

Thèse présentée et soutenue publiquement par

Romain Benkirane

En vue d'obtenir le grade de docteur de l'Université de Lille

Ecole doctorale des Sciences pour l'ingénieur

dans la spécialité : Automatique, Génie informatique, Traitement du Signal et des Images

De l'importance de la durée de vie pour l'écoconception des textiles : contribution méthodologique

Thèse codirigée par Ludovic Koehl et Anne Perwuelz et co-encadrée par Sébastien Thomassey

Soutenue le 15 novembre 2019, devant le jury composé de :

Maud	Herbert	Professeur, Université de Lille, IMMD	Présidente
Mauricio	Camargo	Professeur, Université de Lorraine, ERPI	Rapporteur
Peggy	Zwolinski	Professeur, Grenoble INP, G-SCOP	Rapporteur
Enrico	Benetto	Docteur HDR, responsable de l'unité de recherche SUSTAIN, département ERIN, LIST	Examineur
Emilie	Drean	Maître de conférences HDR, Université de Haute Alsace, ENSISA	Examinatrice
Alain	Claudot	Directeur général, ECO TLC	Invité
Philippe	Suisse	Direction DRESS, Région Hauts-de-France	Invité
Ludovic	Koehl	Professeur, ENSAIT	Directeur de recherche
Anne	Perwuelz	Professeur, ENSAIT	Co-directrice de recherche
Sébastien	Thomassey	Maître de conférences HDR, ENSAIT	Co-encadrant de recherche

Thèse financée par :

Remerciements

L'écriture de ces remerciements s'apparente pour moi à l'épilogue de cette thèse et m'amène à contempler le chemin parcouru depuis l'année 2016. Sans surprise, il apparaît que ces travaux sont le fruit de maintes collaborations et pour cette raison je souhaite remercier l'ensemble des personnes qui y ont contribué.

Mes premiers remerciements vont à la Région Hauts-de-France, en les personnes de M Philippe Suisse de la *direction de la recherche, de l'enseignement supérieur et de la santé* et de Mme Christelle Demaretz de la *direction de l'environnement*, et à l'éco-organisme ECO TLC, en les personnes de M Alain Claudot *directeur général* et M Jean-Luc Bartharès *directeur des relations adhérents et du développement*, à la fois pour l'accompagnement qu'ils ont pu prodiguer et pour le soutien financier qu'ils ont apporté rendant ainsi possible cette recherche.

Je tiens dans le même temps à adresser mes plus vifs remerciements à l'équipe d'encadrement de cette thèse, à savoir Sébastien Thomassey, *maître de conférences HDR à l'ENSAIT*, Ludovic Koehl *professeur à l'ENSAIT* et Anne Perwuelz, *professeur à l'ENSAIT*, non seulement pour m'avoir accordé leur confiance en me proposant ce projet ambitieux mais également pour m'avoir conseillé et fait bénéficier de leurs expériences lors de ces années. J'ai pris plaisir à apprendre à vos côtés. Par ailleurs ce projet est pour moi synonyme d'avancées tant sur le plan professionnel que personnel et en cela je tiens à vous dire un très grand Merci !

Je tiens ensuite à adresser des remerciements très particuliers à ceux qui ont partagé mon quotidien lors de cette recherche, à Maximilien Schrub, à Ella Jeffs, à Iando Ravelo, à Maude Palcy et à Sophie Pruvost. Merci pour le sérieux et la générosité dont vous avez fait preuve dans le travail, merci pour vos nombreuses et riches contributions et merci pour les échanges qui ont contribué à faire mûrir cette contribution.

J'en profite pour remercier de la même manière toutes les personnes ayant participé à l'évaluation de l'usure des T-shirts, me procurant ainsi une matière première et des enseignements nécessaires à la tenue et à la poursuite de cette recherche. Je tiens par la même occasion à remercier Domenica Szrama, *chargée de ressources documentaires à l'ENSAIT* et Claudine Vollebout, *assistante en bibliothèque à l'ENSAIT* pour m'avoir permis de mener ces évaluations en bibliothèque.

Je tiens par ailleurs à remercier Christian Catel, *technicien ennoblissement à l'ENSAIT*, Sabine Chlebicky *ingénieur à l'ENSAIT*, Nicolas Dumont *technicien filature à l'ENSAIT* et Hubert Ostin *responsable des techniciens Maille à l'ENSAIT* pour l'expertise dont ils m'ont fait bénéficier, pour la disponibilité dont ils ont fait preuve et pour la pédagogie que vous avez pu avoir dans nos échanges.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble du personnel des services administratifs de l'ENSAIT et du GEMTEX, pour leur aide précieuse, qu'il s'agisse de planification de déplacements, d'achats de matériels et de produits. Vous avez toujours su trouver une solution, parfois en urgence, aux problématiques auxquelles nous étions confrontés.

Je souhaite par ailleurs adresser des remerciements particuliers aux industriels qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux, que ce soit pour le développement de données d'inventaires nécessaires à l'ACV, pour quelques produits gracieusement donnés ou encore pour les échanges autour de la qualité des produits. Un grand Merci pour le temps que vous m'avez accordé, pour l'intérêt que vous avez porté à ces travaux et pour le recul et la vision de professionnels de l'industrie textile que vous avez apporté.

J'aimerais également remercier très chaleureusement l'ensemble des participants à la dynamique régionale sur les thématiques « Pensée Cycle de Vie » et « Nouveaux Modèles Economiques » puisque représentant des secteurs variés, nos échanges ont été particulièrement constructifs et ont nourri nos réflexions.

Avant d'en terminer, je tiens à remercier très sincèrement l'ensemble des membres du jury, qui représentent en quelque sorte les derniers contributeurs à ces travaux. Un grand Merci pour l'intérêt que vous y portez en acceptant de les évaluer, pour le temps que vous y consacrerez et bien entendu pour les jugements que vous émettrez.

Résumé

Afin de répondre aux enjeux environnementaux actuels, l'économie circulaire ambitionne de découpler la croissance économique de la consommation de ressources. Pour y arriver, elle se base sur la volonté d'accroître l'efficacité de ces ressources en s'appuyant, entre autre, sur l'allongement de la durée de vie des produits. Seule réserve, la notion de durée de vie est à la fois liée au produit et au consommateur et pour cette raison, elle est particulièrement complexe à appréhender, à définir et à évaluer.

Par ces travaux nous souhaitons donc contribuer aux réflexions qui portent sur la durée de vie et en particulier sur celle des produits textiles. Pour cela, nous avons construit des indicateurs comme aide à la décision, ils permettent de répondre aux problématiques suivantes : l'estimation de la durée de vie, l'identification des paramètres d'écoconception et l'évaluation du bénéfice de l'allongement de la durée de vie.

Le modèle d'estimation de la durée de vie proposé, dénommé « Qualité Orientée Consommateur » (QOC), s'inspire de la définition de durée normative proposée par l'ADEME. Il s'appuie en effet sur des données objectives et retranscrit la capacité des produits à résister au vieillissement. Aussi, afin de faire concorder ce score avec la durée de vie, nous avons pris le consommateur en compte en s'intéressant notamment à sa perception vis-à-vis de l'usure.

S'intégrant dans la démarche d'écoconception et d'économie circulaire, nous souhaitons nous servir de la connaissance du consommateur pour adapter la fabrication des produits. Nous avons donc associé le score QOC aux caractéristiques des produits dans une analyse de données afin d'identifier les paramètres influents, ainsi connus nous pouvons dégager des recommandations de fabrication.

Enfin, nous avons mis ce modèle en œuvre au cas des T-shirts et avons vérifié l'adéquation du score QOC par rapport à une durée de vie « réelle », durée que nous avons intégrée dans des scénarios d'analyse du cycle de vie (ACV) afin de quantifier l'intérêt des produits de plus longues durées de vie. L'ACV offrant un angle statique, nous avons proposé de nouveaux points de vue plus dynamiques : en observant l'évolution des impacts dans le temps, nous sommes effectivement en mesure de quantifier l'influence de la durée de vie d'une part et d'évaluer la cohérence d'une chaîne de fabrication par rapport à la qualité produite d'autre part.

Mots clés : Economie circulaire, durée de vie, durée normative, aide multicritère à la décision, Analyse du Cycle de Vie (ACV), textile d'habillement

Abstract

To meet current environmental challenges, the circular economy aims to separate economic growth from resource consumption. To do so, it relies on levers to increase resources efficiency, such as lifespan extension. However, since lifespan is related to both the product and the consumer, it is highly complex to define and evaluate.

Through this thesis, we wish to contribute to the reflections on lifespan and on that of textile products in particular. We thus provided indicators such as a multi-criteria decision-making model that helps to address the following issues: to better estimate lifespan, to identify eco-design parameters and to evaluate the lifespan extension benefits.

The proposed lifespan estimation model, called “Consumer-Oriented Quality” (COQ), is inspired by the definition of normative duration given by the French environmental agency ADEME and primarily relies on objective data which reflects the ability of products to resist ageing. But to obtain a more precise model of lifespan, we have also taken the consumer into account, focusing on their wear and tear perception.

As part of the eco-design and circular economy approach, we wanted to benefit from our knowledge of the consumer to adjust product manufacturing. We therefore combined the COQ score with the product characteristics in a data analysis and identified the relevant parameters, so we could draw up manufacturing recommendations.

Finally, we implemented our model for T-shirts to check its consistency with respect to a “real” lifespan. This lifespan was integrated into life cycle assessment (LCA) to quantify the benefits of having products with longer lifespans. Since LCA provides a static angle, we have proposed new and more dynamic points of view by observing the impacts’ evolution over time. This enable us to quantify the influence of lifespan and to evaluate the consistency of a production line with the quality produced.

Keywords: Circular economy, product lifespan, normative duration, multi-criteria decision support, Life Cycle Assessment (LCA), clothing

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iv
Abstract	v
Index des figures	xv
Index des tables	xx
Liste des abréviations	xxiv
Introduction	1
Chapitre I Etat de l'art	4
I.1. Contexte : économie circulaire	4
I.1.1. Origine et fondements	4
I.1.2. Principes et définitions	6
I.1.2.1. Définition proposée par la Fondation Ellen MacArthur	7
I.1.2.2. Définition proposée par l'ADEME	8
I.2. Allongement de la durée de vie des produits	10
I.2.1. Eléments de définitions	10
I.2.2. Ontologie de la durée de vie	12
I.3. Evaluations environnementales des textiles d'habillement	16
I.3.1. Préambule : la complexité de la filière	16
I.3.1.1. Les matières premières	17
I.3.1.2. Les procédés de transformations	18
I.3.2. La durée de vie des textiles en ACV	21
I.4. Limites observées	22
I.5. Enjeux de l'évaluation de la durée de vie	23

I.5.1.	Projets d'affichages	23
I.5.2.	Eco-modulation de la contribution (taxe recyclage).....	24
I.6.	Méthodologie proposée	26
Chapitre II Matériels et méthodes		29
II.1.	Intérêt de connaître le comportement du consommateur et besoins.....	29
II.1.1.	Besoins identifiés.....	30
II.1.2.	Identification des facteurs d'usure.....	30
II.1.3.	Enquête existante.....	32
II.2.	Méthode d'évaluation de la perception de l'usure par le consommateur	32
II.2.1.	Choix de la méthode d'aide à la décision	32
II.2.2.	Principe des méthodes MADM	32
II.2.3.	Principe de l'analyse multicritère hiérarchique floue.....	33
II.2.3.1.	Préambule sur l'analyse multicritère hiérarchique	33
II.2.3.2.	Les nombres flous triangulaires.....	35
II.2.3.3.	Approche de Chang	36
II.3.	Contribution à l'évaluation d'un score de qualité	40
II.3.1.	Procédure de mesure des performances des produits	41
II.3.1.1.	Tests de résistance à la dégradation de la couleur	41
II.3.1.2.	Tests de résistance à la déformation.....	42
II.3.1.3.	Tests de résistance des coutures	43
II.3.1.4.	Tests de résistance à l'apparition d'un trou	44
II.3.1.5.	Tests de résistance au boulochage.....	44
II.3.1.6.	Tests de caractérisation du toucher.....	45

II.3.2.	Méthode de calcul du score de qualité.....	46
II.3.2.1.	Choix de la méthode d'agrégation des mesures de performance	46
II.3.2.2.	Principe de la méthode PROMETHEE II.....	48
II.4.	Contribution à l'identification des leviers d'allongement de la durée de vie	49
II.4.1.	Approche de rétro-ingénierie.....	49
II.4.2.	Méthode d'identification des contributeurs qualité	51
II.4.2.1.	Choix de la méthode d'identification	51
II.4.2.2.	Principe de l'analyse en composantes principales.....	52
II.5.	Méthode de vérification de la pertinence du score QOC.....	52
II.5.1.1.	Procédure d'entretien.....	53
II.5.1.2.	Mise en place de l'enquête consommateur.....	53
II.5.1.3.	Principe et choix de la méthode d'agrégation de classements.....	54
II.6.	Choix de la méthodologie ACV pour l'évaluation environnementale des produits	55
II.6.1.	Principe.....	55
II.6.1.1.	Etape 1 : définition des objectifs et champ de l'étude	56
II.6.1.2.	Etape 2 : inventaire du cycle de vie.....	57
II.6.1.3.	Etape 3 : évaluation des impacts de cycle de vie.....	59
II.6.1.4.	Etape 4 : interprétation	61
II.6.1.5.	Logiciel et bases de données de l'ACV.....	61
	Bilan du chapitre	62
	Chapitre III Mise en œuvre : application au cas du T-shirt.....	65
III.1.	Description des T-shirts.....	65
III.2.	Résultats de l'enquête consommateur	66
III.2.1.	Présentation de l'enquête.....	67

III.2.2.	Comportement d'usage.....	67
III.2.2.1.	Habitudes relatives à l'usage	67
III.2.3.	Comportement relatif à la fin de vie des T-shirts	69
III.2.3.1.	Habitudes relatives à la fin de vie des T-shirts	69
III.3.	Evaluation de la perception du consommateur vis-à-vis de l'usure des T-shirts.....	70
III.3.1.	Hierarchisation du problème	70
III.3.2.	Comparaisons par paire	71
III.3.2.1.	Evaluation des priorités des critères	71
III.3.2.2.	Evaluation des préférences des alternatives par l'approche de Chang	73
III.3.3.	Calcul de la perception du consommateur.....	73
III.3.4.	Analyse de robustesse de la perception du consommateur.....	74
III.3.4.1.	Résultats issus des variations sur les experts.....	75
III.3.4.2.	Variations de l'échelle linguistique	76
III.3.5.	Discussion	77
III.4.	Evaluation des scores de qualité des T-shirts	78
III.4.1.	Mesure des performances	78
III.4.1.1.	Résultats des tests	79
III.4.2.	Evaluation du score QOC.....	86
III.4.3.	Evaluation de la contribution de la perception du consommateur dans le score QOC.....	88
III.4.4.	Analyse de robustesse du score QOC.....	89
III.4.4.1.	Robustesse suite à un changement de fonction de préférence.....	91
III.4.4.2.	Robustesse suite aux variations de poids.....	91
III.4.4.3.	Robustesse suite aux changements des données d'entrée	91

III.4.4.4.	Robustesse aux changements de données d'entrée et piste d'optimisation de la méthode	92
III.4.5.	Discussion	94
III.5.	Identification des contributeurs qualité par analyse en composantes principales	95
III.5.1.	Rétro-ingénierie.....	95
III.5.1.1.	Vue d'ensemble.....	96
III.5.1.2.	Caractéristiques des fils.....	97
III.5.1.3.	Caractéristiques des étoffes	99
III.5.1.4.	Paramètres machines associés	102
III.5.1.5.	Discussion	102
III.5.2.	Identification des leviers pour un allongement de la durée de vie	103
III.5.2.1.	Sélection des variables et adéquation de l'échantillonnage.....	103
III.5.2.2.	Résultat de l'ACP	105
III.5.2.3.	Discussion	106
III.6.	Evaluation de la durée de vie des T-shirts.....	107
III.6.1.	Procédure d'entretien.....	107
III.6.2.	Résultats des enquêtes relatives au vieillissement des T-shirts	108
III.6.3.	Discussion	115
	Bilan du chapitre	116
Chapitre IV Analyses environnementales		119
IV.1.	Objectifs et choix des produits	119
IV.1.1.	Choix des T-shirts.....	120
IV.2.	Modélisation de la fabrication des T-shirts	121
IV.2.1.	Unité fonctionnelle et flux de référence	122

IV.2.2.	Hypothèses	122
IV.2.3.	Données d’inventaire et qualité des données.....	124
IV.2.3.1.	Inventaire relatif aux systèmes coton	124
IV.2.3.2.	Inventaire relatif aux systèmes en lin	126
IV.2.3.3.	Inventaire relatif aux systèmes polyester.....	128
IV.3.	Modélisation d’un cycle d’usage des T-shirts	129
IV.3.1.	Unité fonctionnelle et flux de référence	130
IV.3.2.	Données d’inventaire relatives à l’entretien	130
IV.4.	Analyse des impacts environnementaux	130
IV.4.1.	Choix des catégories d’impacts	132
IV.4.2.	Résultats d’analyses environnementales	134
IV.4.2.1.	Comparaison des T-shirts en coton : TS3 et TS6	134
IV.4.2.2.	Comparaison des T-shirts en lin : TS24 et TS25.....	138
IV.4.2.3.	Comparaison des T-shirts en polyester : TS18 et TS20	139
IV.5.	Discussion	141
IV.6.	Point de bascule : indice de cohérence entre procédés de fabrication et qualité	142
IV.6.1.	Evaluation du point de bascule.....	142
IV.6.2.	Résultats pour les six T-shirts.....	143
IV.7.	Discussion et bilan.....	145
	Conclusion.....	148
	Références bibliographiques	153
	Annexe 1 : Exemples de questions posées lors de l’enquête consommateur	170
	Annexe 2 : Vecteurs préférences des alternatives	171

Annexe 3 : Valeurs des perceptions de l'usure par le consommateur dans les scénarios d'analyse de la robustesse	179
Annexe 4 : Poids utilisés dans les scénarios d'analyse de la robustesse du score QOC	180
Annexe 5 : Matrice <i>M</i> des évaluations	181
Annexe 5 (suite)	182
Annexe 6 : Classements issus de l'analyse des résultats des enquêtes.....	183
Annexe 7 : Evolutions des réponses (a) et (b).....	184
Annexe 8 : Inventaire des flux pour les systèmes « lin »	185
Annexe 9 : Inventaire des flux pour les systèmes « coton ».....	189
Annexe 10 : Inventaire des flux pour les systèmes « polyester ».....	197

