous les impacts. Nos travaux de recherche ont contribué à formuler quelques voies de réponses à ce questionnement.

Nous avons d'abord basé notre réflexion sur le recensement et l'analyse des méthodes et outils disponibles dans la littérature visant une intégration des dimensions environnementale et sociale dans la conception des produits. L'analyse de la filière textile nous a en particulier amené à opter pour une approche systémique et multicritère qui prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits et permet de quantifier simultanément plusieurs impacts à savoir l'Analyse du Cycle de Vie (ACV). L'évaluation de l'aspect social nous a été difficile pour plusieurs raisons à savoir la non maîtrise du domaine social, l'indisponibilité des données et l'absence de méthodologie efficace. Dès lors, nous nous sommes contentés d'une évaluation qualitative des impacts sociaux.

L'état d'art de la littérature dans le sujet de l'ACV textile nous a permis de mieux cerner la complexité de l'outil et d'avancer ses limites notamment à l'étape d'analyse des résultats. Cette étude a été complétée par une revue bibliographique des méthodes d'aide multicritère à la décision afin de compléter l'ACV et réaliser notre objectif principal qui est le rangement décroissant des scénarios évalués selon leurs critères de développement durable.

L'interprétation des résultats de l'ACV des scénarios possibles pour un même produit textile n'est pas une tâche facile. En effet, en addition au grand nombre des scénarios, le manque de connaissances écologiques notamment concernant l'importance relative à chaque impact environnemental et les incertitudes et imprécisions des données de l'inventaire du cycle de vie ne permet pas d'établir un classement des scénarios par rapports à leurs profils écologiques.

Notre proposition

Une méthode de surclassement pour un choix écologique raisonné parmi plusieurs scénarios

Analyser les résultats de l'ACV en utilisant la méthode PROMETHEE I permet de classer les scénarios en considérant simultanément tous les impacts. Ceci pouvant être la tâche d'un décideur qui n'est pas forcément spécialiste du domaine environnemental tel qu'un concepteur, un distributeur ou même un consommateur, l'application d'une méthode multicritère doit faciliter la prise de décision en explicitant les raisons du choix.

Les méthodes de surclassement constituent un bon contexte décisionnel de l'ACV dans l'industrie textile pour de nombreuses raisons à savoir la simplicité d'utilisation, les relations qui intègrent l'indifférence et l'incomparabilité, l'agrégation partielle évitant toute compensation qui peut conduire à l'omission des bons compromis. De plus la représentation floue des préférences en fonction des seuils indifférence et de préférence, permet de réduire l'incertitude liée aux résultats à cause des incertitudes des données de l'ACV. Enfin, cette méthode tient compte de plusieurs pseudo-critères de différents types : quantitatifs tels que les résultats de l'ACV et les paramètres économiques ou même qualitatifs pour la description des conditions sociales pour un contexte de développement durable. Néanmoins, la pondération des impacts environnementaux considérés comme critères reste une étape cruciale. En effet, considérer que tous les impacts environnementaux ont la même importance n'est pas écologiquement vérifié. En outre, le changement de pondération selon certains points de vue tels que l'importance focalisée sur le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources est cohérent avec la politique mondiale mais conduit à omettre d'autres impacts qui pourraient être aussi graves. Dès lors, la détermination de la gravité relative des impacts mérite d'être soigneusement étudiée. La méthodologie de détermination des poids selon les impacts liés aux scénarios de la filière textile analysés consiste à faciliter la prise de décision et cerner les impacts prépondérants afin de les réduire en faisant le meilleur choix.

Les contributions scientifiques

Nos recherches ont conduit principalement à la proposition d'un modèle de décision globale multicritère spécifique à la filière textile à partir d'une méthode existante d'aide multicritère à la décision.

Les études de cas ont explicité la complexité liée d'une part à la filière textile et d'autre part à la méthodologie d'ACV. Elles ont aussi dévoilé les faiblesses méthodologiques pour l'évaluation de certains impacts tels que le prélèvement des ressources en eau, les impacts sur la biodiversité, la prise en compte de la territorialité et les déchets de l'énergie nucléaire. En ce qui concerne les résultats, les étapes dominantes en termes d'impacts environnementaux ont été déterminées et les causes ont été trouvées. Un paramètre prépondérant dans l'ACV textile a aussi été démontré à savoir la qualité qui réduit les impacts en augmentant la durée de vie. Par conséquent la qualité et l'écologie sont proportionnelles.

En outre, la diversité des scénarios, a montré que l'analyse des résultats de l'ACV textile constitue un contexte décisionnel conflictuel et complexe. En effet, le nombre de scénarios possibles pouvant être très grand et la quantité de données à traiter pouvant être proche de l'infini, la prise en compte par un cerveau humain nécessite l'utilisation d'un outil d'aide multicritère à la décision.

Nos travaux de recherche ont été alimentés des connaissances de domaines scientifiques aussi divers que le Génie des procédés, la chimie, la supply chain management, l'aide à la décision ou encore l'agriculture.

Finalement, nos investigations s'inscrivent dans une démarche aussi pluridisciplinaire et transversale que le concept du développement durable afin de proposer des méthodes scientifiques et pragmatiques d'évaluation et d'aide à la décision pour l'amélioration des performances environnementales du cycle de vie des produits dans la filière textile.

Les contributions professionnelles

La recherche a été menée dans le cadre du démarrage d'un nouveau thème de recherche stratégique au Laboratoire GEMTEX, complémentaire aux thèmes liés aux matériaux textiles « plus écologiques ». Elle a nécessité l'apprentissage et la mise en place de nouvelles méthodologies et d'outils ce qui a intégré des aspects liés au savoir-faire des acteurs. Elle a non seulement été alimentée de publications scientifiques mais elle a également évolué à

travers des projets de recherche régionaux et européens (revue critique d'une ACV faite par Bio Intelligence Service, IMPRO-Textile, ACVTEX). En outre, des échanges avec des industriels ont également eu une part dans la construction de ces travaux.

5.2 Perspectives

Etant donné, l'étendue du domaine couvert par cette recherche, plusieurs aspects restent encore à explorer.

Du point de vue méthodologique, l'harmonisation des méthodes d'analyse des impacts du cycle de vie permettrait de réduire les incertitudes liées à la quantification des impacts. En ce qui concerne l'interprétation des résultats, revoir d'autres méthodes intégrant d'autres critères (économiques et sociaux) pourrait aboutir à des résultats plus probants dans le classement des alternatives.

Du point de vue pragmatique, l'acquisition des données relatives au secteur textile et la capitalisation des ACV textiles dans une base de données conduirait à une meilleure maîtrise de la variabilité de l'incertitude et l'imprécision des données d'ICV. En outre, l'automatisation de la variation des scénarios et la conception d'un outil combinable permettant l'extraction des résultats du logiciel d'ACV et le surclassement des résultats de tous les scénarios possibles fournirait plusieurs voies d'amélioration des performances environnementales et facilitera l'éco-conception des produits textiles.

Du point de vue technologique, réduire les impacts environnementaux du cycle de vie des produits textiles, revient aussi à améliorer les performances énergétiques des machines et à optimiser les procédés.

Références bibliographiques

- [1] CMED. La Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, Notre avenir à tous. Les nations unies; 1987.
- [2] Schiesser P, Riou S, Sfar K. Textile et développement durable: les nouvelles tendances. ECOEFF pour l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2007.
- [3] ADEME. La recherche en éco-conception : Bilan très positif de l'appel à projets de 2004. In: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Dossier de presse, 8 octobre 2007.
- [4] Legadec O. L'éco-conception en actions: de nouveaux exemples à suivre. 2ème édition, ADEME; 2006.
- [5] CE. Textiles européens: Sauvés par la recherche? L'Unité Information et Communication de la DG Recherche de la Commission européenne. 2005; RDT info: magazine de la recherche européenne 45 ; Mai 2005.
- [6] EURATEX. A vision for 2010. Décembre; 2004.
- [7] SESSI. Enquête annuelle de la branche. www.industrie.gouv.fr/sessi: Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, Ministère délégué à l'industrie, Sessi Centre d'enquêtes statistiques; 2005.
- [8] Sboui S. Modélisation, Evaluation des performances, et optimisation des flux logistiques dans la filière textile, habillement, distribution. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille (USTL); 2003.
- [9] Rivoli P. Les aventures d'un tee-shirt dans l'économie globalisée. Edition Fayard; 2007.
- [10] Hunter A, King RE, Nuttle HL. An apparel-supply system for QR retailing. Journal of the textile Institute; 83 N°3; 1992.
- [11] Hunter, Valentino. Quick Response ten years later. International Journal of Clothing Science and Technology; 7 N°4:30–40; 1995.
- [12] Dewaele J, Pant R, Schowanek D, Salducci N. Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Ariel "Actif à froid" (2006), a laundry detergent that allows to wash at colder wash temperatures, with previous Ariel laundry detergents (1998, 2001). Comparing the environmental burdens of home laundry detergent products and laundry habits in France 1998-2006. Procter & Gamble, Brussels Innovation Center, Central Product Safety -Environmental and For French Market Development Organisation; 2006.
- [13] Lee JA. Cotton as a world crop. Cotton, Agronomy monograph 24 Madison, WI: Crop Science Society of America; 24:1–25; 1984.
- [14] ADEME. Industrie de l'habillement, gestion des déchets. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 1998.

- [15] ADEME. Colloque filière et recyclage. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2008.
- [16] RDC-Environnement. État de l'art du tri et de la valorisation des textiles d'habillement, du linge de maison et des chaussures (TLC) consommés par les ménages. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2009.
- [17] Woolridge AC, Ward GD, Phillips PS, Collins M, Gandyc S. Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective. *Resources Conservation and Recycling* 46: 94–103; 2006.
- [18] Manaila I, Petcu M. Implementing the codes of conducts: a real provocation for the Romanian Garment Industry. Case Study – field research in 2 Romanian work wear producing companies. European Commission, DG Employment, Social Affairs and Equal Opportunities VP/2006/001/1289; 2006.
- [19] Weidema B. Quantifying Corporate Social Responsibility in the value chain. In: Presentation for the Life Cycle Management Workshop of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative at the ISO TC207 meeting, Johannesburg, 2002-06-12; 2002.
- [20] Barthel L, Wolf MA, Eyerer P. Methodology of Life Cycle Sustainability for Sustainability Assessments. In: 11th Annual International Sustainable Development Research Conference (AISDR), Helsinki, Finland; 06 - 08 June; 2005.
- [21] Schiesser P. Textile, environnement et développement durable- Inventaire international de 62 labels, typologie, analyse et comparaison des principaux critères de 9 labels. Identification de démarches d'entreprises et de tendances de consommation. ECOEFF pour l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2004.
- [22] ADEME. Passeport Eco-produit. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); Mars 2006.
- [23] AFNOR. Système de management de l'environnement. Sites et organismes. Association Française de Normalisation, ISBN 978-2-12-213081-0; 2009.
- [24] AFNOR. Management environnemental des produits – Eco-conception – Analyse du cycle de vie – Etiquetage environnemental – Certification écologique des produits. Association Française de Normalisation, ISBN 2-12-213062-8; 2005.
- [25] CE. Ecological criteria for the award of the Community ecolabel to textile products. European Commission Decision 1999/178/EC; 1999.
- [26] Kalliala E, Laitala K. Comparison of ecolabelling Criteria for Textile Products. *The Nordic Textile Journal* 1; 2000.
- [27] Ecolabelling Network. Ecolabelling of Textiles. Criteria document 3 December 1999, Version 2.5; 1999.
- [28] Nieminen-Kalliala E. Environmental indicators of textile products for ISO (Type III) Environmental Product Declaration. *AUTEX Research Journal*, 3 N°4 ; December 2003.
- [29] Vigneron J, Patingre J. Eco-conception : Concept, méthodes, outils, guides et perspectives. France) EP, édition Economica (Paris - France), EAN 978-2-7178-4311-8, 205 pages; 2001.

- [30] Vigneron J, Patingre J, Schiesser P. Eco-concevoir – Appliquer et communiquer - Nouvelles approches et exemples d'application. Lepage PC, Préface Corinne Lepage, Edition Economica, ISBN 2-7178-4718-9, 215 pages; 2003.
- [31] Janin M. Démarche d'éco-conception en entreprise - un enjeu : construire la cohérence en outils et processus. Thèse de doctorat ; École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM), Institut Conception, Mécanique et Environnement, Chambéry; 2000.
- [32] AFNOR. FD X 30-310, Management environmental: Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits - Principes généraux et application-lignes directrices. Association Française de Normalisation; 1998.
- [33] Lafuma. Les entreprises, acteurs de la recherche et de l'innovation- Eco-conception et innovation. In: Entretiens Louis le Grand, 29et 30 août 2005, Paris; 2005.
- [34] Bio Intelligence Services, ADEME. Etude comparative des opérations exemplaires menées dans la grande distribution en matière d'offres d'écoproduits à l'international (hors France) - RAPPORT FINAL. Bio Intelligence services pour l'ADEME; 2006.
- [35] Le-Pochat S. Intégration de l'éco-conception dans les PME: Proposition d'une méthode d'appropriation de savoir-faire pour la conception. thèse de doctorat ; Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Centre de Paris; 2005.
- [36] ADEME. Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités Guide méthodologique - version 5.0 - objectifs et principes de comptabilisation. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2007.
- [37] ADEME. Bilan Carbone® Entreprises et Collectivités GUIDE DES FACTEURS D'EMISSIONS Version 5.0 Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2007.
- [38] JOUE. Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement (CEE) n° 793/93 du conseil et le règlement (CE) n° 1488/94 de la commission ainsi que la directive 76/769/CEE du conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission. (JOUE du 30-12-2006). Commission européenne; 2007.
- [39] SETAC. Guidelines for Life-Cycle Assessment: A Code of Practice. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Brussels, 1993.
- [40] UNEP. Life Cycle Assessment: What is it and how to do it. United Nations Environment Programme, United Nations Publication, first edition, ISBN: 92-807-1546-1; 1996.
- [41] UNEP. Evaluation of environmental impacts in Life Cycle Assessment. Publication UN. Meeting report Brussels, 29-30 November 1998, and Brighton, 25-26 May 2000, United Nations Environment Programme, United Nations Publication, first edition, ISBN: 92-807-2144-5; 2003.

- [42] SETAC. Evolution and development of the conceptual framework and methodology of life-cycle impact assessment. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC); 1998.
- [43] UNEP, SETAC. Life Cycle Approaches - The road from analysis to practice. United Nations Publication, first edition; 2005.
- [44] ISO. ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization; 2006.
- [45] ADEME. Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2005.
- [46] Altmeyer S, Gueniot H, Bedel L, Pons MN. Analyse du cycle de vie comparée d'un pot à crayons réalisé dans différentes matières plastiques. In: XIIème congrès de la Société Française de Génie des Procédés pour relever les défis industriels du XXIème siècle, Marseille, France, 14-16 octobre 2009.
- [47] Grisel L, Osset P. L'analyse du cycle de vie d'un produit ou d'un service: Applications et mise en pratique. AFNOR; 2004.
- [48] Hertwich EG, Pease WS. ISO 14042 Restricts Use and Development of Impact Assessment. International Journal of Life Cycle Assessment; 3 (4):180 – 181; 1998.
- [49] Guinée JB. J.B. Guinée (final editor) et al., Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards. Publishers KA, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht (Hardbound, ISBN 1-4020-0228-9; Paperback, ISBN 1-4020-0557-1; see also <http://www.kap.nl/prod/b/1-4020-0228-9>); 2002.
- [50] Heijungs R. R. Heijungs et al. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (Part 1 and 2). of environmental science Leiden University (CML), (NOH report 9266 + 9267; ISBN 90-5191-064-9), Leiden; 1992.
- [51] Huijbregts MAJ. Uncertainty and variability in environmental life cycle assessment. Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics. University of Amsterdam; 2001.
- [52] Huijbregts MAJ. Uncertainty and variability in environmental life cycle assessment. International Journal of Life Cycle Assessment. 2002;7 (3):173.
- [53] Bare JC, Gloria TP. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. Journal of Cleaner Production (2007); Volume 16, Issue 10:1021 – 1035; 2008.
- [54] Jolliet O, Cotting K, Drexler C, Farago S. Life-cycle analysis of biodegradable packing materials compared with polystyrene chips: the case of popcorn. Agriculture, Ecosystems & Environment;49, Issue 3,:253–266 ; 1994.
- [55] Orsenna E. Voyage aux pays du coton Petit précis de mondialisation. Edition Fayard, ISBN : 2213625271; 2006.
- [56] USDA. Oilseeds: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (FAS), Décembre, 2008.
- [57] Weidema BP, Wesnaes MS. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. Journal of Cleaner Production; 4, No. 3-1:167–174; 1996.

- [58] Weidema PB. Market information in life cycle assessment. Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 863; 2003.
- [59] ISO. ISO/TR 14049: Environmental management - Life Cycle Assessment -Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis. International Organization for Standardization; 2000.
- [60] Frischknecht R, et al. The ecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. International Journal of Life Cycle Assessment; 1 – 7; 2004.
- [61] Weidema PB, Fress N, Petersen EH, Ølgaard H. Reducing Uncertainty in LCI Developing a Data Collection Strategy. Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project No. 862; 2003.
- [62] Wenzel H, Hauschild MZ, Alting L. Environmental assessment of products. Vol. 1 - Methodology, tools, techniques and case studies. Chapman & Hall, United Kingdom, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA. ISBN 0 412 80800 5; 1997.
- [63] Hauschild MZ, Wenzel H. Environmental assessment of products. Vol. 2 - Scientific background. Chapman & Hall, United Kingdom, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA. USA. ISBN 0412 80810 2; 1998.
- [64] Hauschild M, Potting J. Spatial differentiation in life cycle impact assessment – the EDIP2003 methodology. Guidelines from the Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 2004 (in press); 2004.
- [65] Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-indicator 99: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment - Methodology report. PRé Consultants B.V, third Edition; 2001.
- [66] ISO. ISO/TR 14047: Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042. International Organization for Standardization; 2003.
- [67] Hertwich EG, Hammitt JK, Pease W. A theoretical foundation for Life-Cycle Assessment: recognizing the roles of values in environmental decision making. Journal of industrial ecology. 4, n°1:2000.
- [68] Goedkoop M, Schryver AD, Oele M. Introduction to LCA with SimaPro 7. PRé Consultants Version 4.0, Mars 2006.
- [69] ILCD. Background Document: Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in in Life Cycle Assessment (LCA) - Draft for public consultation,. International Reference Life Cycle Data System (ILCD), European Commission Joint Research Centre contract no.383163 F1SC; 2009.
- [70] Dreyer LC, Niemann AL, Hauschild MZ. Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 - Does it matter which one you choose? International Journal of Life Cycle Assessment;8 (4):191 – 200 ; 2003.
- [71] Jolliet O, Saadé M, Crettaz P. Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, ISBN: 2-88074-568-3; 2005.
- [72] Curran MA, Notten P. Summary of global Life Cycle Inventory data resources. Task Force 1: Database Registry , SETAC/UNEP Life Cycle Initiative; 2006.