Index des figures

Figure 1 : Cartographie des outils et concepts autour du développement durable [6].....	6
Figure 2 : Découplage de l'économie et de la consommation de ressources, d'après l'UNEP [23]	7
Figure 3 : Représentation de l'économie circulaire d'après la Fondation Ellen MacArthur [7].....	8
Figure 4 : Représentation de l'économie circulaire d'après l'ADEME [16].....	9
Figure 5 : Notions de "durées de vie" proposées par l'ADEME [30]	12
Figure 6 : Distribution des causes de fin de vie des textiles.....	14
Figure 7 : Ontologie de la durée de vie	15
Figure 8 : Chaîne de fabrication textile [48]	17
Figure 9 : Extrait d'une classification des fibres textiles [54].....	18
Figure 10 : Méthodologie proposée.....	27
Figure 11 : Décomposition hiérarchie de l'AHP.....	34
Figure 12 : Représentation du nombre triangulaire flou M	35
Figure 13 : Procédure de Fuzzy AHP [129]	37
Figure 14 : Echelle de gris (source : https://www.ulttc.com).....	41
Figure 15 : Calcul du vrillage.....	42
Figure 16 : Gradation du boulochage	45
Figure 17 : Paramètres mesurés par la chaîne Kawabata, extrait de [140], [141]	46
Figure 18 : Classification des méthodes d'agrégation de classements [164].....	54
Figure 19 : Représentation des quatre phases d'une ACV [170]	56
Figure 20 : Matrice d'évaluation de la qualité des données [171]	58
Figure 21 : Matrice pedigree (base ecoinvent) pour l'estimation de la qualité des données [173].....	59
Figure 22 : Cadre général d'évaluation des impacts [174].....	60

Figure 23 : Nombre de jours d'utilisation avant lavage	68
Figure 24 : Mode de lavage des T-shirts	68
Figure 25 : Habitudes de séchage des T-shirts	68
Figure 26 : Habitudes de repassage des T-shirts	68
Figure 27 : Question relative à la fin de vie des T-shirts.....	69
Figure 28 : Causes matérielles de fin de vie des T-shirts	70
Figure 29 : Hiérarchie du problème.....	71
Figure 30 : Perceptions calculées sur les variations des évaluations des experts	75
Figure 31 : Perceptions calculées à partir d'une échelle incomplète	76
Figure 32 : Dispersion des résultats de tests relatifs à la dégradation de la couleur	79
Figure 33 : Résultats des tests de solidité des coloris au lavage, à l'eau et aux frottements mouillé	81
Figure 34 : Stabilité dimensionnelle en rangées et colonnes.....	82
Figure 35 : Résultats du test de vrillage	83
Figure 36 : Résultats de résistance des coutures	84
Figure 37 : Résultats du test d'éclatement par la méthode pneumatique	85
Figure 38 : Résultats du test de boulochage par la méthode boîte de boulochage	86
Figure 39 : Résultats du test de boulochage par la méthode Martindale.....	86
Figure 40 : Méthode de calcul du score QOC	87
Figure 41 : Score QOC par T-shirt.....	87
Figure 42 : Comparaison du score QOC et d'un score de qualité unique.....	88
Figure 43 : Représentation des scénarios 7 et 17 par rapport au scénario 1	92
Figure 44 : Dispersion des valeurs de R ² des scénarios 26 à 86.....	93
Figure 45 : Titre des fils	98

Figure 46 : Taux de torsion des fils	98
Figure 47 : Ténacité des fils	99
Figure 48 : Longueur de fil absorbée	100
Figure 49 : Densités de mailles	100
Figure 50 : Epaisseurs	101
Figure 51 : Masses surfaciques.....	101
Figure 52 : Jauges calculées	102
Figure 53 : Variances expliquée et cumulée par composante	105
Figure 54 : Représentation de type <i>biplot</i> issue de l'ACP.....	106
Figure 55 : Résultats de la session après 15 lavages	110
Figure 56 : Résultats de la session après 30 lavages	110
Figure 57 : Résultats de la session après 50 lavages	111
Figure 58 : Evolutions des réponses (a) après 15, 30 et 50 lavages de 22 T-shirts	112
Figure 59 : Evolution linéaire des réponses (a) après 15, 30 et 50 lavages de 7 T-shirts.....	113
Figure 60 : Comparaison des classements issus du score QOC et de l'enquête de durée de vie	114
Figure 61 : Impacts de la consommation des textiles dans l'Europe des 27 [193]	120
Figure 62 : Chaîne de fabrication du T-shirt coton [78].....	124
Figure 63 : Chaîne de fabrication des systèmes lin	126
Figure 64 : Chaîne de fabrication des systèmes polyester.....	129
Figure 65 : Cumul d'impacts après normalisation	133
Figure 66 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS3 et TS6	135
Figure 67 : Cumul de l'impact des TS3 et TS6 sur l'épuisement des ressources en eau au cours des lavages.....	136

Figure 68 : Evolution du rapport des impacts cumulés du TS6 sur le TS3 sur l'épuisement des ressources en eau	137
Figure 69 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS24 et TS25 (systèmes lin)	138
Figure 70 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS18 et TS20 (systèmes polyester).....	140
Figure 71 : Comparaison en pourcentage, des impacts générés par le filage et la filature du PET	140
Figure 72 : Exemple de mise en évidence du point de bascule E par méthode graphique	143
Figure 73 : Résultats typiques des impacts du procédé de lavage après normalisation	144

Index des tables

Table 1 : Causes de fin de vie et solutions d'allongement	14
Table 2 : Durées de vie prises en compte dans l'ACV de T-shirts et de jeans	21
Table 3 : Critères d'éco-modulation de la durabilité.....	25
Table 4 : Echelle linguistique [107]	36
Table 5 : Paramètres et méthodes considérés pour notre approche de rétro-ingénierie	50
Table 6 : Données mises en jeu	63
Table 7 : Répartition des T-shirts par matières et couleurs	66
Table 8 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 1	72
Table 9 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 2	72
Table 10 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 3	72
Table 11 : Combinaison floue des jugements d'experts relatifs aux sous-critères	72
Table 12 : Matrice <i>Consensus</i> défuzzifiée, CI et CR	72
Table 13 : Vecteur priorité des sous-critères.....	73
Table 14 : Vecteurs préférences des alternatives.....	73
Table 15 : Perception de l'usure par le consommateur	74
Table 16 : Scénarios de perturbation du système	75
Table 17 : Procédure de tests.....	78
Table 18 : Scénarios de variations des entrées dans la méthode PROMETHEE II.....	90
Table 19 : Coefficients de détermination des scénarios 2 et 3	91
Table 20 : Coefficients de détermination des scénarios 4 à 13	91
Table 21 : Coefficients de détermination des scénarios 14 à 25	92
Table 22 : Paramètres de fabrication des T-shirts	95

Table 23 : Vue d'ensemble de la population de T-shirts	97
Table 24 : Valeurs de l'indice KMO et du test de Bartlett pour la matrice M	104
Table 25 : Valeurs de l'indice KMO et du test de Bartlett pour la matrice MI	104
Table 26 : T-shirts sélectionnés pour l'ACV	121
Table 27 : Flux de référence par T-shirt.....	122
Table 28 : Vue d'ensemble des chaînes de fabrication pour les trois systèmes.....	123
Table 29 : Valeurs des durées de vie par T-shirt.....	123
Table 30 : Donnée exploitée pour la production de matière brute coton.....	125
Table 31 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes coton.....	125
Table 32 : Sources des données propres aux systèmes lin	127
Table 33 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes lin.....	128
Table 34 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes polyester	129
Table 35 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour l'usage	130
Table 36 : Catégories d'impacts évaluées par la méthode ILCD 2011 Midpoint+	132
Table 37 : Niveau de robustesse associé aux catégories d'impacts [201], [204]	133
Table 38 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS3 et TS6.....	134
Table 39 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS6 sur ceux du TS3.....	137
Table 40 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS24 et TS25.....	138
Table 41 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS24 sur ceux du TS25.....	139
Table 42 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS3 et TS6.....	139
Table 43 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS18 sur ceux du TS20.....	141
Table 44 : Valeurs des points de bascule E par T-shirt et catégorie d'impact	143
Table 45 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 1	171

Table 46 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 2	171
Table 47 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 3	171
Table 48 : Combinaison floue des jugements d'experts	171
Table 49 : Matrice <i>Consensus</i> défuzzifiée, CI et CR	172
Table 50 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 1	173
Table 51 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 2	173
Table 52 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 3	173
Table 53 : Combinaison floue des jugements d'experts	173
Table 54 : Matrice <i>Consensus</i> défuzzifiée, CI et CR	174
Table 55 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 1	175
Table 56 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 2	175
Table 57 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 3	175
Table 58 : Combinaison floue des jugements d'experts	175
Table 59 : Matrice <i>Consensus</i> défuzzifiée, CI et CR	176
Table 60 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 1	177
Table 61 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 2	177
Table 62 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 3	177
Table 63 : Combinaison floue des jugements d'experts	177
Table 64 : Matrice <i>Consensus</i> défuzzifiée, CI et CR	178

Liste des abréviations

ACP *Analyse en Composantes Principales*

ACV *Analyse de Cycle de Vie*

ADEME *l'Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie*

AFNOR *Association Française de Normalisation*

AHP *Analytic Hierarchy Process (Analyse multicritère hiérarchique, en Français)*

CESE *Comité Economique et Social Européen*

CIRAIG *Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services*

CR *Ratio de Cohérence*

E *Egal*

EC *Economie Circulaire*

EPI *Extrêmement Plus Important*

FEM *Fondation Ellen MacArthur*

FPI *Fortement Plus Important*

Fuzzy AHP *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Analyse multicritère hiérarchique floue en Français)*

GMIR *Graded Mean Integration Representation*

ICV *Inventaire de Cycle de Vie*

LFA *Longueur de Fil Absorbée*

MADM *Multi-Attribute Decision Making (Méthode multi-attributs, en Français)*

MODM *Multi-Objective Decision Making (Méthodes multi-objectifs, en Français)*

MPI *Modérément Plus Important*

NFT *Nombres Flous Triangulaires*

Nm *Numéro Métrique*

OEF *Organisation Environmental Footprint*

PEF *Product Environmental Footprint*

PI *Plus Important*

PNUE *Programme des Nations Unies pour l'Environnement*

PROMETHEE *Preference Ranking Optimisation METHod for Enrichment Evaluation*

QOC *Qualité Orientée Consommateur*

REP *Responsabilité Elargie des Producteurs*

RI *Rétro-ingénierie*

TFPI *Très Fortement Plus Important*

TLC *Textiles, Linges de maisons et Chaussures*

UF *Unité Fonctionnelle*

Introduction

Concilier progrès social, économique et environnemental, est un enjeu majeur de notre époque et celui du développement durable en particulier. En effet, alors que le rapport Meadows concluait en 1972 à l'incompatibilité des croissances démographique et économique avec la préservation de l'environnement, le développement durable recherche quant à lui un autre point d'équilibre et s'appuie pour cela sur de nouveaux modèles de croissance telle que l'économie circulaire. Cette dernière tend à dissocier la croissance économique de la consommation de ressources et a été, à ce titre, identifiée comme une approche sérieuse pour répondre aux enjeux environnementaux modernes. En s'appuyant sur l'efficacité des ressources comme clé du succès, elle offre un cadre particulièrement favorable à l'écoconception et au recyclage.

En France, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie propose trois domaines et sept piliers d'actions pour appuyer l'économie circulaire, avec entre autre l'allongement de la durée de vie des produits. Ce dernier, dont le bénéfice environnemental est d'ores et déjà établi, semble intervenir à un moment opportun puisqu'il répond aux demandes des consommateurs, aux besoins des industriels et aux évolutions réglementaires.

Seule ombre au tableau, la durée de vie n'est aujourd'hui pas complètement définie et sachant qu'elle dépend de facteurs multiples et complexes, il n'existe pas de méthode de mesure de sa valeur. Or, de sa bonne estimation dépendent les conclusions des études environnementales et a fortiori les informations à destination des consommateurs.

Ces travaux de thèse ont ainsi été menés avec cet objectif de proposer une contribution à la construction d'indicateurs comme aide à la décision qui permette d'évaluer la durée de vie, d'identifier les paramètres d'écoconception et de quantifier le bénéfice de l'allongement de la durée de vie.

Ce manuscrit a donc pour ambition de décrire au mieux cette méthodologie et s'articule pour cela autour de quatre chapitres répartis entre un état de l'art, une description des matériels et méthodes, une application au cas du T-shirt et enfin une étude environnementale.

Le Chapitre I consiste en un état de l'art, dans lequel nous nous approprierons la notion d'économie circulaire et plus largement celle de la durée de vie. En nous attardant sur le levier d'allongement de la durée de vie et son potentiel environnemental, nous mettrons en évidence la question de recherche à savoir : « Comment évaluer la durée de vie des textiles d'habillement ? ». La durée de vie étant à la fois dépendante du produit et du consommateur, nous identifierons les variables que nous souhaitons intégrer à notre modèle.

Le Chapitre II nous laissera la possibilité de préciser ces variables et dans un deuxième temps d'analyser ces problématiques :

- « Comment prendre en compte le comportement subjectif du consommateur dans une évaluation objective de la durée de vie ? » ;
- « Est-ce que cette évaluation est pertinente par rapport à une durée de vie réelle ? »
- « Comment, à partir de cette évaluation, identifier les pistes d'allongement de la durée de vie ? » ;
- « Quelles sont les conséquences sur les conclusions d'une évaluation environnementale ? ».

Pour chaque question, nous proposerons un moyen de collecter les données nécessaires et identifierons les méthodes adaptées pour les exploiter.

Les Chapitre III et IV nous donneront finalement l'opportunité de mettre en œuvre cette méthodologie sur un cas représentatif de la filière textile habillement : le T-shirt.

Dans le Chapitre III, nous nous concentrerons sur les trois premières questions précédemment citées et présenterons les résultats obtenus suite à l'analyse de 29 T-shirts. Cette application nous donnera par ailleurs l'opportunité d'identifier les forces et faiblesses de ce modèle.

Dans le Chapitre IV, nous tâcherons finalement de répondre à la dernière question en proposant les études environnementales de six des T-shirts étudiés. Nous mettrons de la sorte en évidence le bénéfice environnemental des produits de plus longues durées de vie et proposerons des exploitations originales des résultats afin de quantifier ce bénéfice à court moyen et long terme.

Chapitre I Etat de l'art

Le développement durable est considéré comme une approche pour répondre aux limites de la croissance et aux enjeux environnementaux qui y sont liés [1]. Il a été popularisé par le rapport Brundtland dans lequel il est défini comme « [...] un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [2], sous-entendant de cette manière la notion de finitude des ressources naturelles. Il s'oppose ainsi au modèle de développement moderne, associé à une économie dite linéaire et dans lequel la nature est considérée comme un paramètre de la croissance [3], [4]. Le modèle linéaire autrement qualifié de modèle du « extraire-fabriquer-consommer-jeter » est considéré comme illimité, exponentiel et immatériel [5] et il se heurte aux principes fini et circulaire de la nature.

Face à ce constat, divers concepts économiques ayant pour objectif de recréer du lien entre développement et environnement sont apparus. Le concept d'économie circulaire, dans lequel ces travaux de thèse s'inscrivent, aborde le développement d'une façon qu'on peut qualifier de biomimétique puisque, comme la nature, il tend à évoluer en boucle fermée [6], [7].

Dans ce chapitre, nous nous familiariserons avec ce concept en revenant sur ses fondements et en apportant les éléments de définitions nécessaires (section I.1.). Nous reviendrons ensuite sur l'un de ces leviers d'action : l'allongement de la durée d'usage des produits (section I.2.). Pour cela, nous précisons la notion de durée de vie et verrons, dans le cas des textiles, quels facteurs influent sur sa durée. Dans un troisième temps, nous discuterons de la prise en compte de cette durée dans les études environnementales (section I.3.) et verrons pour quels enjeux nous devons apporter des éléments de réponses (section I.4. , I.5.). Nous verrons finalement quelle méthodologie sera adoptée tout au long de ces travaux (section I.6.).

I.1. Contexte : économie circulaire

I.1.1. Origine et fondements

L'économie circulaire (EC) est un concept encore émergent qui s'appuie sur les principes d'autres concepts plus traditionnels [8], [9] parmi lesquels l'économie en système fermé. Celle-ci a respectivement été évoquée par Kenneth E. Boulding et Herman Daly en 1966 et 1980 [9]. En comparant la Terre à un vaisseau, Boulding mettait en avant la nécessité d'une gestion raisonnée et cyclique des ressources [10] induisant de cette manière un système bouclé. Un tel système a par ailleurs été évoqué dans le rapport Meadows [11] et concrétisé par Walter Stahel avec le concept d'économie en boucle. Dans ce concept, les boucles sont potentiellement multiples et complémentaires

[9], la plus large étant celle dite « du berceau au berceau » qu'on retrouve logiquement dans l'approche *cradle to cradle* développée par Stahel et popularisée par William McDonough et Michael Braungart [12] et dans laquelle une distinction entre produit technique et produit biologique est faite, l'un ayant pour objectif d'être réintégré dans le circuit industriel et l'autre dans la biosphère.

Un autre fondement largement accepté de l'économie circulaire est l'écologie industrielle [10], [13], [14], elle vise à valoriser au maximum une ressource par la fermeture des boucles de matières et d'énergie [9] et s'appuie sur des méthodes telles que l'analyse des flux ou encore la pensée en cycle de vie. Un autre concept est l'économie de la fonctionnalité, provenant des travaux de Stahel [15], elle vise à subvenir à un besoin par un service en proposant la fonction d'un produit plutôt que le produit lui-même. L'intérêt de la mise en commun d'un bien étant d'accroître l'efficacité des flux ayant participé à sa fabrication.

Le terme d'économie circulaire est quant à lui apparu en 1990 dans les travaux de Pearce et Turner, le proposant comme un modèle opposé à l'économie linéaire [8], [16].

Pour une vision historique plus complète, le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) propose une chronologie conceptuelle de 1890 à 2014 [6] et pour aider à visualiser comment s'articule l'EC avec ses concepts voisins, cet organisme propose également une cartographie (Figure 1) : on y retrouve le développement durable, les concepts d'écologie industrielle, d'économie de la fonctionnalité, et de *cradle to cradle*. Sur l'axe vertical de ce graphique se situe le champ d'application, évoluant de l'échelle industrielle à celle de la société et l'axe horizontal introduit dans quelle mesure un concept donne des indications concrètes sur sa mise en œuvre. La cartographie des concepts a une allure de type diagonale, traduisant que des outils et concepts existent à toutes les échelles mais que leur mise en œuvre devient imprécise aux plus grandes.