- [73] INTERNATIONAL P. GaBi 4: Software and Database for Life Cycle Engineering. PE INTERNATIONAL GmbH, Stuttgart; 2007.
- [74] Tukker A, Huppes G, Guinée J, Heijungs R, Koning AD, Oers LV, et al. Environmental Impact of Products (EIPRO) – Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25 - Main report. IPTS/ESTO project. European Commission, Joint Research Centre, EUR 22284; 2006.
- [75] INDSTAT. Statistics of UNIDO (United Nations Industrial Development Organisation). Industrial Statistics Database (INDSTAT); 2006.
- [76] VP. Bangladesh - Le prix de nos T-shirts. Un dossier d'information de la Campagne Vêtements Propres, Avril 2007, www.vetementspropres.be; 2007.
- [77] IFM. Study on the competitiveness, economic situation and location of production in the textiles and clothing, footwear, leather and furniture industries - Final report (volume 1). Institut Français de la Mode; 2007.
- [78] Allwood M, Laursen SE, de Rodríguez CM, Bocken NMP. Well dressed - The present and future sustainability of clothing and textiles in the United Kingdom. University of Cambridge Institute for Manufacturing, ISBN 1-902546-52-0; 2006.
- [79] VP. Chine - Agir pour les droits des travailleurs - Introduction à la situation des travailleurs de l'habillement en Chine. Un dossier d'information de la Campagne Vêtements Propres, www.vetementspropres.be; Octobre 2006.
- [80] Alam K, Bahn E, Bormann S, Burckhardt G, Giese G, Saam D, et al. Who pays for our clothing from Lidl and kik ? - A study into the impact of buying practices of the discounters Lidl and KiK in Bangladesh and the precarisation of working conditions in German retailing. Clean Clothes Campaign, German edition published in January 2008, English edition available on the website www.cleanclothes.org; July 2008.
- [81] Seidman LA. Textile Workers in Turkey, 1922-2003. In: National overview Turkey 2, Textile conference IISH, 11-13 Nov. 2004.
- [82] Crabbé C, de Schutter R, Lambert D, Scohier C, Théau B. La Mode déshabillée - 12 questions sur l'emploi dans la confection textile. Oxfam Magasins du monde (Belgique), ORCADES (France) et Déclaration de Berne (Suisse) avec le soutien de la Commission Européenne; 1998.
- [83] WDDW. Bargaining for a Living Wage - A trade union guide. World Day for Decent Work (WDDW), International Textile, Garment and Leather Workers' Federation (ITGLWF); 2008.
- [84] Oldenziel J. The reality behind the code - Working conditions in garment factories producing for Vendex KBB. SOMO Centre for Research on Multinational Corporations, The Netherlands; 2001.
- [85] Lally A. Wages in Turkey's Garment and Textile Sector - Briefing Paper No. 2. Joint Initiative on Corporate Accountability and Workers Rights (Jo-In); 2005.
- [86] van der Vegt S. Social auditing in Bulgaria, Romania and Turkey - Results from survey and case study research. International Labour Organization, Ankara, Turkey, ISBN 92-2-117573-1 (print), ISBN 92-2-117574-X (web pdf), First Edition 2005; 2005.

- [87] Kemp M. Working for Life - Source book on occupational health for women. Editor, Isis International-Manila and Melody Kemp, ISBN 971-8829-08-3; 1999.
- [88] IPCC. Climate Change 1992 - The supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Programme (UNEP); 1992.
- [89] WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion - Executive Summary, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44. World Meteorological Organization (WMO), United Nations Environment Programme (UNEP), European Commission, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration; 1998.
- [90] Kalliala E. The Ecology of Textiles and Textile Services - A LCA Assessment Study on Best Available Applications and Technologies for Hotel Textile Production and Services. Tampere University Technology Publications 214, 1997, Finland; 1997.
- [91] Frydendal J. Comparison of different bed pads alternatives using the LCA methodology. Sophus Berendsen A/S, Søborg, Denmark; 2001.
- [92] Tobler M, Schaerer S. Environmental impacts of different cotton growing regimes 26. In: International cotton conference, Bremen, March 13 - 16, 2002.
- [93] EPA. Best Management Practices for Pollution Prevention in the textile industry. United States Environmental Protection Agency; 1996.
- [94] IFTH, ADEME. Industrie de la confection: La maîtrise des consommations d'énergie. Institut français du Textile-Habillement (IFTH) et Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME); 2004.
- [95] Franklin-Associates. Resource and Environmental Profile Analysis of a Manufactured Apparel Product, Life Cycle Analysis (LCA): Woman's Knit Polyester Blouse. Franklin Associates, LTD. <http://www.fibersource.com/f-tutor/LCA-Page.htm>; 1993.
- [96] Laursen SE, Hansen J, Knudsen HH, Wenzel H, Larsen HF, Kristensen FM. EDIPTX – Environmental assessment of textiles. Working Report no 4,. translated to English by Danish Environmental Protection Agency; 2007.
- [97] Collins M, Aumônier S. Streamlined Life Cycle Assessment of Two Marks & Spencer plc Apparel Products. Environmental Resources Management; 2002.
- [98] Blackburn RS, Payne JD. Life cycle analysis of cotton towels: impact of domestic laundering and recommendations for extending periods between washing. The Royal Society of Chemistry;6:59–61; 2004.
- [99] Aumônier S, Collins M. Life Cycle Assessment of Disposable and Reusable Nappies in the UK. Environment Agency, ISBN: 1-84-432427-3; ISBN: 1-84-432427-3; 2005.
- [100] Allwood JM, Laursen SE, de Rodríguez CM, Bocken NMP. An approach to scenario analysis of the sustainability of an industrial sector applied to clothing and textiles in the UK. Journal of Cleaner Production; Volume 16, Issue 12:1234–1246; 2008.
- [101] Dahllof L. LCA method problems in the textile field: examples from a case study. COST628, WG 1, Denkendorf; 2002.

- [102] Dahllöf L. Life Cycle Assessment (LCA) applied in the Textile Sector: the Usefulness, Limitations and Methodological Problems – A Literature Review. Environmental Systems Analysis Chalmers Tekniska Högskola Göteborg, ESA-Report 2003:9 Revised Nov. 10th 2004, ISSN: 1404-8167; 2003.
- [103] Dahllöf L. LCA Methodology Issues for Textile Products. Environmental Systems Analysis Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden; 2004.
- [104] Dahllöf L. Methodological Issues in the LCA Procedure for the Textile Sector-A case study concerning fabric for a sofa. Environmental Systems Analysis, ESA- Technical Report: 2004:7, ISSN: 1404-8167; 2004.
- [105] ADEME, BioIS. L'éco-profil d'un pantalon en jean Comment agir pour réduire les impacts environnementaux de son pantalon en jean. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Bio Intelligence Service; 2005.
- [106] Barber A, Pellow G. Life Cycle Assessment: New Zealand Merino Industry Merino Wool Total Energy Use and Carbon Dioxide Emissions. The AgriBusiness Group; 2006.
- [107] Gungor A, Palamutçu S, Kiz Y. Life Cycle Assessment of 100% Cotton Bathrobe. In: International Conference of Applied Research in Textile, CIRAT-3, Sousse, Tunisia; 2008.
- [108] Frydendal J. Danish Initiatives on LCA and Textiles. LCA Centre Denmark. In: COST 628 Conference, Tampere, Finland, September; 2005.
- [109] NREL. U.S. LCI Database Project - Phase I Final Report. NREL/SR-550-33807, August. Athena™ Sustainable Materials Institute, Franklin Associates, Sylvatica, National Renewable Energy Laboratory (NREL), <http://www.nrel.gov/lci/>; 2003.
- [110] Nieminen E, Linke M, Tobler M, Beke BV. EU COST Action 628: life cycle assessment (LCA) of textile products, eco-efficiency and definition of best available technology (BAT) of textile processing. Journal of Cleaner Production;15:1259–1270; 2007.
- [111] ELCD database II; 2006; Available from: <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/-datasetArea.vm>.
- [112] EC. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Textiles Industry. Draft dated February 2001. European commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies (Seville), Technologies for Sustainable Development, European IPPC Bureau; 2001.
- [113] Schönberger H, Schäfer T. Best Available Techniques in Textile Industry. Environmental research of the federal ministry of the environment, nature conservation and nuclear safety, Research Report 200 94 329, UBA-FB 000325/e, Texte 14 03 ISSN 0722-186X; 2003.
- [114] Marbek. Identification and Evaluation of Best Available Technologies Economically Achievable (BATEA) for Textile Mill Effluents, Textile Mill Effluents Study: Final Phase 1 Report. by Marbek Resource Consultants in association with Fintex Mechanical & Process Inc. Hara Associates and Crechem Technologies Inc. for Environmental Protection Branch, Environment Canada; 2001.

- [115] Kalliala E, Talvenmaa P. The Finnish Background Report for the EC documentation of Best Available Techniques for Wet Processing in Textile Industry. Finnish Environmental institute; 2002.
- [116] EU Project - BRITE/EURAM 3 BRPR 960252: New clean process for textile dyeing e supercritical fluid dyeing system avoiding effluents and leading to energy and water savings; 1994 - 1998.
- [117] Hertwich EG, Hammitt JK. A decision –analytic Framework for impact assessment, Part 2, Midpoints, Endpoints, and criteria for method development. *International Journal of LCA*; 6 N° 5:265–272; 2001.
- [118] Hertwich EG, Hammitt JK. Decision-analytic framework for impact assessment. Part I: LCA and decision analysis. *International Journal of Life Cycle Assessment*; 6(1):5–12; 2001.
- [119] Chevalier J, Rousseaux P. Classification in LCA: Building of a coherent family of criteria. *International Journal of LCA*; 4 N°6:352–356; 1999.
- [120] Jolly AM. Multicriteria decision making for product design in the frame of sustainable development. *Supply chain forum: an international journal*; 10 N°1:52–60; 2009.
- [121] Heijungs R, Kleijn R. Numerical approaches towards life cycle interpretation: five examples. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University; 2000.
- [122] Belton V. Multiple Criteria Decision Analysis practically the only way to choose. *Operational research, tutorial papers*, edited by L.C. Hendry, R.W. Eglese, Operational society, Birmingham; 1990.
- [123] Roy B, Bouyssou D. Aide Multicritère à la décision: Méthodes et cas. Paris, Editions Economica; 1993.
- [124] Benoit V, Rousseaux P. Aid for aggregating the impacts in life cycle Assessment. *International Journal of LCA*; 8 N°2:74–82; 2003.
- [125] French S, Geldermann J. The varied contexts of environmental decision problems and their implications for decision support. *Environmental Science & Policy*;8:378–391; 2005.
- [126] Geldermann J, Rentz O. Multi-criteria analysis for the assessment of environmentally relevant installations. *Journal of Industrial Ecology*; 9(3):127 – 142; 2005.
- [127] Seppala J. Life cycle impact assessment based on decision analysis. Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics Systems Analysis Laboratory; 2003.
- [128] Miettinen P, Hamalainen RP. How to benefit from decision analysis in environmental life cycle assessment (LCA). *European Journal of Operational research*. 1997;102: 279–294.
- [129] Werner F. Ambiguities in Decision-oriented - The Role of Mental Models and Values. www.springeronline.com, editor. Springer, ISBN-10 1-4020-3254-4 (e-book); 2005.
- [130] Werner F, Scholz RW. Ambiguities in decision-oriented life cycle inventories. *International Journal of Life Cycle Assessment*;7(6):330–338; 2002.

- [131] Hertwich EG, Pease WS, Koshland CP. Evaluating the environmental impact of products and production processes: a comparison of six methods. *The Science of the Total Environment*; 196: 13–29; 1997.
- [132] Basson L, Petrie JG. Decision making during early stages of a project life cycle: Roles for multiple criteria decision analysis, Life Cycle assessment and Ecological Risk Assessment. In: SETAC 20th Annual meeting, Philadelphia, 14-18 November; 1999.
- [133] Basson L, Perkins AR, Petrie JG. The evaluation of pollution prevention alternatives using non-compensatory multiple criteria decision analysis methods. In: Presentation Record 230c. Annual Meeting of the American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Los Angeles, CA, November 2000. AIChE Manuscript Center, New York; 2000.
- [134] Seppala J, Basson L, Norris GA. Decision analysis frameworks for life cycle impact assessment. *Journal of industrial ecology*; 5 N°4:45–68; 2002.
- [135] Téno JFL, Mareschal B. An interval version of PROMETEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. *European Journal of Operational Research*; 109:522–529; 1998.
- [136] Jutta Geldermann OR. Multi-criteria analysis for technique assessment: Case study from industrial coating. *Journal of Industrial Ecology*; 9(3):127–142; 2005.
- [137] Roy B. The optimisation problem formulation : criticism and overstepping. *The Journal of the Operational Research Society*; 32, N°6:427–436 ; 1981.
- [138] Roy B. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris, édition. Economica; 1985.
- [139] Jolly AM, Boufateh I, Rabenasolo B, Perwuelz A, Jolly D. Analyse de Cycle de Vie et Analyse Multicritère pour l'éco-conception des produits textiles. In: La conférence Internationale CPI'2009 du 19 au 21 octobre à Fès, accepté pour une publication dans la Revue d'Ingénierie Numérique Collaborative; 2009.
- [140] Scharlig A. *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*. Lausanne S, editor. Presses polytechniques et universitaires romandes; 1985.
- [141] Roy B. Classement et choix en présence de points de vue multiples : La méthode ELECTRE. *Revue Française d'informatique et de Recherche Opérationnelle*; 8:57–75 ; 1968.
- [142] Brans JP, Mareschal B, Vincke P. PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. JP Brans (ed), *Operational Research'84*, Elsevier Science Publishers BV (North-Holland); 84:408–421; 1984.
- [143] Mena SB. *Une approche de la gestion environnementale en plein essor : les méthodes multicritères d'aide à la décision*. Unité de Mathématique, Faculté Universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux; 2000.
- [144] Research M. *World Trade in T-Shirts-Textiles Intelligence*. February 1, 2008, 22 Pages - Pub ID: TXI1685497, www.marketresearch.com; 2008.
- [145] CIRAD. *Le coton: fil des temps, des marchés et des cultures*. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement; 2006.

- [146] European Commission, Directorate-General Trade; Eurostat (Comext); 2005.
- [147] Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecological Economics*; 60:186–203 ; 2006.
- [148] IFM-Ctcoe. Les données clés du textile-habillement chinois. Etudes et conjoncture IFM-Ctcoe; 2004.
- [149] Boufateh I, Perwuelz A, Rabenasolo B, Jolly AM. Life Cycle Assessment: data availability, reliability and robustness in textile industry. In: Working towards change: Academy and Industry together, 8th Autex Conference, Biella – Italy, June 24-26; 2008.
- [150] CNUCED, données 2003 pour les Etats-Unis, <http://www.unctad.org/infocomm/francais/coton/culture.htm>.
- [151] Munier DJ, Long RF, Klonsky KM, Shimada JJ, Moura RLD. Sample costs to produce California upland cotton. University of California Cooperative Extension, Sacramento Valley; 2002.
- [152] Kooistra K, Termorshuizen A. The sustainability of cotton : Consequences for man and environment. *Biological Farming Systems*, Wageningen University, Chapter 5 written by R. Pyburn Communication and Innovation Studies, Wageningen University, Report 223; 2006.
- [153] Zhen L, Zoebisch MA, Chen G, Feng Z. Sustainability of farmers' soil fertility management practices: A case study in the North China Plain. *Journal of Environmental Management*; 79:409–419; 2006.
- [154] Pray C, Ma D, Huang J, Qiao F. Impact of Bt Cotton in China. *World Development*; 29 N°5:813–825; 2001.
- [155] Wick I, Jakarta UCMP, Kloos D, main English translation: J McLaughlin. Aldi's clothing bargains – discount buys discounting standards? Working conditions in Aldi's suppliers in China and Indonesia: Suggestions for consumer and trade union action. SÜDWIND Institut für Ökonomie und Ökumene, ISBN 978-3-929704-37-4; 2007.
- [156] Frischer K. 1er Forum Européen de l'Eco-conception - 1/10/2003. In: Institut français du textile-habillement (IFTH); 2003.
- [157] OECD. Economic, Environmental and Social Statistics - ISBN 92-64-04054-4. OECD Factbook 2008.
- [158] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of LCA*; 8 (6):324–330; 2003.
- [159] Bare JC, Norris GA, Pennington DW, McKone T. TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*; 6(3):49–78; 2003.
- [160] SSODD. Soil Survey Report in Ningjin County. SSODD, P.R. China. SSODD (Soil Survey Office of Dezhou District); 2001.

Sites internet

Données statistiques

www.industrie.gouv.fr/sessi

<http://www.unctad.org/infocomm/francais/coton/descript.htm>

www.marketresearch.com

Données environnementales

<http://www.citepa.org/pollution/sources.htm>

<http://icac.org/>

<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/index.html>.

<http://www.pre.nl/eco-indicator99/>

<http://ipt.dtu.dk/~mic/EDIP97>

<http://ipt.dtu.dk/~mic/EDIP2003>

<http://www.epfl.ch/impact>

http://epa.gov/ORD/NRMRL/std/sab/iam_traci.htm

<http://www.citepa.org/pollution/sources.htm>

<http://www.ecoinvent.org/>

<http://www.nrel.gov/lci/>

ELCD database II: <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>

Données sociales

www.ilo.org

www.sa-intl.org

<http://www.fibrecitoyenne.org/>

www.accountability21.net

<http://www.fairtrade.net/standards.html>

www.cleanclothes.org

www.vetementspropres.be

<http://www.ethique-sur-etiquette.org/>

Annexes

Annexe 1 : Principaux polluants et principaux indicateurs d'impacts environnementaux

	198
A1.1 Principaux polluants	198
Particules solides	198
SO ₂ - Dioxyde de soufre	198
NO _x - Oxydes d'azote	198
CO - Monoxyde de carbone	198
COV - Composés organiques volatils	198
CO ₂ - Dioxyde de carbone	199
CH ₄ - Méthane	199
N ₂ O - Protoxyde d'azote	199
O ₃ - Ozone	200
H ₂ S - Hydrogène sulfure	200
NH ₃ – Ammoniac	200
Métaux lourds	200
DCO	201
A1.2 Les normes d'émission Euro	202
A1.3 Quelques indicateurs d'impacts environnementaux et leurs coefficients d'équivalence	202
Potentiel d'épuisement des ressources	202
Potentiel d'acidification	206
Potentiel d'eutrophisation	207
Réchauffement climatique ou effet de serre	208
Potentiel de formation de l'ozone photochimique	208
Annexe 2 : les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (modèles de caractérisation)	211
CML 2001	211
Eco-indicator 99	214
EDIP 97 et EDIP 2003	214
Impact 2002+	215
TRACI	216
Annexe 3 : Liste des scénarios analysés en variant les fibres, les procédés de filature, de tricotage, de teinture et le produit de fonctionnalisation	218

Annexe 1 : Principaux polluants et principaux indicateurs d'impacts environnementaux

A1.1 Principaux polluants

Particules solides

Elles sont à l'origine de la pollution de poussière.