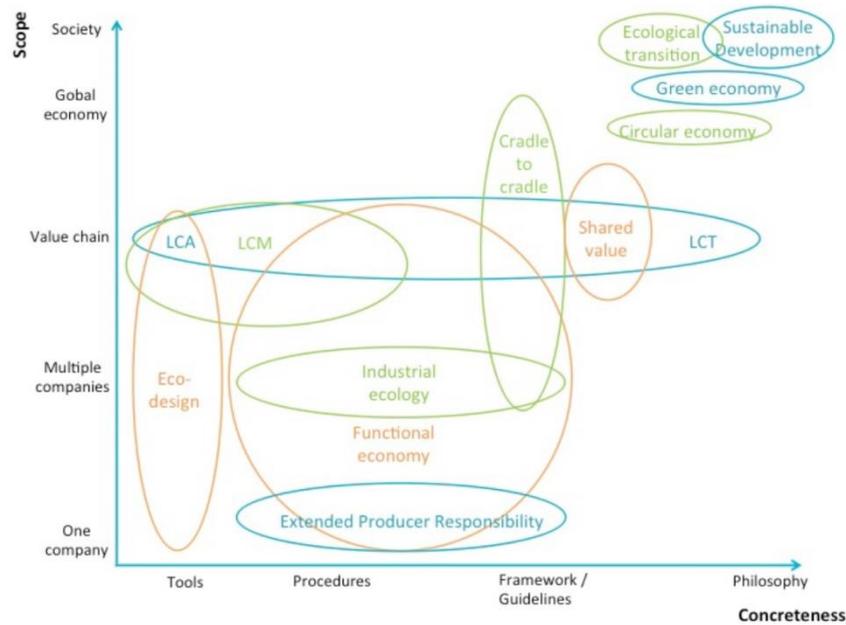
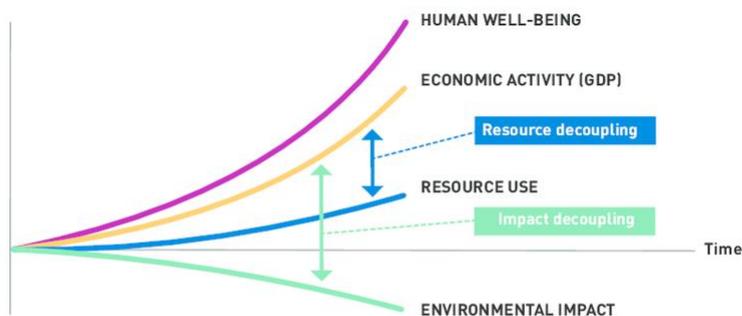


Figure 1 : Cartographie des outils et concepts autour du développement durable [6]

L'économie circulaire étant perçue comme un outil d'opérationnalisation du développement durable [17], [18] et ayant été estimée bénéfique sur le plan économique [6], [7], [19], elle a déjà été largement acceptée. Elle est d'ailleurs encouragée par les politiques : la Chine a en effet proposé une loi sur l'EC en 2009, suivie de l'Allemagne, des Pays-Bas et de la France dans sa loi de transition énergétique pour la croissance verte de 2015 [9], [20], [21]. Il faut néanmoins souligner que ce modèle économique est encore jeune, si bien qu'il n'a pas de définition normalisée [14], [16], [22]. Il a par ailleurs été propulsé par des industriels et leurs fondations et les recherches scientifiques sur le sujet restent encore relativement inexplorées [21].

I.1.2. Principes et définitions

Le concept d'EC se base sur la volonté de dématérialiser l'économie, c'est-à-dire découpler la croissance économique de la consommation de ressources (Figure 2) [8], [14].



Source: UNEP (2011a)

Figure 2 : Découplage de l'économie et de la consommation de ressources, d'après l'UNEP [23]

Il préconise ainsi de minimiser les flux de matières vierges en accroissant l'efficacité des ressources et en capitalisant sur le « recyclage ». L'objectif final étant d'équilibrer croissance économique et consommation de ressources.

Etant défini au rang de cadre, voire de philosophie dans les travaux du CIRAIG (Figure 1), l'économie circulaire souffre d'un périmètre relativement mal défini [16], [24]. Par conséquent, il ne lui existe pas une définition mais des centaines [25]. Seules deux provenant respectivement de la Fondation Ellen MacArthur (FEM) et de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), sont présentées ici. La FEM est effectivement identifiée comme un acteur incontournable dans ce domaine [6], [26], [27], et la définition de l'ADEME est celle que nous avons adoptée dans la suite de ces travaux.

I.1.2.1. Définition proposée par la Fondation Ellen MacArthur

La FEM propose de définir l'EC comme : *an industrial system that is restorative or regenerative by intention and design. It replaces the 'end-of-life' concept with restoration, shifts towards the use of renewable energy, eliminates the use of toxic chemicals, which impair reuse, and aims for the elimination of waste through the superior design of materials, products, systems, and, within this, business models* [7]. Elle est basée sur deux cycles (Figure 3) où la fin de vie est remplacée par la restauration, proposant ainsi un système continu. Dans cette perspective, seuls les éléments du cycle biologique (en vert) sont véritablement consommés, alors que les produits du cycle technique (en bleu) sont partagés. Luce Beaulieu et Daniel Normandin [24] résument cette approche comme une « approche industrielle systémique et résiliente, fondée sur le principe des cascades successives de processus, qui élimine la notion de déchet et fonctionne à partir de ressources et d'énergies entièrement renouvelables ».

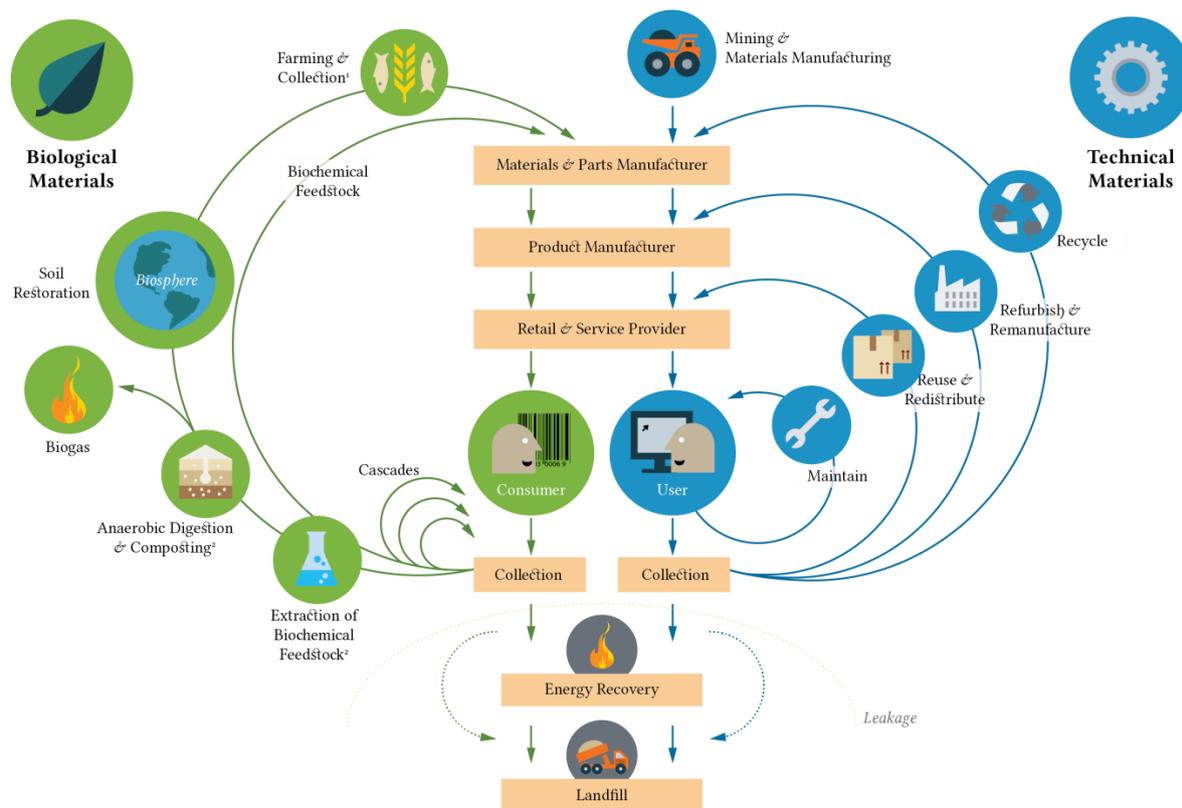


Figure 3 : Représentation de l'économie circulaire d'après la Fondation Ellen MacArthur [7]

I.1.2.2. Définition proposée par l'ADEME

En France, l'ADEME [16] formalise l'EC comme étant un « système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien être des individus. ». Cette définition se distingue de la précédente par le caractère non restaurateur du modèle d'une part et par l'intégration de l'individu d'autre part. Pour répondre à cet enjeu, trois pôles de recherches et d'actions sont proposés (Figure 4), ils reprennent les grandes étapes du cycle de vie d'un produit : sa production (offre des acteurs économiques), son utilisation (demande du consommateur) et sa fin de vie (gestion des déchets). L'ensemble de ces pôles forme un cycle où chaque étape entraîne la suivante. La mise en œuvre de ces actions s'appuie sur sept piliers :

- l'extraction/ exploitation et achats durables
(exploitation efficace des ressources via la limitation des rebus d'exploitation) ;
- l'écoconception
(prise en compte de l'environnement lors de la conception d'un produit ou d'un service) ;
- l'écologie industrielle et territoriale

(mode d'organisation inter-entreprises privilégiant les échanges de flux ou une mutualisation des besoins) ;

- économie de la fonctionnalité
(modèle économique privilégiant l'usage à la possession) ;
- consommation responsable
(mode de consommation encourageant le consommateur à prendre en compte les impacts environnementaux lors de ses choix) ;
- allongement de la durée d'usage
(le consommateur est encouragé à avoir recours à la réparation, l'occasion, pour augmenter la durée de vie d'un produit) ;
- recyclage
(techniques de transformation de déchets visant à en réintroduire une part dans le cycle de production).

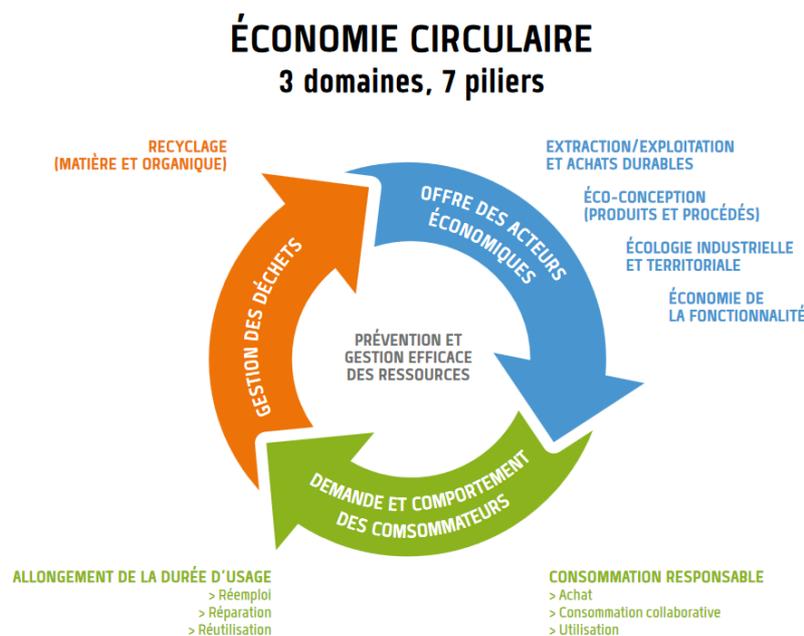


Figure 4 : Représentation de l'économie circulaire d'après l'ADEME [16]

Ces deux approches ont des concepts centraux communs, tels que la nécessité d'un nouveau système de production, l'optimisation de l'utilisation des ressources et la réduction des répercussions en fin de vie. Leurs pensées systémiques diffèrent néanmoins par les notions qu'elles mettent en jeu ainsi que par la nature restauratrice/régénératrice du concept [24] ; la vision de l'ADEME préférant se concentrer sur la gestion des matériaux et résumant l'économie circulaire par : « il s'agit de faire plus et mieux avec moins » [16].

L'économie circulaire propose un contexte favorable aux politiques de prévention des déchets et de gestion durable des ressources, avec l'optimisation de la durée de vie des produits parmi les leviers envisagés (dans les faits c'est l'accroissement de cette dernière qui est préconisée [28]).

Cette stratégie liée à la durée de vie doit séduire industriels et consommateurs pour être considérée comme une stratégie viable. Or, des études scientifiques ont montré que le consommateur serait enclin à changer ses habitudes pour favoriser les produits de plus longues durées de vie [29] et que les industriels pourraient préserver (voire augmenter) la valeur économique de leurs produits, tout en réduisant leur consommation de ressources [28]. Il serait ainsi prometteur de s'avancer sur ce terrain de la durée de vie.

Seule réserve, la durée de vie d'un produit est une notion particulièrement complexe à appréhender et à évaluer car elle dépend à la fois de l'utilisateur, du produit, de sa composition, de sa construction, etc. Dans la suite de ce chapitre nous nous attarderons donc sur ce qu'est la durée de vie des produits, quelles sont les causes de fin de vie et les leviers d'allongement et enfin quelles sont les répercussions environnementales d'un allongement de durée de vie.

I.2. Allongement de la durée de vie des produits

La durée de vie n'a pas de définition unique et suivant les secteurs d'activités il n'existe pas de méthode d'évaluation de sa valeur.

Il convient donc, dans un premier temps, d'arrêter la définition sur laquelle nous baserons ces travaux.

I.2.1. Éléments de définitions

Dans la littérature la notion de « durée de vie d'un produit » a déjà été définie mais il n'apparaît ni terminologie, ni définition harmonisées [30], [31]. Elle traduit généralement la durabilité dans le temps, c'est-à-dire l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint [32]–[34].

Dans les normes françaises NF EN 13306 et X60-500, relatives aux terminologies de la maintenance et de la fiabilité/maintenabilité/disponibilité, on la retrouve sous l'intitulé de durée de vie et de vie utile, respectivement définies comme :

- « durée pendant laquelle une entité accomplit une fonction requise dans des conditions d'utilisation et de maintenance données, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint. » ;
- « à partir d'un instant donné, intervalle de temps jusqu'à l'instant où un état limite est atteint ».

Dans ces deux cas la fin de vie est déterminée par l'apparition d'un état limite, alors que le début de vie n'a pas d'origine précise. La définition donnée par la norme NF S 72-701, concernant des équipements de protection individuelle à usage sportif, comble ce manque puisque la durée de vie y est cette fois définie comme la « période s'étendant de la date de fabrication à sa date de mise au rebut ».

Cooper [32] et Murakami et al. [31] apportent davantage de précisions en définissant un vocabulaire tel que : *technical life*, *service life*, *duration of use*, ou encore *residential time*. Murakami et al. circonscrit d'ailleurs jusqu'à 23 termes. Bien qu'ils aient une approche similaire leurs définitions ne concordent pas tout à fait, à titre d'exemple *service life* est respectivement définie comme suit :

- durée totale entre le moment de la vente et la mise au rebut [32] ;
- durée pendant laquelle un bien est fonctionnel et peut être utilisé [31].

En France, l'ADEME [30], dans son rapport d'étude sur l'allongement de la durée de vie des produits, propose un vocabulaire plus restreint reposant sur 4 définitions (Figure 5) :

- durée normative, la durée de fonctionnement moyenne, mesurée dans des conditions spécifiques de tests exprimée en temps, nombre de cycles ou sans unité ;
- durée d'usage, le laps de temps pendant lequel le produit est utilisé, en état de marche et prêt à l'emploi ;
- durée de détention, le temps écoulé entre la date d'entrée d'un produit dans le foyer (pas nécessairement neuf) et sa date de sortie ;
- durée d'existence, le laps de temps entre la fin de fabrication du produit et son élimination, sa valorisation ou son recyclage.

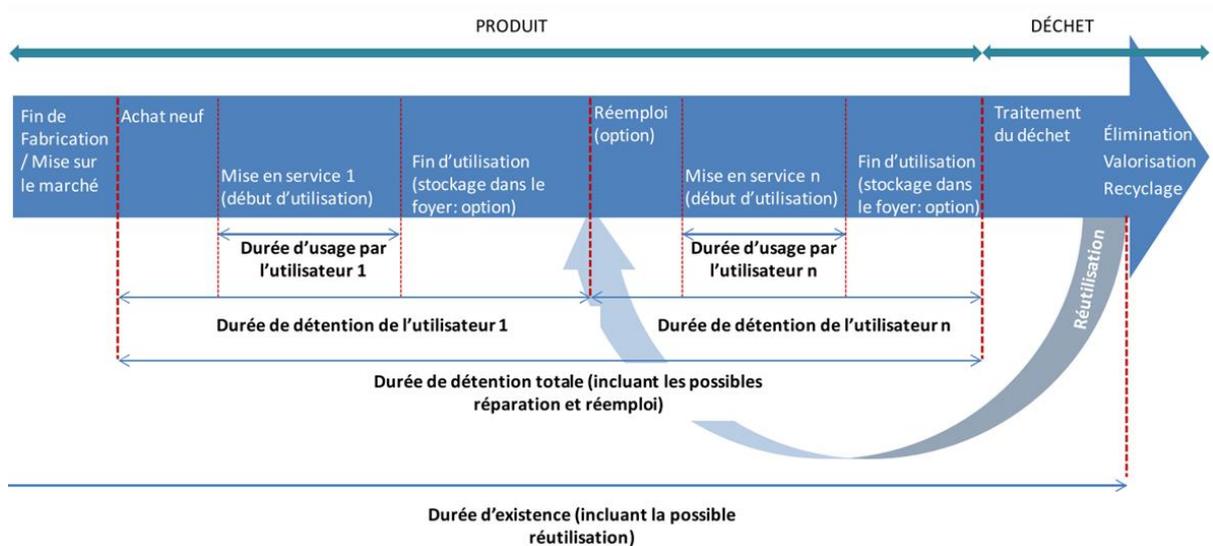


Figure 5 : Notions de "durées de vie" proposées par l'ADEME [30]

La durée normative étant définie comme mesurable, elle est la plus intéressante et c'est celle sur laquelle nous nous appuyerons. Ayant été pensée pour être universelle, cette définition ne fixe pas de conditions tests, elles doivent être spécifiques à chaque secteur et reposent sur la responsabilité des professionnels. Dans le cas des textiles d'habillement, la durée normative pourrait s'exprimer en nombre de lavages ou en nombre de portés et les conditions spécifiques de tests traduiraient au mieux les contraintes d'usage et d'entretien. Pour cette raison, il convient de s'intéresser à la nature de ces contraintes et à leurs conséquences sur les produits.

I.2.2. Ontologie de la durée de vie

S'intéresser à la durée de vie des produits équivaut en partie à s'intéresser à la notion d'obsolescence c'est-à-dire à la diminution de la valeur d'usage [35]. La littérature scientifique la distingue en deux catégories [36]–[38] : l'obsolescence absolue et l'obsolescence relative, correspondant respectivement à une fin de vie technique (liée à un facteur fonctionnel) et à une fin de vie prématurée (liée à des facteurs psychologique, économique ou technologique) du produit. Elles suggèrent toutes deux que la durée de vie d'un produit dépend en grande partie de :

- sa qualité et sa capacité à résister à la détérioration ;
- la faculté de la chaîne de fabrication à produire avec une qualité constante ;
- la possibilité de maintenir et réparer le produit ;
- sa capacité d'évolution ;
- sa dépréciation économique ;
- l'évolution des besoins consommateurs.

D'un point de vue plus sectoriel, de nombreux acteurs, académiques et privés, se sont intéressés à la question de la durée de vie des vêtements. Ces études ont apporté des éléments de réponses aux questions des causes de fin de vie et des leviers d'allongement.

L'étude bibliographique de Kirsi Laitala [39] reprend les résultats d'une quarantaine de publications sur le sujet de la fin de vie des textiles. Parmi les raisons de mise au rebut, elle recense notamment des raisons fonctionnelles liées à la qualité, à l'esthétique, au besoin ou encore à l'espace de stockage disponible. L'importance de chacune de ces raisons dans l'acte de jeter reste néanmoins imprécise. Seules cinq enquêtes, sur des populations extrêmement variées, allant de treize étudiantes américaines à 1014 adultes suédois, quantifient cette importance (Figure 6) [40]–[42], quatre types de raisons y étant distingués : la détérioration, le bien allé, l'attachement, et une catégorie « autre », la détérioration du produit ressortant régulièrement comme prépondérante [39]. La durée de vie serait donc d'abord une question de qualité et de capacité à résister à l'usure et serait donc davantage du ressort du fabricant. Ces conclusions dépendent pour beaucoup du public questionné et des résultats différents ont été obtenus dans une enquête qualitative menée par Cox et al. [43] où elle conclut que la mise au rebut se fait avant d'atteindre une fin de vie matérielle. Par manque d'informations objectives sur la durée de vie ou sur la qualité, les consommateurs s'appuient, lors de l'achat, sur des éléments tels que le prix ou la marque, les critères d'attachement émotionnel et de norme sociale interviennent alors de manière prépondérante. Une enquête menée par la société WRAP et relayée par la Fondation Ellen MacArthur [44] conclue également que le critère de la détérioration n'est pas le plus important (Figure 6). Pour aller plus loin, l'étude « Design for longevity » de Cooper et al. [45], supportée par WRAP, distingue des causes de fin de vie par catégories de produit reflétant différents usages possibles (Table 1) : des vêtements pour enfants, aux vêtements professionnels, en passant par le sport ou la vie quotidienne.

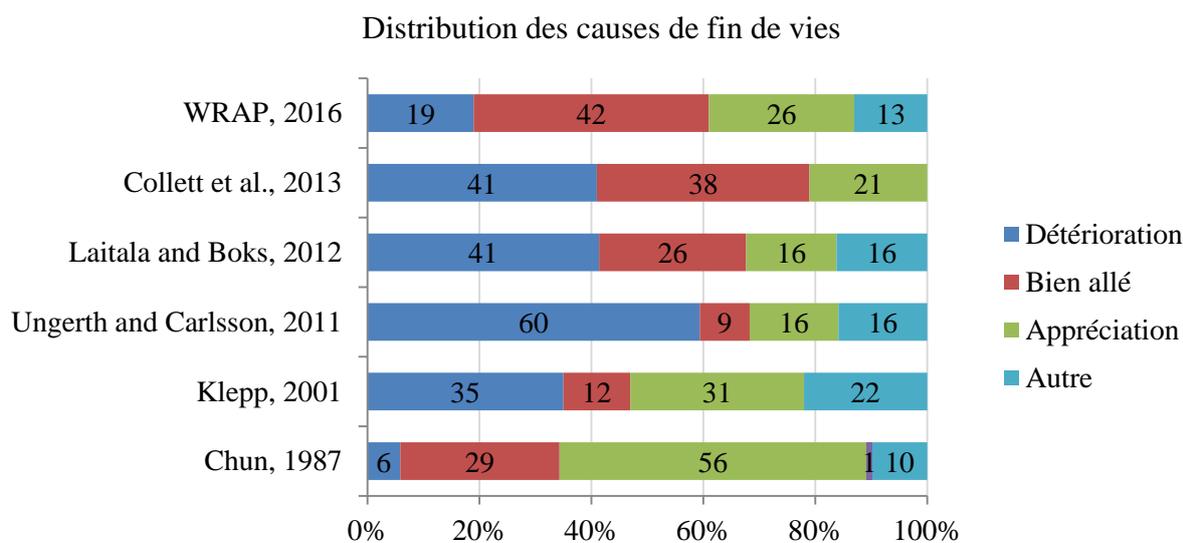


Figure 6 : Distribution des causes de fin de vie des textiles

Causes de fin vie	Solutions d'allongement
<ul style="list-style-type: none"> • la déformation • la décoloration • les tâches • le boulochage, le feutrage • les composants usés • la perte d'une fonction • la coupe • l'aspect usé • le confort 	<ul style="list-style-type: none"> • l'utilisation d'étoffes de meilleures qualités • l'utilisation de traitement de finition contre les tâches • des vêtements multifonctionnels • le renforcement des zones fragiles ou sujettes à contraintes • une coupe classique • un caractère évolutif • des conditions d'entretien claires • des produits mass customisés

Table 1 : Causes de fin de vie et solutions d'allongement

Les vêtements étant des biens de consommations, la responsabilité environnementale de l'industrie textile est partagée entre fabricants et consommateurs et il est admis que les stratégies environnementales impliquant l'extension de la durée de vie nécessitent une évolution globale du marché et de notre façon de consommer [46]. En réponse, le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), l'ADEME et la Fondation Ellen MacArthur [28], [30], [44] encouragent les fabricants à proposer des produits de qualité, réparables et évolutifs et à donner aux consommateurs

des indications claires sur l'utilisation des produits et sur leurs durabilités. Ils encouragent également les consommateurs à consommer en fonction de leurs besoins, à réutiliser les produits, à les maintenir et à les réparer, ou encore à envisager la mutualisation de leurs biens.

A l'intention des fabricants, les études de Cooper et al. et WRAP [45], [47] apportent des recommandations précises. Elles abordent autant l'aspect esthétique, via la coupe, que des aspects plus techniques, comme l'utilisation de l'acrylique pour certains usages, l'utilisation de fils élastomères pour éviter la déformation ou encore le fait de teindre en masse plutôt que sur fil ou sur étoffe. A titre d'exemple, certaines de ces recommandations sont résumées dans la Table 1.

Nous proposons de résumer l'ensemble des éléments précédents sous forme d'ontologie de la manière suivante (Figure 7) :

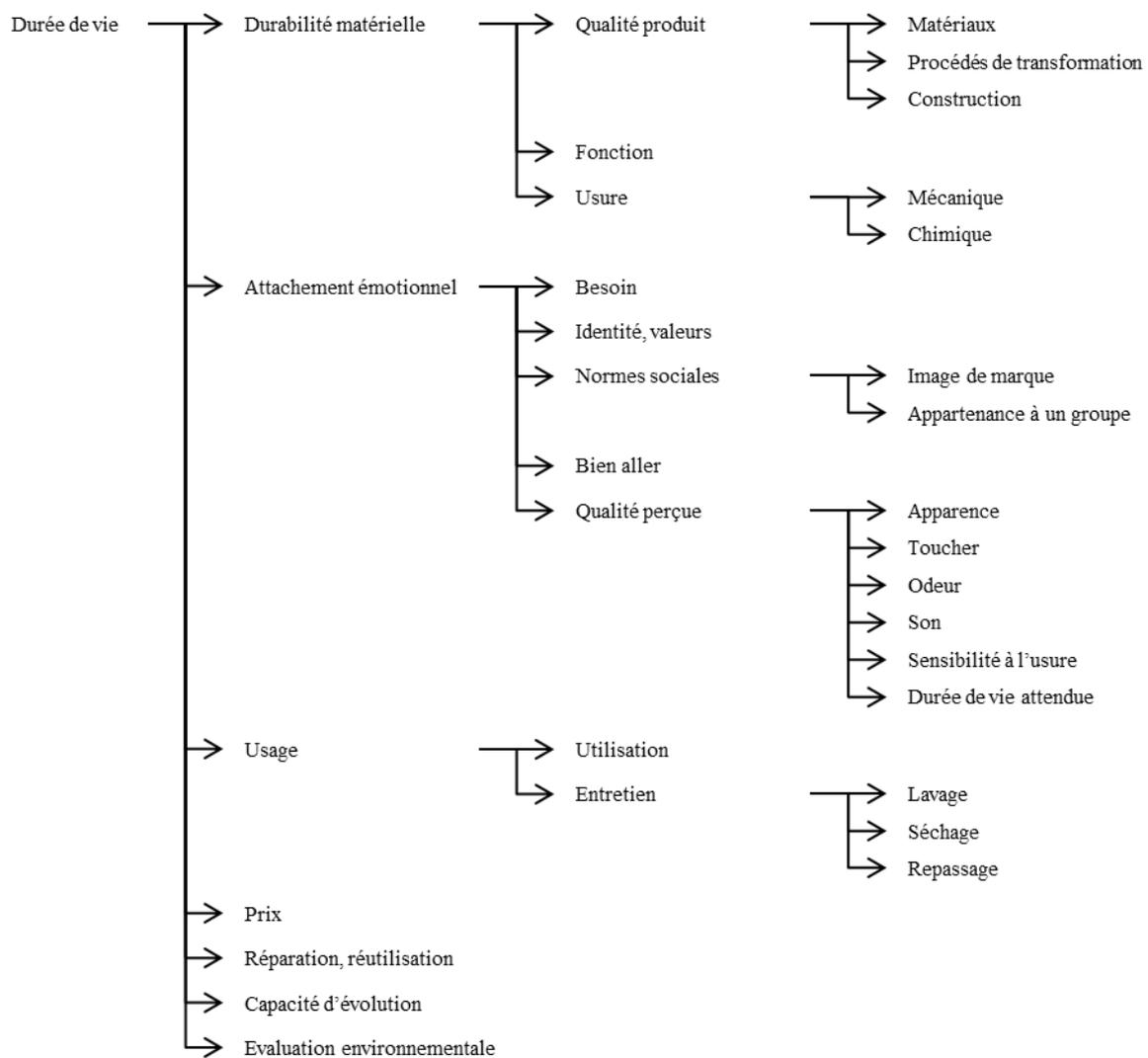


Figure 7 : Ontologie de la durée de vie

I.3. Evaluations environnementales des textiles d'habillement

La stratégie de réduction de l'impact environnemental par l'allongement de la durée de vie doit être validée. Pour cela, un panel d'outils d'évaluation plus ou moins complexes est disponible. A savoir des outils allant du monocritère qualitatif tel que les check-lists, jusqu'au multicritère quantitatif tel que l'analyse de cycle de vie (ACV), qu'il convient de choisir suivant l'objectif, le temps et le budget.

Nous revenons ici sur des études menées sur des vêtements avec l'idée de voir ce qu'elles concluent et comment elles ont été menées. Nous n'avons considéré que des études menées au moyen de l'ACV, dans la mesure où c'est le seul outil normé d'évaluation environnementale.

En préambule, un récapitulatif de la filière textile habillement est proposé pour en appréhender la diversité et la complexité. Nous verrons que cette complexité implique de poser certaines hypothèses qui ne sont pas sans conséquence en ACV.

I.3.1. Préambule : la complexité de la filière

La filière du textile habillement, bien qu'ancienne et largement installée, se caractérise par sa complexité. Dès le début de la chaîne, une grande variété de matières peut être transformée, provenant autant des secteurs de l'agriculture que de la pétrochimie. La chaîne de fabrication peut ensuite se diviser en quatre grandes étapes : la production de la matière première, la fabrication du fil, celle de l'étoffe et enfin celle du produit fini (Figure 8). Chacune d'entre elles proposant des procédés adaptés aux matières et aux usages, si bien qu'il existe une grande variabilité de scénarios pour un seul et même produit. Ci-dessous, nous revenons sur les matières et technologies existantes de la chaîne de fabrication, en suivant un ordre chronologique de la fibre au produit fini.

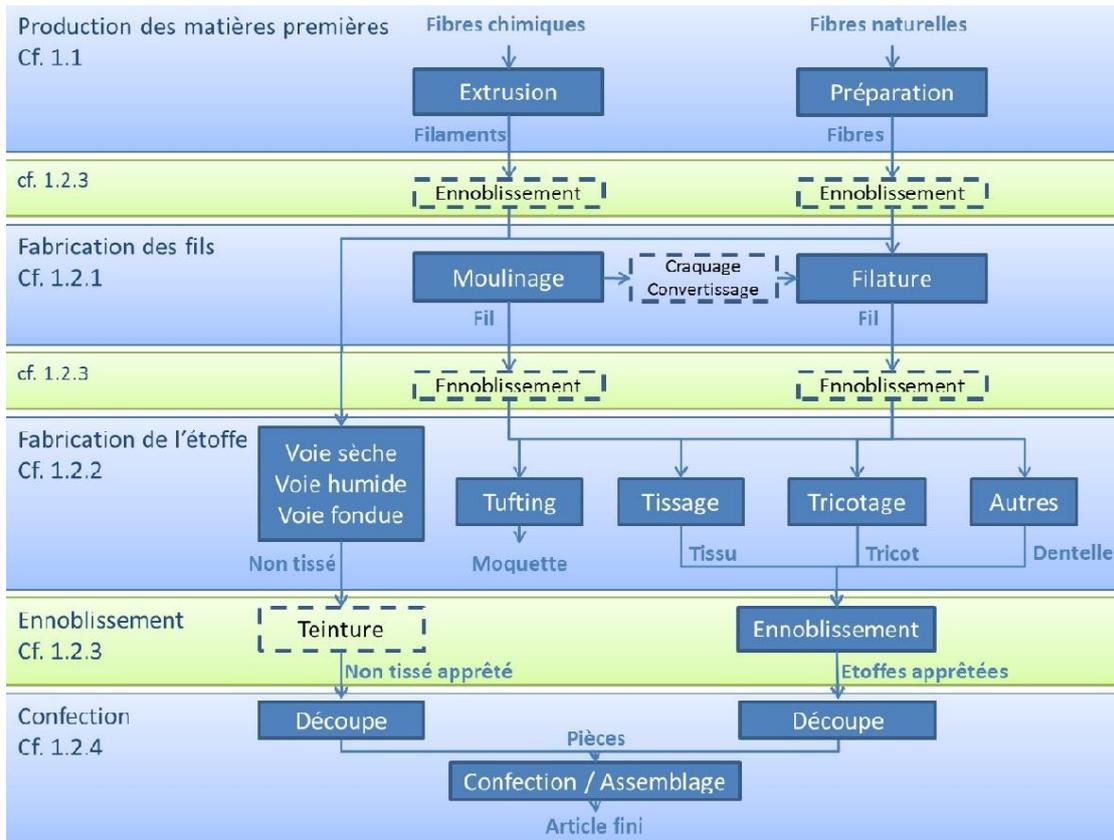


Figure 8 : Chaîne de fabrication textile [48]

I.3.1.1. Les matières premières

Bien que la production mondiale de fibres soit largement dominée par le coton et le polyester [49], il existe plus d'une centaine de fibres répertoriées [50], [51], appartenant soit à la famille des fibres naturelles, soit à celle des fibres synthétiques [52], [53]. Il existe des fibres pour tous les usages : certaines matières ont des propriétés antibactériennes, d'autres ont une grande ténacité, ou présentent de bonnes propriétés thermiques. La Figure 9 reprend certaines des matières principales subdivisées par famille et par origine.

Dans ces travaux, nous nous intéressons à trois d'entre elles : le coton, le polyester et le lin. Le choix du coton et du polyester est régi par leur représentation sur le marché mondiale des fibres textiles, elles sont en effet les deux les plus produites représentant respectivement 25% et 55% du marché [49]. Le choix du lin s'inscrit lui dans le contexte d'économie circulaire et de savoir-faire local, porté par la Région Hauts-de-France. La partie « lin » de ces travaux s'inscrit d'ailleurs dans le projet ECLin, également supporté par la Région et qui a pour objectif de repenser la conception des textiles en lin pour l'économie circulaire.

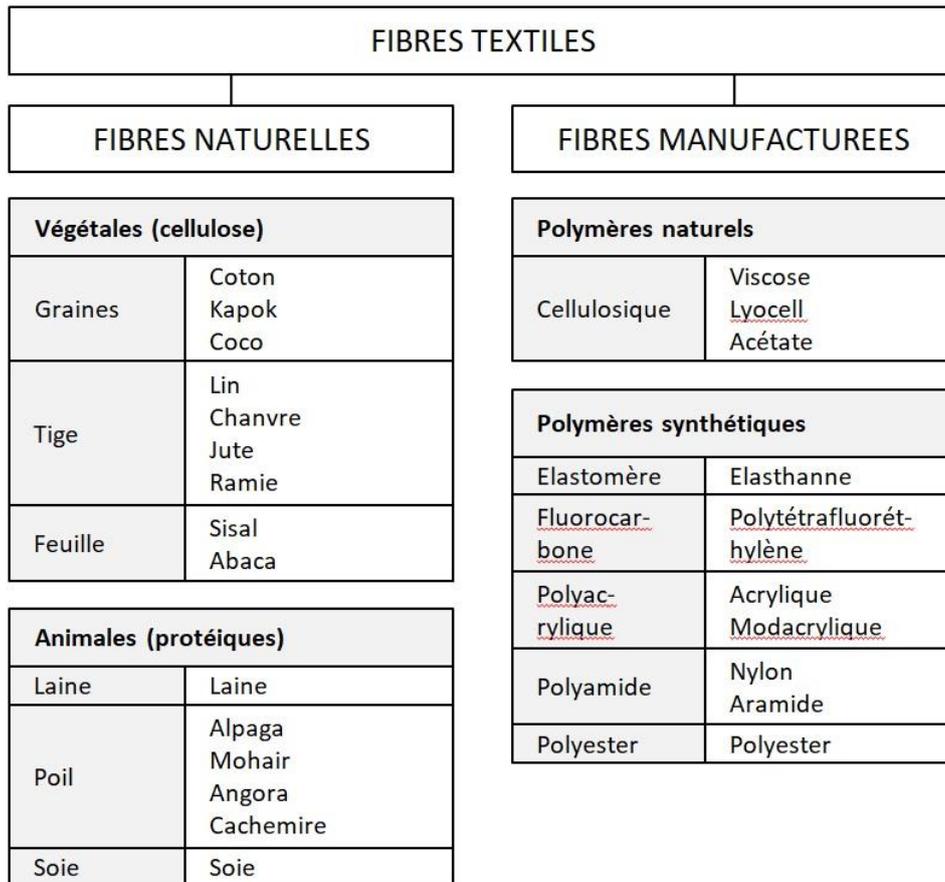


Figure 9 : Extrait d'une classification des fibres textiles [54]

I.3.1.2. Les procédés de transformations

I.3.1.2.1. Fabrication du fil

La transformation des fibres en fils est la première étape vers un vêtement, elle convertit une masse de fibres désordonnées en un long fil régulier [52]. Cette transformation met en jeu différents types de procédés sélectionnés en fonction de la composition de la fibre et de sa longueur. Un fil formé à partir de fibres discontinues est qualifié de filé de fibres et un fil continu est qualifié de filament.