SO₂ - Dioxyde de soufre

Les rejets de SO₂ sont dus en grande majorité à l'utilisation de **combustibles fossiles soufrés** (charbon, lignite, coke de pétrole, fuel lourd, fuel domestique, gazole). Quelques procédés industriels mettent également des oxydes de soufre (production d'acide sulfurique, production de pâte à papier, raffinage du pétrole, etc.).

NO_x - Oxydes d'azote

Les oxydes d'azote proviennent comme le SO₂ essentiellement de la **combustion des combustibles fossiles** et de quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, **fabrication d'engrais**, traitements de surface,...). Les principaux émetteurs sont les grandes installations de combustion et surtout les véhicules **automobiles** (d'où une politique de réduction au moyen de pots catalytiques par exemple).

CO - Monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est produit par des **combustions** incomplètes généralement dues à des installations mal réglées. Il est aussi présent dans les rejets de certains procédés industriels (agglomération de minerais, aciéries, incinération de déchets), mais surtout dans les gaz d'échappement des véhicules **automobiles**.

COV - Composés organiques volatils

Les COV regroupent une multitude de substances et ne correspondent pas à une définition très précise. Les hydrocarbures appartiennent aux COV, mais il est fréquent de distinguer séparément le méthane (CH₄) qui est un COV particulier naturellement présent dans l'air, des autres COV, pour lesquels on emploie alors la notation COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques). Les sources de COV sont très nombreuses. Les émissions sont dues à certains procédés industriels impliquant la mise en œuvre de **solvants** (chimie de base et chimie fine, parachimie, dégraissage des métaux, application de peinture, imprimerie, colles et adhésifs, caoutchouc,...), ou n'impliquant pas de solvants (raffinage du pétrole, production de boissons alcoolisées, de pain,...). On retrouve les **transports**, surtout automobile, au premier rang des émetteurs.

CO₂ - Dioxyde de carbone

L'importance attribuée au CO₂ provient de l'accroissement rapide de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère par suite d'une augmentation de la consommation d'énergie fossile dans le monde et d'une diminution importante des couverts forestiers. Par ailleurs les océans jouent un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre général en carbone. L'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère, dans les proportions que nous connaissons, ne poserait probablement pas de problème à l'homme avant très longtemps s'il n'y avait pas le phénomène d'accroissement de **l'effet de serre** et ses conséquences potentielles d'ordre socio-économique plus ou moins dramatiques selon les experts. Une forêt de type tropical absorbe de 1 à 2 kg de CO₂ par m² et par an tandis qu'une forêt européenne ou un champ cultivé n'absorbe que de 0,2 à 0,5 kg de CO₂ par m² et par an.

CH₄ - Méthane

Il occupe une place à part parmi les COV. Il participe directement au phénomène d'accroissement de **l'effet de serre** (sa contribution est estimée à environ **18 %**) **et sa concentration dans l'air ambiant augmente encore plus vite que celle du CO₂**. Les principales sources émettrices sont : l'exploitation des mines de charbon, les décharges d'ordures ménagères, l'élevage et la distribution du gaz.

N₂O - Protoxyde d'azote

Le N₂O ou protoxyde d'azote est un composé oxygéné de l'azote. Il participe au phénomène de l'accroissement de **l'effet de serre** avec, entre autres, le CO₂ et le CH₄. Le N₂O est émis

lors de la **combustion des combustibles fossiles**, par quelques procédés industriels, par les véhicules **automobiles** et par les **sols** (surtout ceux cultivés avec des engrais azotés).

O₃ - Ozone

C'est un élément intermédiaire important du processus de formation et d'évolution des oxydants photochimiques. L'ozone stratosphérique (situé dans la haute atmosphère) nous protège des rayons UV du soleil, tandis que **l'ozone troposphérique** (situé dans la basse atmosphère) est un polluant très toxique car il est en contact direct avec l'homme et les autres écosystèmes. Il n'y a que très peu de sources industrielles d'ozone.

H₂S - Hydrogène sulfure

Connu pour son odeur et pour sa toxicité supérieure à celle du dioxyde de soufre, il est utile de savoir que l'odeur disparaît avant d'atteindre le seuil de toxicité. Le H₂S est surtout produit par les usines de production de pâte à papier et par les raffineries de pétrole.

NH₃ - Ammoniac

Les activités agricoles constituent l'essentiel des sources émettrices.

Métaux lourds

- L'arsenic (As) provient, d'une part, de traces de ce métal dans les combustibles minéraux solides ainsi que dans le fioul lourd et, d'autre part, dans certaines matières premières utilisées notamment dans des procédés comme la production de verre, de métaux non ferreux ou la métallurgie des ferreux.
- Le cadmium (Cd) pour sa part est émis essentiellement par la production de zinc et l'incinération de déchets et la combustion à partir des combustibles minéraux solides, du fioul lourd et de la biomasse.
- Le chrome (Cr) provient essentiellement de la production de verre, de ciment, de la métallurgie des ferreux et des fonderies.
- Le cuivre (Cu) provient majoritairement de l'usure des caténaires induit par le trafic ferroviaire. Par ailleurs, comme pour les autres métaux lourds, les procédés de la métallurgie des métaux ferreux et non-ferreux, le traitement des déchets et la combustion constituent, à des degrés divers, les principales sources émettrices de cuivre.

- Le mercure (Hg) est émis en quantité faible, mais toujours trop importante, par la combustion du charbon, du pétrole, la production de chlore, mais aussi par l'incinération de déchets ménagers, hospitaliers et industriels. Les actions préventives ont permis de diminuer les émissions de mercure de façon notable au cours des dernières années.
- Le nickel (Ni) est émis essentiellement par la combustion du fioul lourd qui contient de traces de ce métal.
- Le plomb (Pb), était principalement émis par le trafic automobile jusqu'à l'interdiction de l'essence plombée (Janvier 2000). Les autres sources de plomb sont la première et la seconde fusion du plomb, la fabrication de batteries électriques et la fabrication de certains verres (cristal). La toxicité du plomb est très élevée, c'est pourquoi les émissions sont très sévèrement réglementées à des niveaux même très faibles.
- Le Sélénium (Se) provient essentiellement de la production de verre et de la combustion du fioul lourd.
- Le Zinc (Zn) provient de la combustion du charbon et du fioul lourd mais aussi de certains procédés industriels appartenant à la métallurgie des ferreux et non ferreux ainsi qu'à l'incinération des déchets.

DCO

Pour déterminer la pollution globale de l'eau, il existe plusieurs paramètres, caractérisant la pollution d'un groupe de composés déterminés. Parmi ces paramètres, se trouve la DCO (demande chimique en oxygène) permettant de quantifier la pollution globale d'une eau par des composés organiques. C'est un des principes les plus utilisés pour estimer les taxes de pollution payées par les entreprises. La DCO représente la quantité d'oxygène (en milligrammes par litre) nécessaire pour oxyder les composés organiques présents dans l'eau. Plus cette valeur est élevée, plus il y a de substances à oxyder donc, moins il y a d'oxygène disponible pour les animaux aquatiques, ce qui peut provoquer pour les cas les plus graves, des disparitions d'espèce.

La quantité de matières biodégradables en 5 jours par oxydation biochimique (oxydation par des bactéries aérobies qui tirent leur énergie de réactions d'oxydoréduction) contenue dans

l'eau à analyser est définie par le paramètre DBO5 (demande biochimique en oxygène). Dans une eau résiduaire urbaine (ERU), le rapport *DCO / DBO5* est de l'ordre de 2 jusqu'à 2,6.

Source : <http://www.citepa.org/pollution/sources.htm>

A1.2 Les normes d'émission Euro

Les normes d'émission Euro fixent les limites maximales de rejets polluants pour les véhicules roulants. Il s'agit d'un ensemble de normes de plus en plus strictes s'appliquant aux véhicules neufs. L'objectif est de réduire la pollution atmosphérique due au transport routier.

La législation européenne est de plus en plus sévère sur les rejets des moteurs diesels. Les normes d'émissions « Euro » se succèdent. La mise en œuvre se fait dans des délais légèrement décalés pour les moteurs diesel et essence

Euro 0 : véhicules mis en service après 1988 ;

Euro 1 : véhicules mis en service après 1993 ;

Euro 2 : véhicules mis en service après 1996 ;

Euro 3 : véhicules mis en service après 2000 ;

Euro 4 : véhicules mis en service après 2005 ;

Euro 5 : après septembre 2009 pour la réception et janvier 2011 pour l'immatriculation de véhicules neufs ;

Euro 6 : après septembre 2014 pour la réception et septembre 2015 pour l'immatriculation de véhicules neufs.

A1.3 Quelques indicateurs d'impacts environnementaux et leurs coefficients d'équivalence

Potentiel d'épuisement des ressources

Mesure la consommation de ressources naturelles non renouvelables. L'unité équivalente est l'antimoine (Sb) qui se trouve dans certains endroits sous forme de minerais riches.