Les filés de fibres sont issus de matière sous forme de bourre. Mise en forme sous forme de voile, puis étirée, la bourre est petit à petit réduite en ruban, puis en mèche avant de former le filé [54], [55]. La dernière étape, transformant la mèche en fil, est dénommée la filature proprement dite. Elle apporte une cohésion au filé en lui conférant un certain degré de torsion. Suivant les propriétés fonctionnelles souhaitées du matériau textile, certains systèmes sont plus adaptés que d'autres. La filature à anneaux (correspondant à la filature conventionnelle) et la filature rotor (non conventionnelle) en sont des exemples. Avec les avancées technologiques, des sous catégories dans ces procédés existent, tel que le système classique, compact, à friction etc [55], [56].

Les filaments sont majoritairement issus de polymères synthétiques provenant du pétrole [54]. Utilisés sous forme de granulés en filage, ils sont extrudés au travers de filières, ayant une forme en section (ronde, trilobée, etc.) et un nombre d'orifices fixés [57]. Un unique orifice permet d'obtenir un monofilament, au-delà il s'agit de multifilaments. Trois procédés sont ici disponibles, le filage en voie humide, à sec ou par fusion [57]. Suivant l'usage, les multifilaments ont encore la possibilité d'être texturés par diverses méthodes (fausse torsion, friction, compression, soufflage, tricotage-détricotage).

A noter que les fils peuvent encore être assemblés entre eux, créant ainsi des fils retors, ou des fils guipés.

L'industrie textile qualifie la finesse des fils ainsi obtenus par le titrage, donné par un numéro basé sur le rapport entre le poids et la longueur du fil. Deux systèmes sont communément utilisés, le système Tex, et le système métrique. Le système Tex donne un titre (une finesse) en tex. La valeur du titre est donnée par le poids en gramme d'un kilomètre de fil ($\text{tex} = \text{g/km}$). Dans ce système, plus le fil est fin, plus le numéro est petit. Un fil peut par exemple avoir un titre de 20 tex, indiquant que 1km de fil pèse 20g. Le système métrique donne un titre en Nm, qu'on appelle encore numéro métrique. Sa valeur est donnée par la longueur en mètre de 1g de fil. Dans ce cas, plus le fil est fin, plus le numéro est important.

I.3.1.2.2. Fabrication de l'étoffe

En textile habillement, deux types d'étoffes sont majoritairement utilisées : les tissées et les tricotées. Chacune étant respectivement issue des procédés de tissage et tricotage.

Le tissu résulte de l'entrecroisement de fils de chaîne et d'un fil de trame en un motif appelé armure. La formation de l'armure est réalisée par le passage du fil de trame au travers des fils de chaîne, lorsque ceux-ci sont écartés au moyen d'un système de lame et de lisses, ou d'un système Jacquard [58]. L'insertion de la trame peut se faire au moyen d'une navette, d'un projectile, d'une pince, d'un jet d'air ou d'un jet d'eau [54], [58]. Le choix de la densité et de l'armure (pour la plupart dérivées des armures toile, sergé et satin [54]) est effectué en fonction de l'application et de l'effet recherché.

Le tricot est issu d'un ou plusieurs fils repliés en boucles solidaires les unes aux autres. Suivant le type de tricot, la formation des boucles est réalisée soit à l'horizontal (tricot trame), soit à la vertical (tricot chaîne) [59], [60]. Un tricot chaîne implique l'utilisation de plusieurs fils alors qu'un tricot trame peut n'en impliquer qu'un seul. Dans les deux cas, les boucles sont formées via un système d'aiguilles dont la sélection fera varier le motif qu'on appelle liage. Une grande variété de liages est là aussi envisageable, dérivées du jersey et de la côte [54]. Suivant entre autre la productivité, le type de produit, des métiers rectilignes, circulaires, raschel ou encore fully fashion pourront être utilisés [60].

I.3.1.2.3. Ennoblement de l'étoffe

Bien que souvent réalisé sur étoffe, l'ennoblement peut être réalisé à toutes les étapes de transformation. Il existe des procédés sur fibres, fils, étoffes et produits finis [54], [61]. L'ennoblement englobe l'ensemble des procédés qui ont pour but d'embellir et de donner de nouvelles propriétés à un matériau. Il comporte trois grandes étapes : la préparation, la coloration et l'apprêtage.

La préparation est l'étape où le matériau est « nettoyé » avant teinture. Lors des étapes précédentes, des cires, des colles et des lubrifiants ont pu être utilisés et ont imprégnés la matière. La préparation les élimine en vue d'améliorer les résultats des procédés à suivre. Parmi les procédés de préparation, on distingue le désencollage, le flambage, le débouillissage, le blanchiment ou encore le mercerisage [62].

La coloration, ou teinture, se fait au moyen de colorants, solubles ou insolubles et de produits auxiliaires textiles [63]. Les colorants sont sélectionnés en fonction de la matière à teindre et de l'usage [54], [61]. Des procédés adaptés seront utilisés, ils diffèrent par la pression, la température et par la circulation du bain ou de la matière [64].

L'apprêtage, qu'il soit mécanique ou chimique, permet d'apporter de nouvelles propriétés au matériau [54], [65], l'apprêtage mécanique agit sur son aspect de surface quand l'apprêt chimique consiste généralement en l'application d'une substance. Ainsi une étoffe peut être grattée, rasée, émerisée, ou elle peut subir des traitements d'hydrofugation, d'ignifugation etc. Une possibilité supplémentaire pour apporter de nouvelles propriétés à une étoffe consiste à l'enduire ou à la laminer [54]. Le procédé d'enduction permet l'application d'une couche de polymère en surface de l'étoffe, quand le laminage consiste en l'assemblage d'étoffes entre elles.

I.3.1.2.4. Confection

La dernière étape de fabrication d'un textile d'habillement est l'étape de confection qui consiste en la découpe des étoffes, suivant un patronage et un plan de coupe prévus et la confection c'est à dire l'assemblage des pans d'étoffes entre eux.

La découpe se fait généralement dans un matelas issu de la superposition d'étoffes. Une fois découpées les pièces sont cousues pour former le produit fini au moyen de machine à coudre. C'est l'étape la plus manuelle de la chaîne de fabrication des vêtements. Des machines spécifiques aux types de couture sont utilisées, on trouve ainsi les machines à points de chaînette, les surjeteuses ou encore les machines à coutures plates [66].

I.3.2. La durée de vie des textiles en ACV

La diversité de la filière se traduit dans les études ACV par une certaine difficulté à spécifier la qualité du produit ou sa durée de vie. A titre d'exemple la Table 2 répertorie par ordre chronologique d'étude, les durées de vie de T-shirts et de jeans, deux vêtements générant de gros volumes [67]. A partir de ces études plusieurs observations peuvent être faites :

- la durée de vie s'exprime principalement en nombre de lavages et éventuellement en années ou en nombre d'utilisations ;
- les durées de vie observées présentent des écarts conséquents, variant de 5 à 75 lavages dans le cas des T-shirts et de 23 à 69 lavages dans le cas des jeans. Bien que les comportements consommateurs varient et peuvent expliquer ces différences, aucune étude n'appuie son estimation de durée de vie ni par la qualité ni par l'usage.

Etude	Produit	Nombre d'utilisations	Nombre de lavages
Leffland et al. [68]	T-shirt	(1an)	5 ; 75
Ellebaek Larsen et al. [69]		(1 an)	50
Allwood et al. [70]		-	25
Steinberger et al. [71]		100 (2 ans)	50
Cooper et al. [72]		82 (3,3 ans)	41
Baydar et al. [73]		(3 ans)	50
Roos et al. [67], [74]		22	11
Strand [75]		-	25
Zhang et al. [76]		-	45
Lhotellier et al. [77]		-	50
Cotton incorporated [78]		-	18,2
EC, Pesnel, Payet [79]			52
Labouze et al. [80]	Jeans	208 (4 ans)	69
Cox et al. [43]		(0-2 ans)	
Cooper et al. [72]		232 (3,1 ans)	23
Roos et al. [67], [74]		200	20
Strand [75]		-	67
Lhotellier et al. [77]		-	30
Cotton incorporated [78]		-	23,5

Table 2 : Durées de vie prises en compte dans l'ACV de T-shirts et de jeans

Les études d'Ellebaek et al. [69], d'Allwood et al. [70] et de Steinberger et al. [71] proposent chacune l'étude d'un T-shirt 100% coton de 250g. Dans chaque cas la chaîne de fabrication est partiellement explicitée mais ne détaille ni les types de procédés mis en jeu ni les qualités de fil, d'étoffe et de produit fini. La seule variable précisée est le poids du T-shirt car il constitue une donnée d'entrée de l'ACV.

Il ressort de chacune de ces études que l'usage a une influence majoritaire sur la consommation d'énergie primaire. Par conséquent, pour des résultats fiables la bonne modélisation de la phase d'utilisation est un enjeu significatif [48].

Les études de Roos et al. [74] et Zhang et al. [76] ou encore le rapport de l'institution Cotton Incorporated [78] apportent des précisions techniques et technologiques quant à la fabrication des T-shirts. Malgré cela, les durées de vie restent estimées en fonction de statistiques liées au comportement du consommateur et au nombre de produits possédés et non en fonction de la qualité des produits considérés.

Parmi ces études certaines s'intéressent à l'allongement de durée de vie : dans le cadre du projet CEIDOC, Leffland et al. [68] met en évidence son intérêt en réalisant une étude de sensibilité sur la durée de vie d'un T-shirt. Deux scénarios impliquant un T-shirt résistant à 5 puis à 75 lavages sont comparés. Il conclut que le renouvellement et l'utilisation du T-shirt le moins résistant génère un impact supérieur. Ces conclusions ont également été approuvées par deux études plus récentes : celle d'Allwood et al. [70] menée sur un chemisier en viscose et celle de Pesnel et al. [81] sur des draps de lit, laquelle met également en avant la potentielle augmentation d'impacts lors de la phase de production.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons mené une étude préliminaire de même nature en comparant deux chemises en lin [82]. Un usage type et deux qualités de chemises (de durées de vie hypothétiques) ont ainsi été modélisés. Un résultat tout à fait similaire à celui de Pesnel et al. a été obtenu, avec une augmentation de l'impact sur la seule phase de fabrication, qui était compensée en considérant le cycle de vie complet.

I.4. Limites observées

Nous avons vu précédemment les bénéfices potentiels que peut dégager l'économie circulaire et l'allongement de la durée de vie des produits. Cependant certaines limites apparaissent, tant à l'échelle macro du modèle qu'à l'échelle micro de la durée de vie.

L'économie circulaire est un concept encore jeune, considéré par beaucoup comme vertueux et ce bien qu'il ne soit pas assez questionné et critiqué [83]. Un besoin de cadrage est requis et aujourd'hui des

réflexions sont portées sur la définition d'un indice de circularité. Christian Arnspenger et Dominique Bourg [27] insistent par exemple sur le fait que l'EC doit adopter une vision systémique pour ne pas considérer la seule production et éviter les effets rebonds. Les impacts environnementaux sont effectivement autant liés à la nature des flux qu'à leur quantité.

En tant que laboratoire de recherche textile, c'est davantage à l'échelle du produit que nous nous intéressons. Des recherches scientifiques ont montré l'intérêt de l'allongement de la durée de vie mais présentent néanmoins certaines limites, la plus importante étant l'évaluation de la durée de vie. En général les conclusions des études environnementales se basent sur des durées de vie estimées à partir de statistiques liées au consommateur plutôt qu'à la qualité intrinsèque des produits et leur capacité à résister à l'usure. Or nous avons vu que la durée de vie dépend de l'ensemble de ces facteurs.

Comme nous le détaillons ci-après, les enjeux pour lesquels il est nécessaire d'évaluer la durée de vie des produits sont importants. En l'absence d'outils, les cadres méthodologiques existants recommandent pour le moment l'utilisation d'une durée de vie fixée par typologie de produit [84], mais ne permettent pas la distinction des qualités, ce qui, en considérant les conclusions de l'étude de Pesnel et al. [81], pourrait même fausser les résultats d'une étude comparative.

I.5. Enjeux de l'évaluation de la durée de vie

Dans l'objectif de transition vers un développement durable, les stratégies de l'économie circulaire amènent les gouvernements à apporter un certain nombre de dispositions réglementaires et législatives qui abordent les questions de durées de vie.

I.5.1. Projets d'affichages

En 2013, le comité économique et social européen (CESE) a émis un avis en faveur de l'affichage de la durée de vie estimée, avec pour objectif d'apporter une meilleure information au consommateur. Dans le même sens, encouragée par le Grenelle de l'environnement et par le contexte d'économie circulaire, la loi Hamon de 2014 prévoyait à titre expérimental le double affichage du prix de vente et d'usage [32] avec l'idée d'inciter le consommateur à acheter ou louer un bien. Cette expérimentation a été suspendue à cause de difficultés rencontrées sur la définition du prix d'usage. Un tel prix devant être en partie basé sur la durabilité des produits mais cette notion était alors à l'étude dans d'autres groupes de travail [85]. Il ressort malgré tout la nécessité de prendre en compte la durée de vie et le comportement du consommateur dans ce projet. Le groupe de travail sur la durabilité souligne également la nécessité d'informer le consommateur sur la durée de vie des produits au moment de l'achat. 92 % des consommateurs européens seraient ainsi intéressés par cette information [34]. Ce

constat est également véhiculé par le PNUE [28], qui recommande la création d'indicateurs de durabilité pour le secteur textile habillement.

Par ailleurs, dans le cadre de la loi de transition énergétique pour la croissance verte un projet d'affichage environnemental a été proposé. L'idée est d'apposer sur certains produits leurs impacts environnementaux afin de sensibiliser le consommateur. Encadré par l'ADEME et l'association Française de normalisation (AFNOR), des groupes de travail par catégorie de produits ont été mis en place pour élaborer les cadres méthodologiques d'évaluation de ces impacts. Les cadres proposés fixent ainsi les indicateurs d'impacts retenus, leurs méthodes de calcul et certaines modalités relatives aux périmètres des études. Ces travaux ont donné lieu à la publication de « bonnes pratiques », sous la référence BP 30-323, utilisables lors d'étude d'analyse de cycle de vie. Il faut souligner que la durée de vie ne fait pas partie des critères affichés. Dans la mesure où il n'y a pas de méthode normalisée pour la calculer [30], les données sont souvent disparates. Pour cette raison le groupe de travail sur les textiles d'habillement a proposé trois durées en fonction du type de produit (T-shirt, chemise, pull, veste etc.) [84]. Cela pose question et fait d'ores et déjà partie des points à approfondir lors de la 1^{ère} révision du référentiel. Au plan européen, une recommandation a été adoptée en 2013 par la Commission Européenne [86], elle incite les acteurs économiques à utiliser des méthodes communes européennes pour le calcul de la performance environnementale des produits et des organisations. Cette recommandation a initié le projet dit PEF-OEF (pour *Product Environmental Footprint* et *Organisation Environmental Footprint*) visant à développer des référentiels sectoriels et à fournir des recommandations de transparence et de fiabilité pour la communication des résultats. Dans le cas des textiles d'habillement, le référentiel proposé, livré en février 2019, porte sur le T-shirt et fixe également une durée de vie [79]. Il précise par ailleurs que cette durée fixe est une limite mais qu'en l'absence de méthode normalisée il n'est pas envisageable d'introduire une durée variable. Cet élément sera, si possible, corrigé à l'expiration de la date de validité de ce premier référentiel, c'est-à-dire fin 2020.

I.5.2. Eco-modulation de la contribution (taxe recyclage)

La contribution (au recyclage) intervient dans le contexte de la responsabilité élargie des producteurs (REP), dite filière REP, une filière de gestion des déchets encadrée par le code de l'environnement. L'article 69 de la loi n° 2006-1666 précise que « toutes les personnes [...] qui mettent sur le marché national à titre professionnel des produits textiles d'habillement, [...] neufs destinés aux ménages sont tenues de contribuer ou de pourvoir au recyclage et au traitement des déchets issus de ces produits ». Deux moyens sont à dispositions des metteurs en marché pour accomplir cette obligation : soit en contribuant financièrement à un organisme agréé, c'est la contribution, soit en mettant en place un système individuel de recyclage et de traitement des déchets [87].

L'organisme agréé, Eco TLC dans le cas des textiles, linges de maisons et chaussures (TLC), a notamment pour rôle de fixer le barème de cette contribution. Il propose ainsi quatre barèmes dont trois sont éco-modulés. Les éco-modulations proposées sont fonction d'un critère de durabilité d'une part ou d'un taux de matières recyclées d'autres part, deux sources étant distinguées entre la post production et le post consumer.

Le critère de durabilité, celui qui nous concerne, est aujourd'hui conditionné de la manière suivante (Table 3) [88] :

Produit concerné	Tests	Valeur seuil
T-shirt	Stabilité dimensionnelle (ISO 5077)	< 5%
	Solidité teinture au lavage (ISO 105 C06)	4-5 (produits clairs) 5 (produits foncés)
Jeans	Stabilité dimensionnelle (ISO 5077)	< 3%
	Résistance à l'abrasion (ISO 12947-3)	≥ 15 000 cycles
Drap	Stabilité dimensionnelle	< 5% (maille) < 3% (chaîne et trame)
	Résistance à l'abrasion (ISO 12947-3)	≥ 20 000 cycles
Pull	Stabilité dimensionnelle (ISO 5077)	< 5%
	Boulochage (ISO 12945-2)	≥ 4

Table 3 : Critères d'éco-modulation de la durabilité

Chaque durabilité produit est dépendante de deux tests normalisés. Les résultats obtenus ne dépendent ici que de la qualité du produit alors que la durabilité dépend également du consommateur. L'organisme souhaite faire évoluer ce critère de durabilité pour le rendre plus complet et robuste. Ces travaux de recherches permettront donc d'aider à fournir un cadre méthodologique à son évolution.