Tableau A1.3. 1. Facteurs d'équivalences des ressources du potentiel d'épuisement des ressources

Nom anglais	Equivalence d'un kilogramme de ressource en masse équivalente d'antimoine
actinium (Ac)	6,33E+13
aluminium (Al)	1,00E-08
antimony (Sb)	1,00E+00
argon (Ar)	4,71E-07
arsenic (As)	9,17E-03
barium (Ba)	1,06E-10
beryllium (Be)	3,19E-05
bismuth (Bi)	7,31E-02
boron (B)	4,67E-03
bromine (Br)	6,67E-03
cadmium (Cd)	3,30E-01
calcium (Ca)	7,08E-10
cerium (Ce)	5,32E-09
cesium (Cs)	1,91E-05
chlorine (Cl)	4,86E-08
chromium (Cr)	8,58E-04
cobalt (Co)	2,62E-05
copper (Cu)	1,94E-03
dysprosium (Dy)	2,13E-06
erbium (Er)	2,44E-06
europium (Eu)	1,33E-05
fluorine (F)	2,96E-06
gadolinium (Gd)	6,57E-07
gallium (Ga)	1,03E-07
germanium (Ge)	1,47E-06
gold (Au)	8,95E+01
hafnium (Hf)	8,67E-07

Nom anglais	Equivalence d'un kilogramme de ressource en masse équivalente d'antimoine
helium (He)	1,48E+02
holmium (Ho)	1,33E-05
indium (In)	9,03E-03
iodine (I2)	4,27E-02
iridium (Ir)	3,23E+01
iron (Fe)	8,43E-08
kalium (K; potassium)	3,13E-08
krypton (Kr)	2,09E+01
lanthanum (La)	2,13E-08
lead (Pb)	1,35E-02
lithium (Li)	9,23E-06
lutetium (Lu)	7,66E-05
magnesium (Mg)	3,73E-09
manganese (Mn)	1,38E-05
mercury (Hg)	4,95E-01
molybdenum (Mo)	3,17E-02
neodymium (Nd)	1,94E-17
neon (Ne)	3,25E-01
nickel (Ni)	1,08E-04
niobium (Nb)	2,31E-05
osmium (Os)	1,44E+01
palladium (Pd)	3,23E-01
phosphorus (P)	8,44E-05
platinum (Pt)	1,29E+00
polonium (Po)	4,79E+14
praseodymium (Pr)	2,85E-07
protactinium (Pa)	9,77E+06

Nom anglais	Equivalence d'un kilogramme de ressource en masse équivalente d'antimoine
radium (Ra)	2,36E+07
radon (Rn)	1,20E+20
rhenium (Re)	7,66E-01
rhodium (Rh)	3,23E+01
rubidium (Rb)	2,36E-09
ruthenium (Ru)	3,23E+01
samarium (Sm)	5,32E-07
scandium (Sc)	3,96E-08
selenium (Se)	4,75E-01
silicium (Si; silicon)	2,99E-11
silver (Ag)	1,84E+00
Sodium (Na)	8,24E-11
strontium (Sr)	1,12E-06
sulfur (S)	3,58E-04
tantalum (Ta)	6,77E-05
tellurium (Te)	5,28E+01
terbium (Tb)	2,36E-05
thallium (Tl)	5,05E-05
thorium (Th)	2,08E-07
thulium (Tm)	8,31E-05
tin (Sn)	3,30E-02
titanium (Ti)	4,40E-08
tungsten (W); wolfram	1,17E-02
uranium (U)	2,87E-03
vanadium (V)	1,16E-06
xenon (Xe)	1,75E+04
ytterbium (Yb)	2,13E-06

Nom anglais	Equivalence d'un kilogramme de ressource en masse équivalente d'antimoine
yttrium (Y)	3,34E-07
zinc (Zn)	9,92E-04
Zirconium (Zr)	1,86E-05
coal hard	1,34E-02
coal soft, lignite	6,71E-03
natural gas	1,87E-02
oil crude	2,01E-02
Bauxite	2,10E-09
chromium (ore)	0,000257522
copper (ore)	2,19642E-05
iron (ore)	4,80E-08
lead (ore)	0,000676957
manganese (ore)	6,20E-06
molybdenum (ore)	3,16646E-05
nickel (ore)	1,61394E-06
tin (ore)	3,30E-06
zinc (ore)	3,94812E-05

Source : CML, 2001, Université de Leiden, Pays Bas

Potentiel d'acidification

L'impact mesuré est l'augmentation de la quantité des substances acides dans la basse atmosphère. Elles sont à l'origine des pluies acides qui perturbent les sols, l'eau, la flore et la faune.

Tableau A1.3. 2. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel d'acidification

	Equivalence d'un kilogramme d'émission en masse équivalente de proton H ⁺ (Kg éq. H ⁺) [CML 1992]	Equivalence d'un kilogramme d'émission en masse équivalente d'oxyde de soufre (Kg éq. SO ₂) [CML 2001]
Oxyde d'azote (NO _x comme NO ₂)	0,022	0,7
Oxydes de soufre (SO _x comme SO ₂)	0,031	1
Ammoniac (NH ₃)	0,059	1,88
Acide cyanhydrique (HCN)	0,037	-
Acide chlorhydrique (HCl)	0,027	-
Fluorure d'hydrogène (HF)	0,050	1,6
Sulfure d'hydrogène (H ₂ S)	0,059	1,88
Acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	0,020	0,65

Source : CML, Université de Leiden, Pays Bas

Potentiel d'eutrophisation

Mesure l'apport du milieu aquatique en nutriments et matières organique qui favorisent la prolifération des bactéries et par conséquent la diminution de l'oxygène de l'eau.

Tableau A1.3. 3. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel d'eutrophisation

Gaz	Equivalence d'un kilogramme de gaz en masse équivalent de phosphate (Kg éq. PO ₄)
Ammoniac (NH ₄ ⁺ , NH ₃ , N)	0,420
Demande biochimique en oxygène (DCO)	0,022
Nitrate (NO ₃)	0,095
Nitrite (NO ₂)	0,130
Matières azotée (Kjeldahl, N)	0,420

Matières azotées (non spécifiées, N)	0,420
Phosphate (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , P)	3,060
Matières phosphorées (non spécifié, P)	3,060
Phosphore (P)	3,060
Pentoxyde de phosphore (P_2O_5)	1,336

Source : Université de Leiden, Pays Bas

Réchauffement climatique ou effet de serre

Il s'agit de l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère induite par l'augmentation de la concentration atmosphérique moyenne de diverses substances d'origine anthropique (CO_2 , méthane, CFC,...). L'unité retenue pour évaluer cet impact est le Global Warming Potential (GWP) exprimé en masse d'équivalent CO_2 .

Tableau A1.3. 4. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel de réchauffement climatique

Gaz	Equivalence d'un kilogramme de gaz en masse équivalent de dioxyde de carbone (Kg éq. CO_2)
Dioxyde de carbone (CO_2)	1
Méthane (CH_4)	23
Oxyde nitreux (N_2O)	296
Tétrafluorométhane (CF_4)	5700
Halon 1301 (CF_3Br)	6900

Source: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) et World Meteorological Organization (WMO) 1998

Potentiel de formation de l'ozone photochimique

Sous certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques des industriels et des transports (COV , NOx ,...) peuvent réagir avec des photons solaires et produisent un smog photochimique. Le potentiel de formation d'oxydants photochimiques est exprimé en masse d'équivalent éthylène.

Tableau A1.3. 5. Facteurs d'équivalences des émissions du potentiel de formation de l'ozone photochimique

Gaz	Equivalence d'un kilogramme de gaz en masse équivalent d'éthylène (Kg éq. C ₂ H ₄)
Hydrocarbures (non spécifiés)	0,377
Composés organiques volatils (COV)	0,377
Monoxyde de carbone (CO)	0,027
Acétaldehyde (CH ₃ CHO)	0,527
Acétone (CH ₃ COCH ₃)	0,178
Acétylène (C ₂ H ₂)	0,168
Alcool (non spécifié)	0,196
Aldéhyde (non spécifié)	0,443
Alcane	0,398
Hydrocarbures aromatiques non spécifiés	0,761
Benzaldéhyde (CH ₆ H ₅ CHO)	-0,334
Benzène (C ₆ H ₆)	0,189
Butane (n-C ₄ H ₁₀)	0,41
Butène (1-CH ₃ CH ₂ CHCH ₂)	0,959
Ethane (C ₂ H ₆)	0,082
Ethanol (C ₂ H ₅ OH)	0,268
Ethylbenzène (C ₆ H ₅ C ₂ H ₅)	0,593
Ethylène (C ₂ H ₄)	1
Formaldéhyde (CH ₂ O)	0,421
Heptane (C ₇ H ₁₆)	0,529
Hexane (C ₆ H ₁₄)	0,421
Hydrocarbures (sauf méthane)	0,416
Méthane (CH ₄)	0,007
Méthanol (CH ₃ OH)	0,123
Propane (C ₃ H ₈)	0,42
Propionaldéhyde (CH ₃ CH ₂ CHO)	0,603

Gaz	Equivalence d'un kilogramme de gaz en masse équivalent d'éthylène (Kg éq. C₂H₄)
Propylène (CH ₂ CHCH ₃)	1,03
Tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄)	0,005
Toluène (C ₆ H ₅ CH ₃)	0,563

Source : WMO

Annexe 2 : les méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (modèles de caractérisation)

Tableau A2. 1. Liste des méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie

Méthode	Développée par	Pays d'origine
CML 2002 ³⁹	CML	Pays-Bas
Eco-indicator 99	PRé consultants	Pays-Bas
EDIP97 – EDIP 2003	DTU	Danemark
EPS 2000	IVL	Suède
Impact 2002+	EPFL	Suisse
LIME	AIST	Japon
LUCAS	CIRAIG	Canada
ReCiPe	RUN + PRé consultants + CML + RIVM	Pays-Bas
Swiss Ecoscarcity 07	E2 + ESU-services	Suisse
TRACI	US EPA	USA
MEEuP	VhK	Pays-Bas

CML 2001

Le manuel des ACV fournit un livre de lignes directrices opérationnelles pour mener une étude ACV étape par étape, justifiée par un document d'information scientifique, basée sur les normes ISO 14040 pour l'ACV. La méthodologie d'évaluation d'impacts du cycle de vie recommandée est basée sur une approche midpoints couvrant l'ensemble des émissions et de ressources, les impacts liés, pour lesquelles les méthodes de caractérisation pratique et acceptable sont disponibles [49]. Les meilleures méthodes de caractérisation disponibles ont été sélectionnées sur la base d'un examen approfondi des méthodologies existantes dans le monde entier. Pour la plupart des catégories d'impacts, les références et les listes complètes de

³⁹ Ici la méthode CML 2001 est appelée CML 2002 se référant au guide de la méthode publié en 2002 [49]

caractérisation ainsi que les facteurs de normalisation sont fournis. L'écotoxicité et la toxicité humaine s'inspirent de l'adoption du modèle développé par Huijbregts [51]. Le manuel fournit des facteurs de caractérisation pour plus de 1500 différents résultats d'ICV.