L'enjeu d'évaluer la durée de vie est donc multiple. Elle intervient dans le calcul des impacts environnementaux, desquels découlent des stratégies d'écoconception et de fin de vie, elle interviendra assurément dans le prix d'usage et elle pourrait bénéficier de son propre affichage. Par ailleurs, les notions de durée de vie et de qualité sont liées. Cette dernière étant mesurable elle sert de base au barème de la contribution au recyclage.

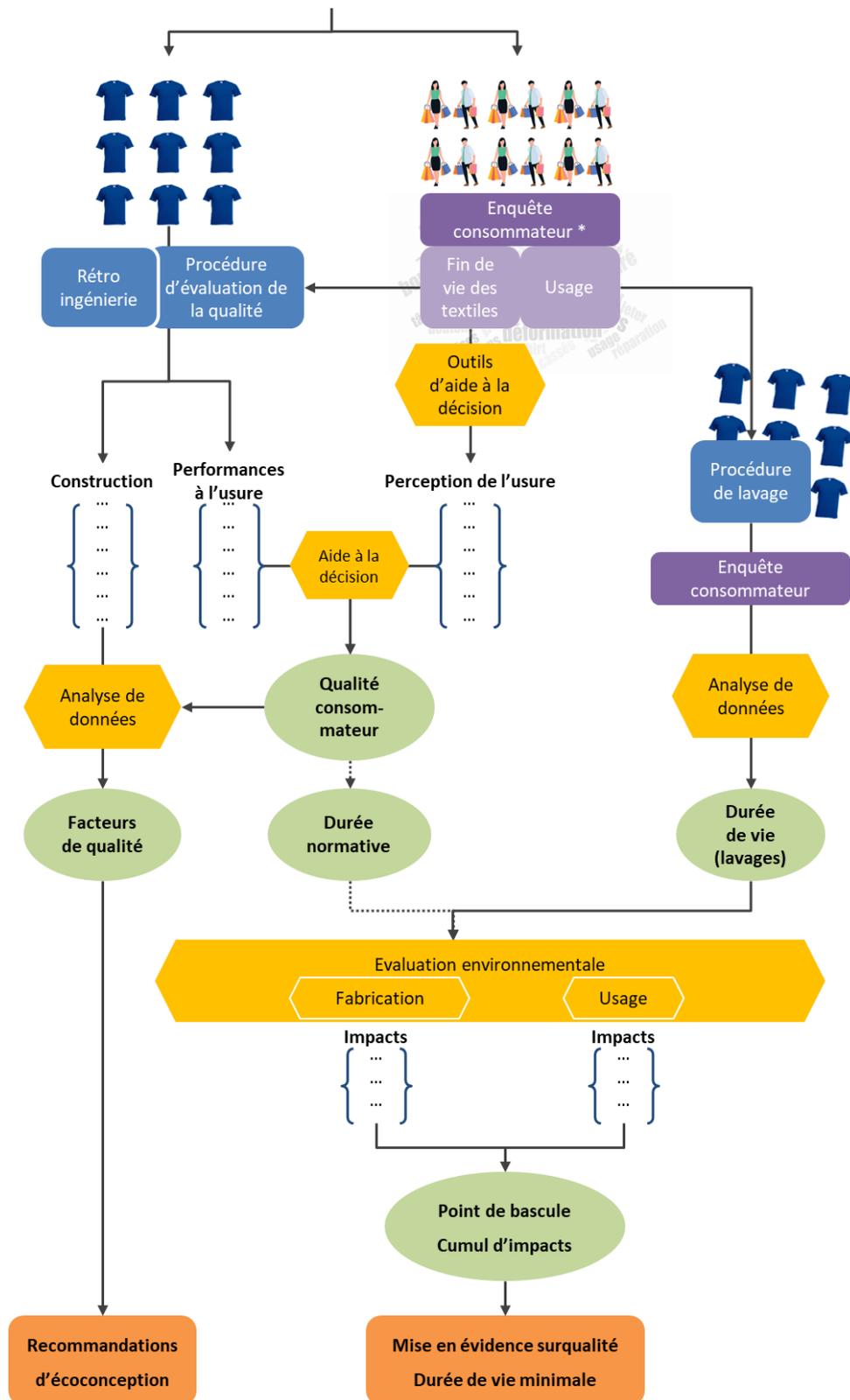
I.6. Méthodologie proposée

Les travaux effectués dans cette thèse ont pour objectif de contribuer aux réflexions sur la durée de vie en apportant des outils d'aide à la décision destinés notamment à mieux prendre en compte cette notion dans les études environnementales. De manière plus spécifique, il s'agit d'identifier et de modéliser les relations entre durée de vie, qualité, procédés de transformations, usage, fin de vie et impacts environnementaux.

La Figure 10 illustre la méthodologie du projet. Elle a été mise en place et expérimentée sur 29 T-shirts de trois matières distinctes (coton, lin et polyester). La durée normative est définie comme une unique valeur. Pour l'évaluer nous nous sommes intéressés aux performances des produits, elles sont en effet mesurables au travers de tests normalisés. Cependant, elles ne traduisent pas les contraintes réelles de l'usage mais plutôt une qualité spécifique comme une résistance à la déchirure ou aux frottements. La solution que nous avons envisagée est de faire intervenir le consommateur dès l'évaluation de la qualité pour s'approcher d'une qualité d'usage. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur une enquête consommateur menée par le laboratoire Gemtex en 2012, dont l'objectif était de définir les habitudes des Français dans le cadre de l'entretien et la fin de vie des articles textiles. Deux types de données résultent de cette enquête, d'une part des statistiques liées à l'usage et d'autre part des données liées à la fin de vie des articles et plus précisément aux causes matérielles qui interviennent dans la décision de jeter. La nature de ces causes a permis d'établir une procédure métrologique adaptée par laquelle les produits ont été testés. Leurs importances relatives dans la décision de jeter déterminent la perception du consommateur et ont été établies au moyen d'un outil d'aide à la décision. Les résultats des tests, appelés performances, ont ainsi été retranscrits en un score unique de qualité prenant en compte le consommateur. Ce score dénommé « Qualité orientée consommateur (QOC) » est un intermédiaire entre la « qualité produit » et la « qualité perçue » présentes dans l'ontologie (Figure 7).

En parallèle, les produits ont été déconstruits via un processus de rétro-ingénierie (RI), pour déterminer leurs chaînes de fabrication ainsi que leurs caractéristiques physiques. Associées au score de qualité dans une analyse de données, ces informations ont permis de mettre en évidence les facteurs de qualité et d'émettre des recommandations de paramétrages des procédés.

Par ailleurs, des lavages répétés paramétrés à partir de statistiques et une enquête consommateur réalisée en interne ont permis d'établir les durées de vie des produits. Ces durées de vie ont été intégrées dans divers scénarios d'études environnementales. Deux types de scénarios se distinguent : des scénarios de fabrication et un scénario d'usage. Finalement, le calcul des impacts environnementaux des produits et diverses interprétations ont permis de quantifier dans quelle mesure les produits de plus longues durées de vie sont bénéfiques.



* [89], [90]

Figure 10 : Méthodologie proposée

Chapitre II Matériels et méthodes

Comme évoqué en section I.2.2. , la durée de vie des articles textiles d'habillement dépend autant d'aspects matériels qu'émotionnels ou encore liés à l'usage. Pour contribuer aux réflexions sur son évaluation nous proposons par conséquent une méthodologie basée à la fois sur la connaissance du produit et celle du consommateur. Elle a pour objectif :

- d'évaluer la perception de l'usure par le consommateur ;
- de proposer un score unique de qualité des produits basé sur cette perception et sur la capacité des produits à résister à l'usure ;
- d'identifier les leviers d'allongement de la durée de vie ;
- d'améliorer les scénarios d'évaluations environnementales.

Dans ce chapitre, nous commencerons par nous intéresser au consommateur et détaillerons quelles informations le concernant nous seront utiles, avec notamment ses habitudes quant aux causes de fin de vie des produits (section II.1.). Nous expliciterons ensuite comment l'analyse multicritère hiérarchique floue (Fuzzy AHP, pour *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) permet de déterminer l'importance relative de ces causes dans la décision de jeter, représentant ainsi la perception de l'usure par le consommateur (section II.2.). Nous nous intéresserons à la capacité des produits à résister aux facteurs d'usure et proposerons une procédure de collecte des performances des produits (section II.3.) et proposerons le score QOC en tant que score unique de qualité en combinant les performances des produits et la perception du consommateur par la méthode PROMETHEE II. En section II.4. , nous verrons comment nous avons déployé une démarche de rétro-ingénierie et l'analyse en composantes principales pour identifier les leviers d'allongement de la durée de vie des produits. Avant de conclure et pour vérifier la pertinence du score QOC nous détaillerons en section II.5. une procédure d'évaluation de la durée de vie des produits, basée sur un vieillissement réel et une enquête consommateur. Enfin en section II.6. nous détaillerons le principe de l'analyse de cycle de vie, outil d'évaluation environnementale, dans lequel nous prévoyons d'intégrer les durées de vies déterminées.

II.1. Intérêt de connaître le comportement du consommateur et besoins

Dans l'élaboration d'une durée normative, la prise en compte du consommateur est un enjeu majeur. Pour qu'elle soit la plus proche possible de la durée de vie réelle, les habitudes des consommateurs doivent être connues et considérées. Habituellement de telles informations sont collectées au moyen d'enquêtes dont la mise en place dépend d'un objectif précis. Dans notre cas, il s'agit d'étudier le comportement des consommateurs sur les deux volets que sont l'usage et les causes de mise au rebut. Pour répondre à cet objectif l'enquête doit être orientée et répondre à certains besoins.

II.1.1. Besoins identifiés

Dans l'ontologie proposée précédemment (section I.2.2.), le consommateur intervient directement à plusieurs niveaux avec :

- son attachement émotionnel, dépendant d'une part de son besoin, de ses valeurs, des normes sociales et d'autre part de sa perception de la qualité avec entre autre les notions d'apparence, de toucher et de perception de l'usure ;
- son usage c'est-à-dire ses habitudes d'utilisation et d'entretien ;
- ses habitudes de réutilisation et de réparation des produits.

La durée normative étant définie comme une durée de vie moyenne mesurée dans des conditions spécifiques de tests, elle ne repose à priori pas sur les notions immatérielles de mode, de besoin ou de normes sociales, mais plutôt sur celles liées à l'usage et à la capacité des produits à résister à l'usure.

La connaissance du consommateur, pour être instructive, doit donc porter sur ces questions d'usage et d'usure et permettre :

- d'identifier les paramètres d'utilisation d'un produit
 - pour quel usage est-il prévu ? Dans quelles conditions est-il utilisé ?
 - comment est-il utilisé (à quels types de contraintes est-il soumis) ?
 - comment et à quelle fréquence est-il entretenu ?
- de déterminer les facteurs d'usure
 - pour quelles raisons (matérielles) le produit est-il rebuté ?
 - dans quelle mesure ces raisons interviennent dans la décision de jeter ? Y-a-t' il des combinaisons de facteurs plus propice que d'autres ?
 - quel niveau d'usure devient critique ?

Nous savons que l'identification des facteurs d'usure est une étape particulièrement importante car, de leur connaissance et de leur exhaustivité dépend la pertinence de nos travaux. Saville [91] laisse entendre que le consommateur associe trop souvent la durée de vie d'un produit à sa résistance mécanique comme sa résistance à l'abrasion. Le porté mettant en jeu bien plus que cela et afin d'aider le consommateur, nous proposons une identification de certains de ces facteurs.

II.1.2. Identification des facteurs d'usure

Les vêtements sont assujettis à des contraintes de natures physiques et chimiques particulièrement nombreuses et variées et ce dès leur construction et jusqu'à l'usage au travers l'habillement, le porté et l'entretien. L'exposition à la lumière, à l'eau en passant par des contraintes mécaniques ou chimiques

diverses (frottements, traction, flexion, sueur, déodorant, parfum, détergent, etc.) [91] sont autant de facteurs d'altérations qui interviennent dans l'usure des produits.

De la résistance à ces contraintes dépend entre autre l'apparence des produits. Le vêtement étant un vecteur de communication, il transmet un message et à ce titre nous lui accordons une certaine importance. Son apparence est donc une cause notoire dans la décision de jeter [91]. Ainsi tous les éléments visuels qui s'y rapportent sont de potentielles causes de fin de vie. On recense par exemple la dégradation de la couleur (reconnue comme cause majeure de retour consommateur) ou encore les modifications de l'état de surface des produits (avec le boulochage et la déformation, les fils tirés, le pochage, l'usure de zone spécifique ou encore les trous [91]–[94]).

Malgré cela, une dégradation de l'apparence n'empêche pas nécessairement le porté. En revanche elle peut jouer sur les notions de bien aller et de confort, qualités importantes que l'on attend des produits [95] et une altération de ces qualités influera également sur la durée de vie.

Le confort est une notion subjective particulièrement complexe et répond à un besoin de bien-être. Il est généralement distingué par deux aspects : le confort thermo-physiologique et le confort sensoriel [95], [96], lesquels recensent à eux deux des problématiques de respirabilité, d'évacuation de la chaleur et de l'humidité ou encore du toucher ou de l'odeur [97]–[99].

Ainsi au vu de ces raisons, nous proposons de considérer au moins la liste des causes de fin de vie suivantes :

- dégradation de la couleur ;
- dégradation des éléments de personnalisation ;
- déformation ;
- apparition de trou(s) ;
- apparition de bouloches ;
- dégradation de la fonction du produit (imperméabilité, etc.) ;
- dégradation du toucher ;
- déchirure (ouverture) des coutures ;
- usure d'une zone spécifique (col, poignet, etc.) ;
- casse d'un accessoire ;
- augmentation du caractère électrostatique ;
- maintien des plis ;
- pochage ;
- persistance d'une odeur ;
- caractère inconfortable.

II.1.3. Enquête existante

Dans ces travaux, nous nous appuyerons sur une enquête menée par le Gemtex en 2012 dans le cadre du projet ACVTex¹ et qui investiguait ces questions d'usage et de fin de vie. Elle répond en grande partie aux besoins émis précédemment et recueille 901 réponses. Nous la présenterons avec ses résultats au chapitre suivant.

II.2. Méthode d'évaluation de la perception de l'usure par le consommateur

Les facteurs d'usure sont multiples et leurs contributions dans la décision de jeter n'est pas nécessairement équivalente. La recherche de leurs contributions (ou importances relatives) correspond à un problème de classement [100], [101], distingué par Bernard Roy, comme l'une des quatre problématiques de l'aide à la décision (avec le choix, le tri, le classement et la description) [102] à laquelle il est possible de répondre par l'aide multicritère à la décision [103], [104].

II.2.1. Choix de la méthode d'aide à la décision

Les méthodes d'aide multicritère à la décision se distinguent dans la littérature en deux catégories [105]–[108] : les méthodes multi-attributs (dites MADM, de l'anglais *Multi-Attribute Decision Making*) et les méthodes multi-objectifs (dites MODM pour *Multi-Objective Decision Making*).

L'approche multi-attributs se réfère à la prise de décisions dans un espace de décision discret et se concentre sur la façon de choisir ou de classer différentes alternatives connues. L'approche multi-objectifs évolue quant à elle dans un espace de décision continu et vise à identifier la meilleure alternative par rapport à des objectifs. Cette dernière est davantage associée aux applications de conception [107], [109].

Dans la mesure où notre problématique est de classer un nombre d'alternatives connues (les facteurs d'usure) par rapport à des critères chiffrés (les statistiques issus de l'enquête), nous pouvons déduire que l'approche MADM est la plus adaptée.

II.2.2. Principe des méthodes MADM

Comme dans les outils d'aide à la décision, les méthodes MADM mettent en jeu un *objectif*, des *alternatives* et des *critères* [108], [110]. Les *alternatives* désignent les potentielles solutions au

¹ACVtex : projet INTERREG IV 2007/12 : franco-wallon. N° 4.1.6

problème posé et les *critères* sont les dimensions du problème suivant lesquelles ces alternatives sont évaluées. Ils peuvent être pondérés et permettent d'évaluer l'adéquation d'une alternative par rapport à l'objectif [108].

Un problème décisionnel peut ainsi être représenté sous forme de matrice de décision résumant l'ensemble des évaluations des alternatives par rapport aux critères de décision [111]. Une telle matrice présente autant de lignes que d'alternatives et autant de colonnes que de critères.

En général les méthodes MADM dites classiques partent du principe que tous les critères et leurs poids respectifs peuvent être exprimés en valeurs précises et que par conséquent, un classement des alternatives peut en résulter sans risque. En réalité, une décision réelle implique des imprécisions, inhérentes au type de données ou liées au décideur, qui ne sont pas prises en compte par ce type de valeurs [107]. Par nature l'évaluation des sentiments et des jugements est vague et pour mieux les représenter l'utilisation de techniques dites floues est recommandée [107], [109], [112].

Parmi les méthodes existantes, nous avons choisi de travailler avec l'analyse multicritère hiérarchique (AHP pour *Analytic Hierarchy Process*), pour sa simplicité de mise en œuvre, parce qu'elle a montré son intérêt dans de multiples domaines [113], dont le textile [114], [115] et parce qu'elle permet de gérer des problèmes décisionnels non structurés ou semi-structurés en les décomposant en de multiples problèmes plus petits, plus facilement interprétables [116], [117]. Par ailleurs et parce l'AHP permet d'intégrer des techniques mathématiques avancées, nous avons choisi de l'utiliser dans sa version floue, dite Fuzzy AHP. En intégrant la théorie des ensembles flous elle permet en effet de mieux traduire des situations réelles et de prendre en compte le caractère incertain des évaluations humaines [112], [118].

II.2.3. Principe de l'analyse multicritère hiérarchique floue

II.2.3.1. Préambule sur l'analyse multicritère hiérarchique

L'AHP est une méthode développée par Saaty en 1980 qui, quand elle est associée à la théorie des ensembles flous a pour avantage de tenir un raisonnement proche de celui de l'être humain puisqu'elle consiste en la décomposition d'un problème complexe en de multiples problèmes plus petits et résolubles tout en tenant compte de l'imprécision et de l'incertitude des jugements [118]. Elle permet de calculer une note synthétique sur la base d'une hiérarchisation et d'une pondération de l'ensemble des critères entrant en compte dans une décision [119].