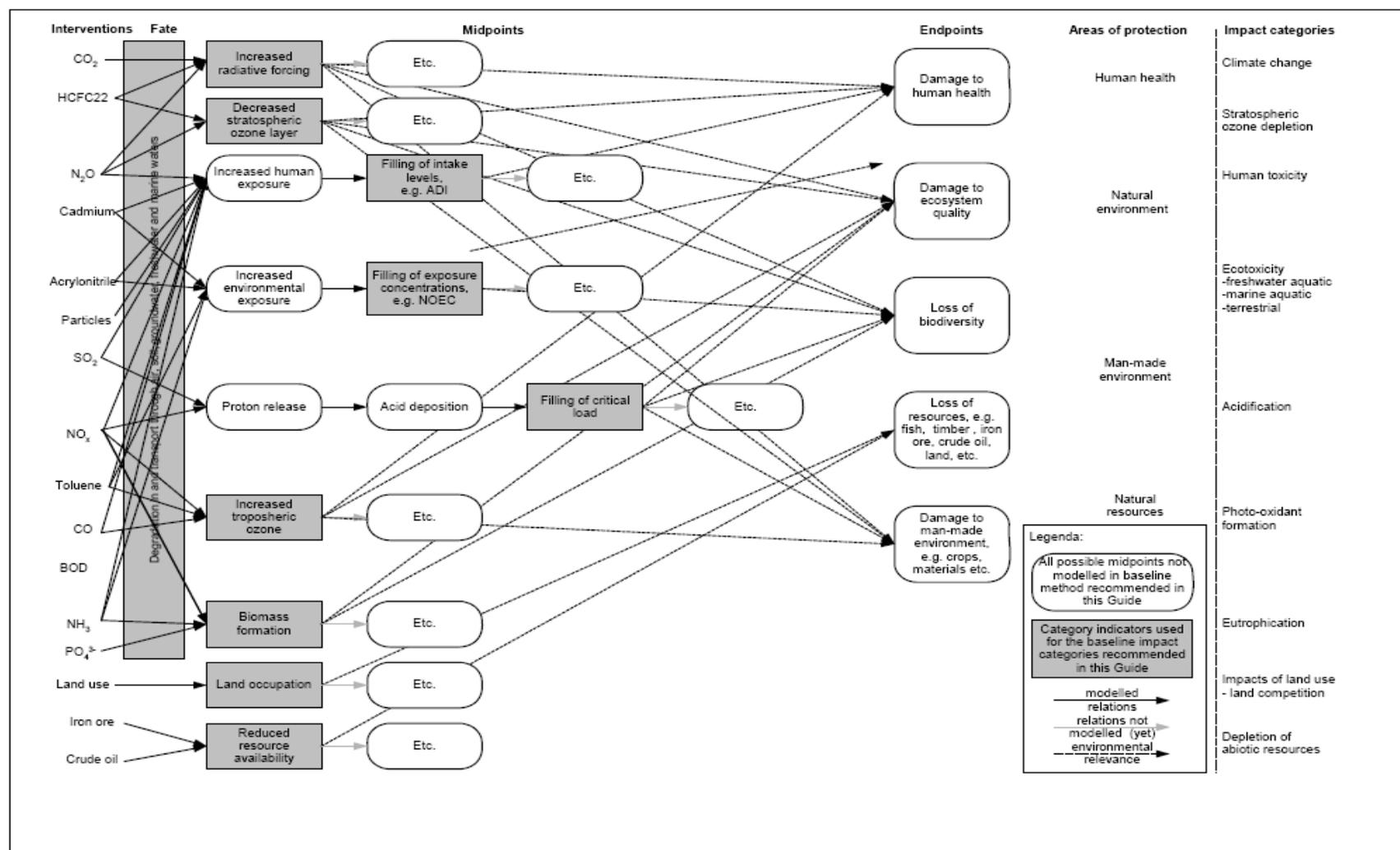


Figure A2. 1. Les catégories d'impacts évaluées par CML 2001 [62]

Eco-indicator 99

La méthode Eco-indicateur 99 a été développée dans une approche allant du niveau haut vers le bas dans la modélisation [65]. Parmi les nouvelles idées dans cette méthode, la gestion cohérente des choix subjectifs en utilisant le concept de points de vue culturel. Ceci a conduit à une bonne documentation des choix et à la publication de trois versions, chacune avec un ensemble différent de choix à savoir l'introduction de l'approche DALY, PAF et PDF, ainsi que l'approche par le surplus d'énergie.

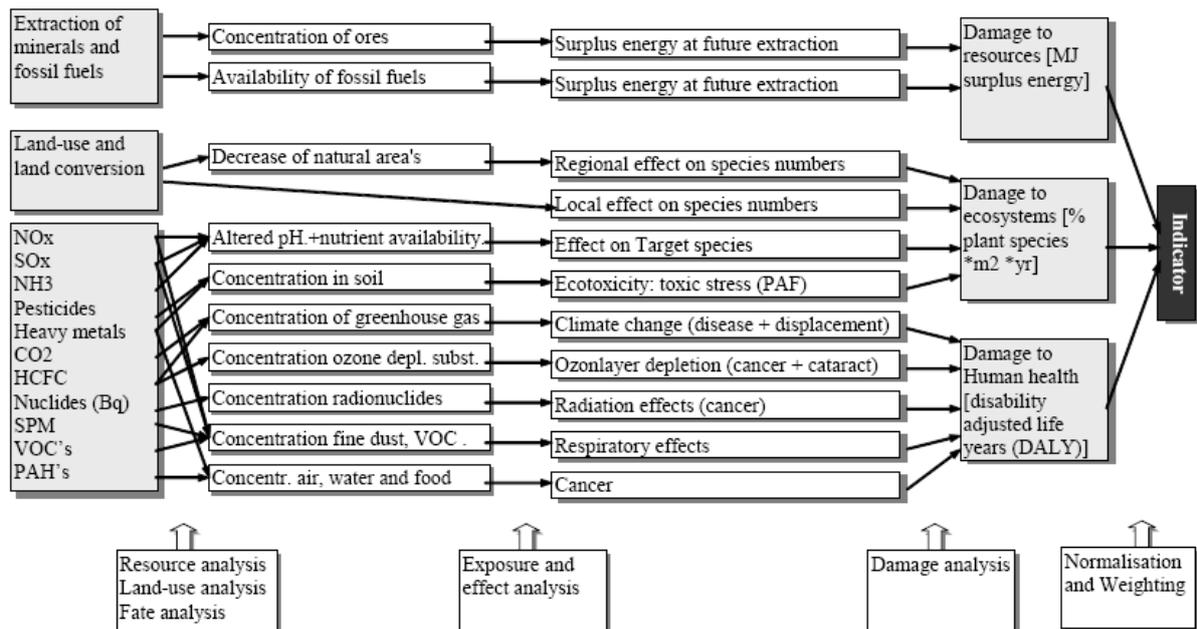


Figure A2. 2. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode Eco-indicateur 99 [62]

EDIP 97 et EDIP 2003

EDIP97 est une approche couvrant la plupart des impacts liés aux émissions et l'utilisation des ressources [62] [63]. L'écotoxicité et la toxicité pour l'homme sont modélisées à l'aide d'une approche terrain où les caractéristiques les plus importantes sont intégrées dans un cadre simple nécessitant relativement peu de données sur les substances pour le calcul des facteurs de caractérisation. La mise à jour grâce à la méthode EDIP2003 [64] s'apparente davantage à une approche orientée dommage. Cette partie de l'élaboration de méthode couvre des enquêtes sur les possibilités d'intégration de l'exposition dans l'évaluation de l'impact du cycle de vie des catégories d'impacts non globaux (la formation d'ozone photochimique, l'acidification, l'enrichissement en matières nutritives, l'écotoxicité, toxicité pour l'homme, bruit).