L'AHP se construit autour de trois étapes [117], [120] :

- la structuration du problème en une hiérarchie reflétant les interactions entre les éléments ;
- la comparaison par paire des éléments de la hiérarchie ;
- la déduction des mesures d'importance relative.

Elle met ainsi en jeu un *objectif* (niveau le plus haut de la hiérarchie), des *critères* et *sous-critères* (niveaux intermédiaires) et enfin des *alternatives* (niveau le plus bas de la hiérarchie) (Figure 11).

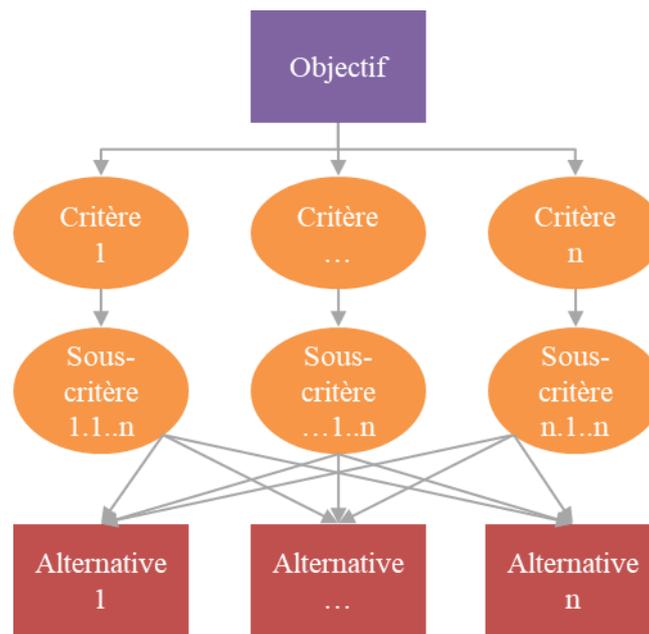


Figure 11 : Décomposition hiérarchie de l'AHP

Dans la version classique, la comparaison par paire est assistée par une échelle de comparaison de neuf degrés d'importance (numériques) [117], [121], qui est remplacée par une échelle linguistique dans la version floue [122].

Mathématiquement la retranscription d'une telle échelle linguistique repose sur la théorie des ensembles flous, initiée par Zadeh [123] et proposant entre autre les concepts de nombres flous. Ces nombres sont caractérisés par une fonction d'appartenance [123] qui peut être de type trapézoïdale, triangulaire ou encore gaussienne [124]. Les nombres flous triangulaires (NFT) sont les plus simples et semblent apporter satisfaction dans bons nombres de cas [118], [125], [126], c'est donc ceux sur lesquels nous baserons notre approche.

II.2.3.2. Les nombres flous triangulaires

Les nombres flous triangulaires sont caractérisés par une fonction d'appartenance $\mu_{M(x)}: R \rightarrow [0,1]$ [127], [128] où :

$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & x \in [l, m], \\ \frac{x-u}{m-u} & x \in [m, u], \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

Où $l \leq m \leq u$ et l, u représentent respectivement les valeurs minimum et maximum et m la valeur modale. Le nombre flou triangulaire associé à l'Eq. 1 peut ainsi s'écrire $M = (l, m, u)$ et se représente tel qu'illustré en Figure 12.

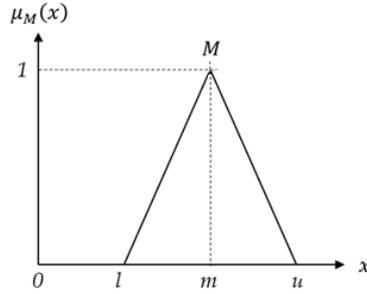


Figure 12 : Représentation du nombre triangulaire flou M

Pour M_1 et M_2 deux nombres flous triangulaires $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ et $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$, les opérations arithmétiques de base sont définies comme suit :

$$(l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \quad \text{Eq. 2}$$

$$(l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \quad \text{Eq. 3}$$

$$(\lambda, \lambda, \lambda) \otimes (l_1, m_1, u_1) = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda u_1), \lambda > 0, \lambda \in R \quad \text{Eq. 4}$$

$$(l_1, m_1, u_1)^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

II.2.3.3. Approche de Chang

L'ensemble des méthodes et alternatives de Fuzzy AHP proposé dans la littérature sont sensiblement équivalentes [107]. Ainsi nous avons choisi de travailler avec l'approche de Chang parce qu'elle est considérée comme la plus rapide à mettre en place [112], [120]. Elle introduit les nombres flous dans la comparaison par paire [128] et utilise la méthode d'analyse par extension pour déduire les mesures d'importance relative [120].

Nous avons utilisé l'échelle linguistique présentée en Table 4. Celle-ci introduit six degrés d'importance suffisant pour un recouvrement des valeurs, dans la mesure où nous n'avons pas besoin d'un raffinement plus précis, six degrés seront plus faciles à utiliser (car plus distincts) dans l'évaluation de jugements.

Echelle linguistique	NFT	NFT réciproque
Egal (E)	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Modérément plus important (MPI)	$(\frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2})$	$(\frac{2}{3}, 1, 2)$
Plus important (PI)	$(1, \frac{3}{2}, 2)$	$(\frac{1}{2}, \frac{2}{3}, 1)$
Fortement plus important (FPI)	$(\frac{3}{2}, 2, \frac{5}{2})$	$(\frac{2}{5}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3})$
Très fortement plus important (TFPI)	$(2, \frac{5}{2}, 3)$	$(\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{1}{2})$
Extrêmement plus important (EPI)	$(\frac{5}{2}, 3, \frac{7}{2})$	$(\frac{2}{7}, \frac{1}{3}, \frac{2}{5})$

Table 4 : Echelle linguistique [107]

La procédure de Fuzzy AHP est résumée en Figure 13 [129] et détaillée étape par étape ci-dessous [107], [118], [128] :

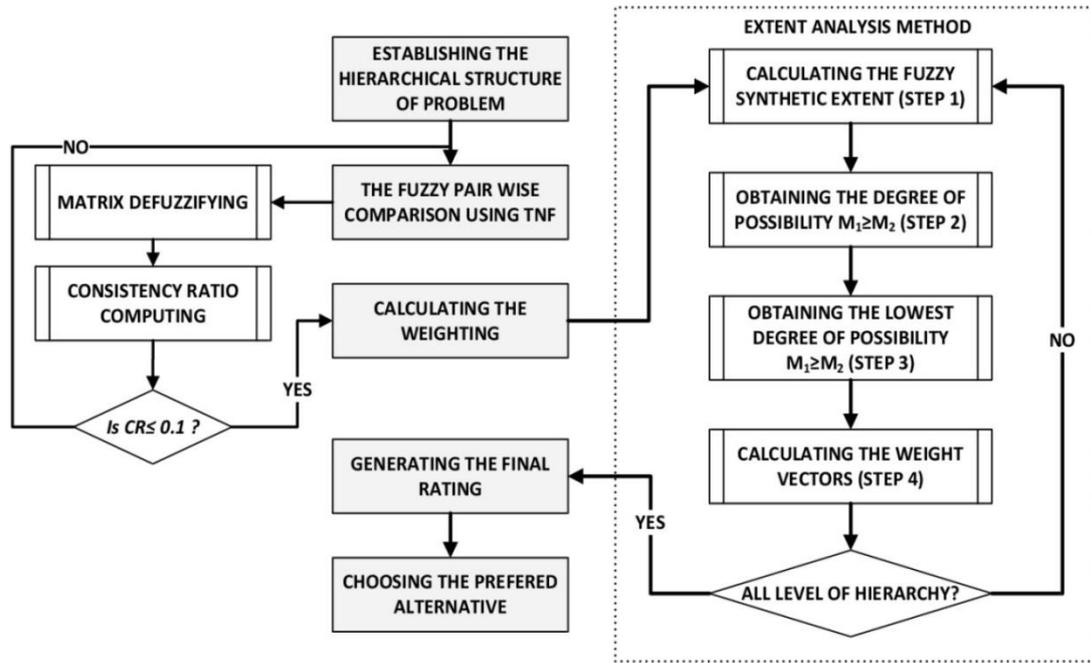


Figure 13 : Procédure de Fuzzy AHP [129]

Etape 1

Pour $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ et $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ formant respectivement un ensemble de n objets et de m critères, l'analyse débute en déterminant les matrices floues de priorité des critères et de préférences des alternatives (par rapport à chaque critère).

Cette étape implique l'utilisation de l'échelle linguistique et donc l'utilisation des nombres flous.

Etape 2

Construire la matrice floue de comparaison $\check{A}(a_{ij})$:

$$\check{A} = \begin{bmatrix} \check{1} & \cdots & \check{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \check{a}_{n1} & \cdots & \check{1} \end{bmatrix}$$

avec \check{a}_{ij} les nombres flous triangulaires.

Etape 3

Pour toutes les lignes i , réaliser la somme (R_i) :

Eq. 6

$$R_i = \sum_{j=1}^n \check{a}_{ij}$$

Etape 4

Réaliser ensuite la somme de la matrice (A) :

Eq. 7

$$A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \check{a}_{ij}$$

Etape 5

L'extension synthétique floue pour un critère i , noté S_i , est donné par :

Eq. 8

$$S_i = R_i * A^{-1}$$

Etape 6

Le poids du critère i , W_i est donné par le degré de possibilité pour que $S_i \geq S_k$, noté $V(S_i \geq S_k)$.

Eq. 9

$$W_i = \min V(S_i \geq S_k)$$

Et $V(S_i \geq S_k)$ est une fonction comparant les nombres triangulaires flous :

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1, & \text{si } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{si } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{sinon} \end{cases}$$

Etape 7

Normaliser les poids des critères, pour un critère i :

Eq. 10

$$W'_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Comme illustré en Figure 13, il convient de calculer le ratio de cohérence (CR) de la matrice issue de la comparaison par paire des critères afin de s'assurer qu'il ne soit pas supérieur à 0,10 [117]. Le CR est calculé par l'Eq. 11 [119].

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eq. 11}$$

Avec

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}, \text{ l'indice de cohérence}$$

λ_{max} , la valeur propre maximale de la matrice \check{A} défuzzifiée

n la taille de la matrice \check{A}

et RI , l'indice de cohérence aléatoire et dépendant de n [119].

Le CR est calculé sur une matrice non floue et nous proposons d'utiliser la méthode dite du *Graded Mean Integration Representation* (GMIR) pour la défuzzification dans la mesure où elle est rapide et précise [130]. Pour un nombre flou trapézoïdal $A = (l, m, n, u; w)$ défini par la fonction d'appartenance μ_A tel que :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L(x) = w \left(\frac{x-l}{m-l} \right)^k, & \text{si } l \leq x \leq m \\ w, & \text{si } m \leq x \leq n \\ R(x) = w \left(\frac{x-u}{n-u} \right)^k, & \text{si } n \leq x \leq u \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Où $w \in]0; 1]$ et l, m, n et u sont des nombres réels.

La valeur défuzzifiée de A est donnée par le GMIR de A , noté $P(A)$ et calculé par l'Eq. 12 [130].

$$P(A) = \int_0^w h(\lambda L^{-1}(h) + (1-\lambda)R^{-1}(h)) dh / \int_0^w h dh \quad \text{Eq. 12}$$

Soit :

$$P(A) = \lambda l + (1-\lambda)u + \frac{2k[\lambda(m-l) + (1-\lambda)(n-u)]}{2k+1}$$

Ainsi dans le cas particulier d'un nombre flou triangulaire caractérisé par une fonction d'appartenance d'ordre 1, $m = n$, $k = 1$ et on le note $X = (l, m, u ; w)^1$. Une valeur de $\lambda = 1/2$ est généralement choisie puisque n'apportant pas de biais à droite ou à gauche [130]. Dans ce cas $P(X)$ est donné par l'Eq. 13 :

$$P(X) = \frac{l + 4m + u}{6} \quad \text{Eq. 13}$$

Par ailleurs, pour minimiser le biais dû au jugement, il pourra être demandé à plusieurs experts de déterminer les matrices floues de priorité des critères et de préférences des alternatives. Si les experts sont considérés égaux, le consensus sera obtenu en utilisant la moyenne géométrique puisqu'appropriée à la combinaison de jugements [119], [131], [132].

Ainsi, pour $M_{ijk} = (l_{ijk}, m_{ijk}, u_{ijk})$, l'évaluation de l'expert k , le consensus $M_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ est donné par [133] :

$$l_{ij} = \min(M_{ijk}) \quad \text{Eq. 14}$$

$$m_{ij} = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n M_{ijk}} \quad \text{Eq. 15}$$

$$u_{ij} = \max(M_{ijk}) \quad \text{Eq. 16}$$

II.3. Contribution à l'évaluation d'un score de qualité

La durée normative telle qu'elle est définie est supposée être une unique valeur. Dans la mesure où les tests de qualité des textiles ne traduisent pas la qualité de manière globale mais plutôt des performances spécifiques, nous proposons un score unique de qualité fondé à la fois sur la perception du consommateur et sur la capacité des produits à résister à l'usure. Ce score appelé QOC, pour « Qualité Orientée Consommateur », s'approchera d'une qualité d'usage et permettra une meilleure estimation de la durée de vie des produits.

Dans la suite nous proposons la mise en place d'une procédure spécifique permettant de mesurer les performances des produits face aux divers facteurs d'usure identifiés (section II.1.2.). Il existe plus de 300 normes relatives aux textiles. L'enjeu est donc d'en proposer une sélection qui permette d'évaluer précisément les qualités des produits tout en considérant qu'elle doit refléter l'usage. Dans cette section, nous en proposons une sélection pour répondre aux principales causes d'usure évoquées

(section II.1.2.), en nous appuyant sur notre expertise textile, la littérature existante [91], [134]–[138] et l’intégration de l’usage.

II.3.1. Procédure de mesure des performances des produits

II.3.1.1. Tests de résistance à la dégradation de la couleur

La capacité d’un coloris à résister à divers facteurs d’altérations dépend de la nature du colorant, de la nuance, de sa profondeur et du procédé de teinture [94] et est évaluée au moyen de tests de solidités des coloris.

A elle seule cette thématique rassemble plus d’une centaine de normes sous la dénomination d’ISO 105. Elles distinguent les altérations liées à la fabrication de celles liées à l’usage. Souhaitant refléter l’usage nous nous concentrons sur les tests traduisant les contraintes de la vie quotidienne :

- à l’eau (NF EN ISO 105 – E01), à l’eau de mer (NF EN ISO 105 – E02), à l’eau chlorée (NF EN ISO 105 – E03) ;
- à la lumière du jour (NF EN ISO 105 – B01) ;
- à la sueur (NF EN ISO 105 – E04) ;
- au lavage (NF EN ISO 105 – C06) ;
- au repassage (NF EN ISO 105 – X11) ;
- aux frottements (NF EN ISO 105 – D02) ;
- aux intempéries (NF EN ISO 105 – B03).

Pour chacune d’entre elles, le principe est de soumettre une éprouvette au facteur d’altération mentionné puis d’évaluer la dégradation de la couleur à l’aide d’une échelle de gris (Figure 14), conforme à l’ISO 105-A02 et allant de 1 à 5, la valeur 5 correspondant à la meilleure note et traduisant « aucune dégradation ». Dans l’exemple (Figure 14), la couleur de gauche (noire) représente la couleur initiale de l’éprouvette.

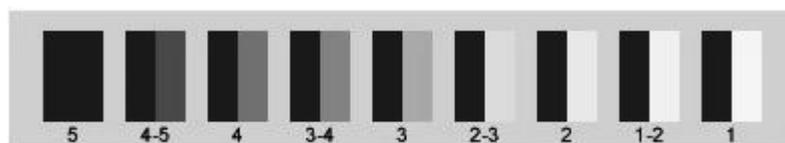


Figure 14 : Echelle de gris (source : <https://www.ultrac.com>)

II.3.1.2. Tests de résistance à la déformation

La résistance à la déformation est notamment mesurée par les essais de stabilité dimensionnelle et de vrillage.

La stabilité dimensionnelle est encadrée par la norme NF EN ISO 5077 et reflète la capacité d'une étoffe à reprendre ses dimensions initiales ou à résister à une variation de dimensions après lavage et séchage domestique. Les variations dimensionnelles agissent dans la longueur et la largeur des produits. Pour évaluer qu'un produit est stable un carré de dimensions connues est tracé sur le produit. A partir de nouvelles mesures après lavage(s), les variations dimensionnelles, en colonne et en rangée, sont calculées et exprimées en pourcentage.

Le vrillage est encadré par les normes ISO 16322 :1, 2 et 3 et correspond à une déformation du produit sous forme de spirale. Il est particulièrement visible au niveau des coutures de côtés qui se déplacent vers l'avant et l'arrière du produit. Il est également calculé en pourcentage à partir de mesure prise sur le carré précédemment tracé et déformé lors du lavage (Figure 15).

Le vrillage est calculé par l'Eq. 17.

$$V = \frac{d}{D} * 100$$

Eq. 17

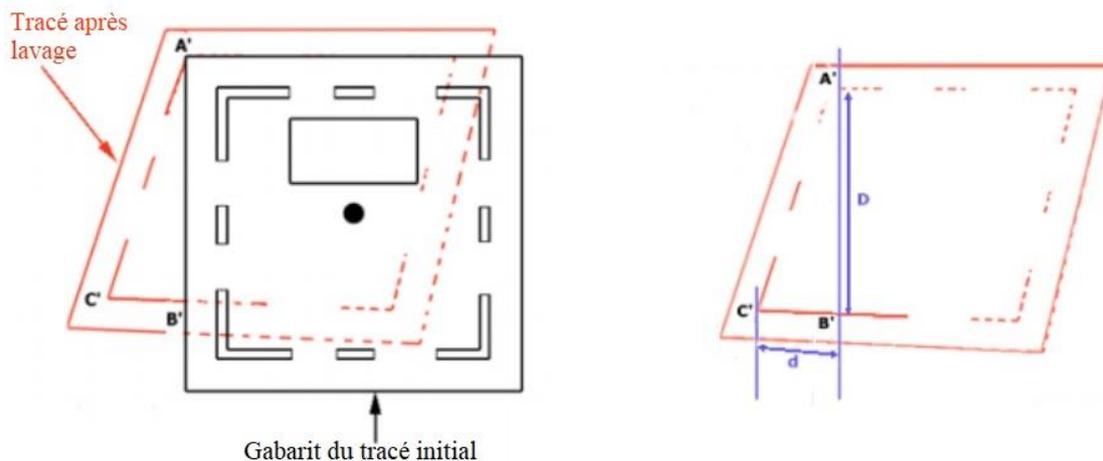


Figure 15 : Calcul du vrillage

D'autres types de tests peuvent encore être considérés avec par exemple l'évaluation de l'aspect après lavage (norme NF EN ISO 15487). Néanmoins il s'agit d'un test qui demande une mise en place plus contraignante et dont les résultats reposent sur les examens visuels de trois examinateurs.