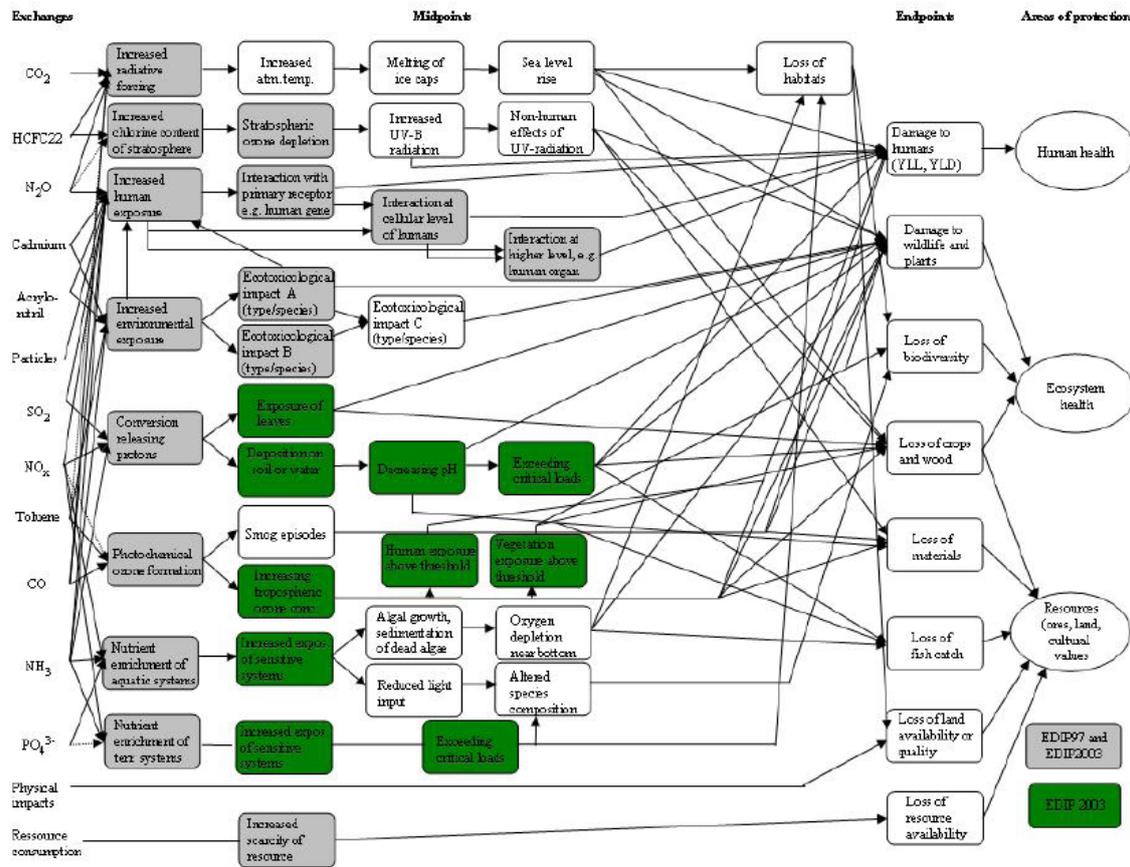


Figure A2. 3. Les catégories d'impact évaluées par la méthode EDIP [62]

Impact 2002+

L'IMPACT 2002 + propose une approche des dommages, qui relie tous les types de résultats de l'inventaire du cycle de vie (flux élémentaires et d'autres interventions) via 14 catégories midpoints de quatre catégories de dommages [158]. Pour IMPACT 2002 +, les nouveaux concepts ont été développés, en particulier pour l'évaluation comparative de la toxicité humaine et l'éco-toxicité. Les deux toxicités pour l'homme et des facteurs de l'effet de l'écotoxicité sont basés sur les réponses moyennes plutôt que sur des hypothèses prudentes. Autres catégories midpoints sont adaptées de la caractérisation des méthodes existantes (Eco-indicator 99 et CML 2001).

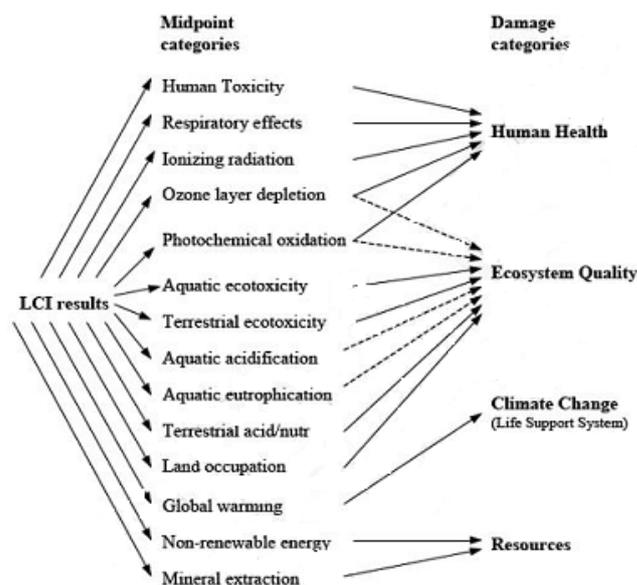


Figure A2. 4. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode IMPACT 2002+ [62]

TRACI

TRACI est une méthodologie d'évaluation d'impact mis au point par l'Agence américaine de protection de l'environnement qui facilite la caractérisation des facteurs d'impacts environnementaux qui ont des effets potentiels, notamment l'appauvrissement de l'ozone, le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation, la formation de l'ozone troposphérique (smog), l'écotoxicité, les impacts sur la santé humaine de types cancérigènes et non cancérigènes et l'épuisement des carburants fossiles [159]. Pour développer TRACI, des catégories d'impact ont été choisies, les méthodes disponibles ont été examinées, et les catégories ont été priorisées pour d'autres recherches.

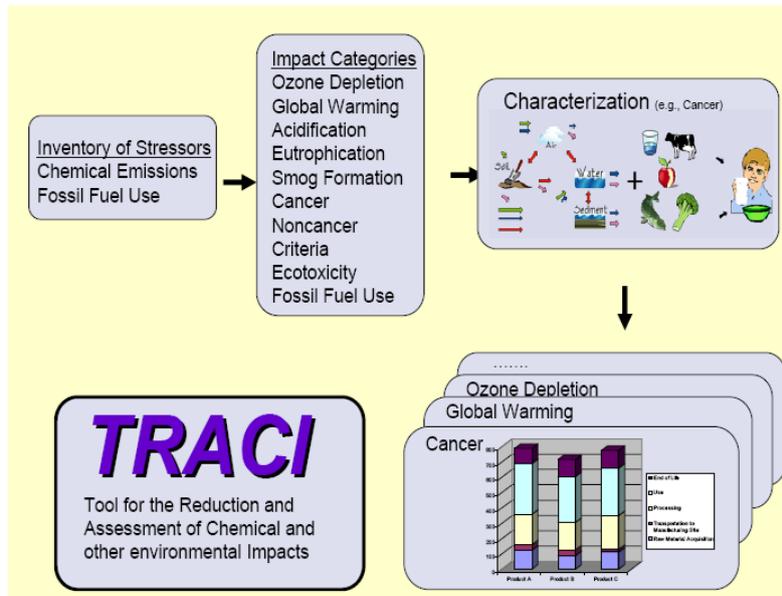


Figure A2. 5. Les catégories d'impacts évaluées par la méthode TRACI [62]

Annexe 3 : Liste des scénarios analysés en variant les fibres, les procédés de filature, de tricotage, de teinture et le produit de fonctionnalisation

Scénarios	Fibre	Filature	Tricotage	Teinture	Apprêts
LYO_CC	lyocell	cardé	coupé cousu	en overflow	assouplissant
CO_P_CC	coton	peigné	coupé cousu	en overflow	assouplissant
CO_OE_CC	coton	open-end	coupé cousu	en overflow	assouplissant
CO_C_CC	coton	cardé	coupé cousu	en overflow	assouplissant
CO_C_FF	coton	cardé	fully fashioned	en overflow	assouplissant
CO_C_I	coton	cardé	intégral	en overflow	assouplissant
PES_CC	polyester	cardé	coupé cousu	en overflow	assouplissant
PES_FF	polyester	cardé	fully fashioned	en overflow	assouplissant
PES_I	polyester	cardé	intégral	en overflow	assouplissant
LYO_FF	lyocell	cardé	fully fashioned	en overflow	assouplissant
LYO_I	lyocell	cardé	intégral	en overflow	assouplissant
CO_OE_FF	coton	open-end	fully fashioned	en overflow	assouplissant
CO_OE_I	coton	open-end	intégral	en overflow	assouplissant
VI_CC	viscose	cardé	coupé cousu	en overflow	assouplissant
VI_FF	viscose	cardé	fully fashioned	en overflow	assouplissant
VI_I	viscose	cardé	intégral	en overflow	assouplissant
CO_P_FF	coton	peigné	fully fashioned	en overflow	assouplissant
CO_P_I	coton	peigné	intégral	en overflow	assouplissant
CO_P_CC_EC	coton	peigné	coupé cousu	en overflow	easy care
CO_P_FF_EC	coton	peigné	fully fashioned	en overflow	easy care
CO_P_I_EC	coton	peigné	intégral	en overflow	easy care
CO_C_CC_EC	coton	cardé	coupé cousu	en overflow	easy care
CO_C_FF_EC	coton	cardé	fully fashioned	en overflow	easy care

Annexe 3. Liste des scénarios analysés en variant les fibres, les processus de filature, de tricotage, de teinture et le produit de fonctionnalisation

Scénarios	Fibre	Filature	Tricotage	Teinture	Apprêts
CO_C_I_EC	coton	cardé	intégral	en overflow	easy care
CO_OE_CC_EC	coton	Open-end	coupé cousu	en overflow	easy care
CO_OE_FF_EC	coton	Open-end	fully fashioned	en overflow	easy care
CO_OE_I_EC	coton	Open-end	intégral	en overflow	easy care
PES_TA_CC	polyester	cardé	coupé cousu	en autoclave	assouplissant
PES_TA_FF	polyester	cardé	fully fashioned	en autoclave	assouplissant
PES_TA_I	polyester	cardé	intégral	en autoclave	assouplissant