Par ailleurs, dans d'autres secteurs que celui de l'habillement, la déformation est parfois investiguée au moyen de tests d'élasticité. Dans le cas d'étoffe, il existe la série de normes NF EN 14704 (1, 2 et 3), ce test consiste à soumettre une éprouvette à des tractions répétées en fixant une force ou une déformation maximale à atteindre. Bien que ce test puisse refléter l'usage, nous ne l'avons pas pris en compte, car il n'y a pas de référentiel sur les maxima à atteindre.

II.3.1.3. Tests de résistance des coutures

La résistance des coutures à la déchirure et au glissement est étudiée au moyen de tests de traction avec :

- la série de normes NF EN ISO 13935 (1 et 2) dans lesquelles la force maximale à la rupture est recherchée ;
- la série de normes NF EN ISO 13936-1, 2 et 3 relative aux glissements des fils de couture dans les tissus.

Dans le premier cas l'objectif des deux méthodes est de déterminer les forces maximales avant rupture (exprimée en newton (N)) d'éprouvettes présentant une couture centrale. Fixées dans les mâchoires d'un dispositif de traction, elles sont soumises à un allongement à vitesse constante jusqu'à obtenir la rupture.

Dans le second cas, les principes des méthodes diffèrent :

- dans la méthode de l'ouverture de couture fixe (NF EN ISO 13936-1), deux éprouvettes respectivement avec et sans couture, sont séparément soumises à un allongement via un dispositif de traction. Il en résulte deux courbes force/allongement. Une force exprimée en N, est déterminée par la distance entre les courbes pour un allongement donné (représentant une ouverture de couture spécifiée) ;
- dans la méthode de la charge fixe (NF EN ISO 13936-2), une bande d'étoffe pliée puis cousue dans sa largeur est soumise à une force (fixée par la norme en fonction du type de tissu) perpendiculairement à la couture, l'ampleur de l'ouverture de couture est mesurée en millimètres (mm) ;
- dans la méthode de la griffe (NF EN ISO 13936-3), deux éprouvettes sont mises en traction en étant respectivement maintenue par des mâchoires à griffe et des mâchoires classiques. La comparaison de leur courbes force/allongement à une force donnée correspond au glissement des fils et est exprimé en mm.

II.3.1.4. Tests de résistance à l'apparition d'un trou

La capacité d'un produit à résister à l'apparition d'un trou peut notamment être évaluée au moyen de deux tests :

- le test d'abrasion (NF EN ISO 12947-1, 2, 3 et 4) ;
- le test d'éclatement (NF EN ISO 13938-1 et 2).

Le test d'abrasion est réalisé sur appareil Martindale. Il est probablement le test le plus communément utilisé pour tester cette résistance, il consiste à soumettre une éprouvette à un frottement contre un élément abrasif normalisé jusqu'à l'apparition du premier trou. Le résultat s'exprime en nombre de cycles. Ce test requiert cependant un nombre de cycles élevé et combiné à une absence de visibilité de la zone de frottement, il est difficile de suivre précisément le moment d'apparition du trou.

Le test d'éclatement est réalisé sur éclatomètre par méthode pneumatique. Cette méthode a l'avantage de contraindre l'étoffe dans les trois dimensions et d'être particulièrement rapide. Le principe consiste à bloquer une étoffe sur une membrane élastomère via un anneau de serrage et à la déformer par le gonflement de la membrane mise sous pression. Il en résulte une résistance à l'éclatement exprimée en kiloPascal (kPa).

II.3.1.5. Tests de résistance au boulochage

Les bouloches sont formées lorsque les fibres en surface d'une étoffe s'agglomèrent [138]. L'évaluation de la résistance d'une étoffe au boulochage peut s'appuyer sur la série de normes NF EN ISO 12945 (1, 2 et 3), dont l'objectif est de déterminer la propension des étoffes au boulochage au moyen de frottements répétés. Les deux premières étant les plus communes, elles sont explicitées ci-dessous.

Dans la norme NF EN ISO 12945-1, des éprouvettes sont placées dans une boîte tapissée de liège dite boîte de boulochage (ou *pillling box*). L'appareil présente deux boîtes montées sur un axe rotatif. La mise en rotation implique un déplacement et des frottements aléatoires des éprouvettes entre elles et contre le liège.

Dans la norme NF EN ISO 12945-2, un appareil Martindale est utilisé et met en frottement l'étoffe contre elle-même dans un mouvement spécifique décrivant une courbe de Lissajous [51], [139].

Dans les deux cas, après un nombre de cycles fixé l'état des éprouvettes est évalué par inspection visuelle à l'aide de l'échelle en Figure 16, la valeur 5 correspond à « aucune dégradation ».

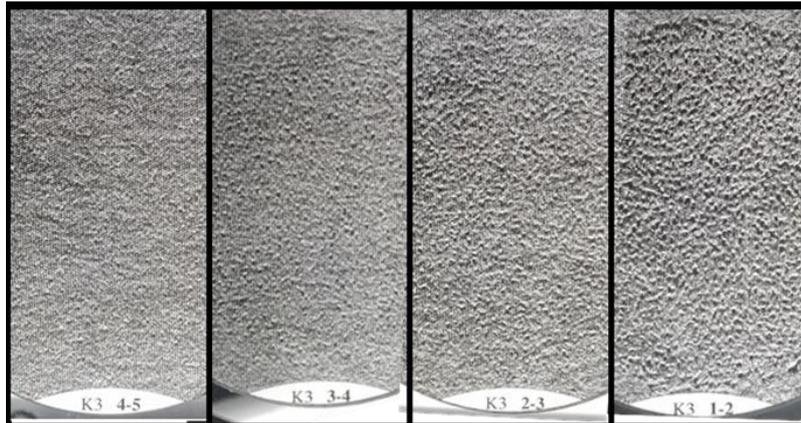


Figure 16 : Gradation du boulochage

Le lien entre les nombres de cycles sur ces appareils et l'usage n'étant pas établi, les résultats n'ont qu'une vocation comparative et ne peuvent équivaloir à un nombre d'utilisations ou de lavages, ils sont en revanche suffisamment élevés pour traduire une détérioration objective.

II.3.1.6. Tests de caractérisation du toucher

Il n'existe pas de tests directement liés à la notion du toucher. En revanche divers travaux de recherches [140]–[145] ont entrepris de le caractériser. En s'appuyant sur leurs résultats, nous pouvons considérer que le toucher se traduit mécaniquement par : la traction, la flexion, l'état de surface, le cisaillement, la compression, le poids et l'épaisseur.

Les approches adoptées dans ces recherches ont en commun d'utiliser le système Kawabata (KES-F). Il s'agit d'une chaîne de mesure de l'évaluation du toucher et de la qualité des étoffes. Elle est composée de plusieurs modules (KES-FB1, KES-FB2, KES-FB3, KES-FB4) spécifiques à chaque caractéristique mécanique et qui ont pour particularité d'imposer de faibles sollicitations [141], [146].

De cette chaîne d'évaluation, il résulte les paramètres suivants, sur lesquels nous pourrions nous appuyer pour évaluer une altération du toucher (Figure 17) :

Instrument	Propriété	symbole	Paramètre mesuré	unité
KES-FB1	Traction	EMT	Extension à 5 N/cm	%
		LT	Linéarité de la courbe traction-allongement	-
		WT	Energie d'extension pour 5N/cm	J/m ²
		RT	Résilience de traction	%
KES-FB	Cisaillement	G	Rigidité de cisaillement	gf/cm/deg
		2HG	Hystérésis de cisaillement à 0,5°	gf/cm
		2HG5	Hystérésis de cisaillement à 5°	gf/cm
KES-FB2	Flexion	B	Rigidité de flexion	gf/cm ² /cm
		2HB	Hystérésis de flexion	gf.cm/cm
KES-FB3	Compression	LC	Linéarité de compression	-
		WC	Energie de compression sous 5Kpa	gf.cm/cm
		RC	Résilience de compression	%
		EMC	compressibilité	-
KES-FB4	Frottement et rugosité	MIU	Coefficient de frottement palpeur/étouffe	-
		MMD	Moyenne quadratique de MIU	-
		SMD	Rugosité géométrique	Micron

Figure 17 : Paramètres mesurés par la chaîne Kawabata, extrait de [140], [141]

II.3.2. Méthode de calcul du score de qualité

Comme évoqué précédemment, les performances collectées sont spécifiques et ne traduisent pas la qualité de manière globale, ni ne tiennent compte du consommateur. A travers le score QOC, nous proposons d'agréger ces performances en fonction de la perception de l'usure par le consommateur.

II.3.2.1. Choix de la méthode d'agrégation des mesures de performance

Les méthodes d'agrégation de données appartiennent à trois grandes familles distinctes [120], [147] :

- les méthodes d'agrégation complète correspondant à l'approche du critère unique de synthèse ;
- les méthodes d'agrégation partielle correspondant à l'approche du surclassement de synthèse ;
- les méthodes d'agrégation locale.

Pour nous aider dans le choix d'une méthode en particulier, nous garderons en tête les recommandations d'Aenishaenslin et al. [148] sur les caractéristiques d'une bonne méthode :

- prendre en compte l'amplitude des écarts entre évaluations ;
- permettre une structure de préférences via des seuils d'indifférence, de préférence strictes et des zones de préférence faible ;
- éliminer les effets d'échelle ;

- construire un classement partiel et/ou complet ;
- rester suffisamment simple.

Les méthodes d'agrégation locale sont plutôt destinées à des problèmes de choix plutôt que de classement [147], elles sont par ailleurs complexes de par leur caractère itératif et progressif [147] qui ne correspond pas à nos attentes. Pour cette raison cette famille de méthodes ne sera pas considérée.

Les deux approches restantes, d'agrégation complète et d'agrégation partielle, consistent respectivement à agréger les performances d'un objet et à les comparer par paire en utilisant une relation de surclassement². A noter que dans ces méthodes les objets sont des individus étudiés, ici les produits textiles et sont dénommés *actions*. Leurs performances sont dénommées *critères*. Pour faciliter la lecture et uniformiser le rapport, les objets et les performances resteront respectivement sous les appellations d'*individus* et de *critères de performances*.

Les méthodes de l'approche du critère unique de synthèse (somme pondérée, OWA, Maximin, etc.) adoptent en général une logique dite totalement compensatoire [147], c'est-à-dire qu'une compensation des points forts/faibles est possible rendant parfois non fiable les conclusions. Par conséquent l'utilisation d'une technique partiellement compensatoire est recommandée [149]. Les méthodes de surclassement répondent à ce besoin et permettent par ailleurs une meilleure gestion de l'hétérogénéité des évaluations (diversité des échelles et des unités de mesures) [122].

Les méthodes de surclassement sont encore nombreuses, avec par exemple les procédures ELECTRE, PROMETHEE, MELCHIOR, ORESTE, etc [120]. Elles fonctionnent généralement en deux étapes [150] :

- détermination d'une relation de surclassement ;
- exploitation de cette relation dans un classement.

Parmi les procédures citées, deux se distinguent particulièrement avec ELECTRE et PROMETHEE [120], [122]. Elles se déclinent en de multiples versions à choisir en fonction du besoin (choix, rangement, tri) et des données connues du problème à traiter. Dans cet ensemble de méthodes, PROMETHEE II fait figure d'intermédiaire entre l'approche du critère de synthèse et de surclassement [120]. Elle permet en effet de construire un score global pour chaque individu et pour cette raison répond parfaitement à nos attentes.

² Définition de la relation de surclassement [9] :

On dit qu'une alternative a surclasse une alternative b et on note aSb si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que a est au moins aussi bonne que b et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire.

II.3.2.2. Principe de la méthode PROMETHEE II

Les méthodes PROMETHEE (*Preference Ranking Optimisation METHod for Enrichment Evaluation*) permettent la construction d'une relation de surclassement évaluée en utilisant une intensité de préférence [150].

La méthode PROMETHEE II se construit comme suit [120], [122], [150], [151] :

Étape 1: Evaluation des différences sur la base des comparaisons par paire

Eq. 18

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b)$$

Où $d_j(a, b)$ représente la différence entre les individus a et b sur le critère de performance j .

Étape 2: Application de la fonction de préférence

Eq. 19

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad j = 1, \dots, k$$

Où $P_j(a, b)$ représente la préférence de a sur b au regard de la différence $d_j(a, b)$. Il existe six fonctions préférences (*usual, V-shape, U-shape, level, linear, gaussian*) à choisir suivant la nature des données du critère (quantitative, qualitative).

Étape 3: Calcul de l'intensité de préférence multicritère

Eq. 20

$$\forall a, b \in A, \quad \pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b)w_j$$

Où $\pi(a, b)$ est la somme pondérée avec w_j le poids du critère de performances j . On fera en sorte d'utiliser la perception du consommateur comme poids des critères.

Étape 4: Calcul des flux de surclassement

Eq. 21

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

&

Eq. 22

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

Avec $\varphi^+(a)$ et $\varphi^-(a)$ les flux respectivement positif (exprimant une force de a) et

négatif (exprimant une faiblesse de a), permettant l'obtention de deux préordres.

Etape 5: Calcul du flux net de surclassement

Eq. 23

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

A l'issue de cette méthode, il résulte un classement des individus suivant leur flux net de surclassement. Cette valeur est comprise entre -1 et 1 et représentera notre score QOC.

II.4. Contribution à l'identification des leviers d'allongement de la durée de vie

Pour mettre en évidence les leviers d'allongement de la durée de vie, le score QOC est combiné aux caractéristiques des produits. Celles-ci sont obtenues par approche de rétro-ingénierie dans une procédure spécifiquement mise en place pour répondre à nos besoins. Elle permet notamment d'identifier les caractéristiques physiques des produits ainsi que certains paramètres de fabrication.

II.4.1. Approche de rétro-ingénierie

La rétro-ingénierie consiste à extraire des informations d'un objet sans en connaître les détails techniques [152] et vise à déterminer son fonctionnement et sa méthode de fabrication. Cette approche est particulièrement utile pour reproduire une pièce sans documentation technique, comme outil de contrôle qualité ou encore pour identifier les forces et faiblesses d'un produit [152]. Il existe des approches de rétro-ingénierie variées s'intéressant parfois aux matériaux, à leurs géométries ou à leurs conceptions [153]. La littérature sur le sujet est d'ailleurs assez riche, notamment quand des techniques assistées par ordinateur sont employées. En revanche il n'existe que peu d'approches menées sur les textiles d'habillement. Par conséquent, nous avons développé une approche multi échelle (Table 5), du produit fini au fil en s'appuyant sur les normes relatives aux textiles.

Information collectée	Unité	Méthode
<i>Produit fini (quel que soit le produit)</i>		
Composition	%	FD CEN ISO/TR 11827
Procédé de fabrication	-	
Epaisseur	mm	NF EN ISO 5084
Masse surfacique	g/m ²	NF EN 12127
<i>Produit tricoté</i>		
Liage	-	Observation
Jauge	aiguille/pouce	Calculée à partir de [154]
Densité de mailles en colonne	colonnes/pouce	
Densité de mailles en rangée	rangées/pouce	NF EN 14971
Densité de mailles	mailles/pouce ²	
Longueur de fil absorbée (LFA)	cm/maille	NF EN 14970
<i>Produit tissé</i>		
Armure		
Densité des fils de chaîne	Fil/pouce	NF EN 1049-2
Densité des fils de trame	Fil/pouce	
Embuvage	%	NF ISO 7211-3
Retrait	%	NF ISO 7211-3
<i>Couture</i>		
Type	-	
Nombre de fils	-	NF ISO 4915
Densité	points/ pouce	
<i>Fil</i>		
Procédé de fabrication	-	
Nombre de bouts	-	
Titre (masse linéique)	Nm	NF EN 14970
Taux de torsion	tr/m	NF G 07-079
Ténacité	cN/Tex	NF EN ISO 2062
<i>Fibre</i>		
Longueur et distribution de longueur		NF ISO 6989
Force à la rupture		NF EN ISO 5079
Elasticité		NF EN 15930

Table 5 : Paramètres et méthodes considérés pour notre approche de rétro-ingénierie

Les paramètres de fabrication étant nombreux, la liste des variables à considérer est importante et idéalement, un partenariat avec les fabricants et une transparence à toutes les étapes est souhaitable.

Nous avons fait le choix ici de proposer une liste restreinte d'attributs directement mesurables sur le produit et qui minimise le nombre d'hypothèses. Pour davantage de précision sur les paramètres de fabrication il est envisageable d'utiliser certains modèles, comme dans le cas de la jauge, mais ils sont parfois spécifiques à une matière voire à un procédé et leur généralisation n'est pas établie.

II.4.2. Méthode d'identification des contributeurs qualité

L'identification des facteurs agissant sur la qualité correspond à une recherche de relation entre le score QOC et les caractéristiques des produits obtenues par rétro-ingénierie (section II.3.2.). Ces données sont propres à chaque binôme produit/caractéristiques (*individus/variables*).

Cette recherche de relations consiste en une observation simultanée de variables et nécessite, pour un ensemble de données important, l'utilisation de techniques statistiques [154].

II.4.2.1. Choix de la méthode d'identification

Parce qu'elle offre des méthodes de description par exploration simultanée et qu'elle permet d'identifier une structure dans un jeu de données, la statistique exploratoire multivariée est un outil à même de répondre à notre besoin [155]. Elle propose deux grandes familles de méthodes [155], [156] :

- Les méthodes factorielles ayant pour objectif de synthétiser l'information en réduisant le nombre de dimensions d'un ensemble de données ;
- Les méthodes de classification dont l'objectif est de créer des classes d'objets.

Face à une problématique d'identification de relations, les méthodes factorielles sont adaptées [157]. Elles consistent en la recherche de *facteurs* résumant au mieux les données considérées.

Le choix d'une méthode est conditionné par le type de données à analyser (qualitatives et/ou quantitatives). Elles se déduisent notamment de l'analyse en composantes principales (ACP) [155], une méthode permettant l'observation de données quantitatives. On distingue encore l'analyse factorielle discriminante ou l'analyse factorielle de correspondance qui intègrent des données qualitatives [155].

Dans notre cas, ayant prévu d'analyser un jeu de données quantitatif l'ACP est la méthode la plus appropriée. Par ce moyen nous ne pouvons en revanche qu'observer les relations considérées comme linéaires.

II.4.2.2. Principe de l'analyse en composantes principales

A partir d'un tableau de données contenant les valeurs de n individus sur p variables, l'ACP propose de synthétiser l'information en la retranscrivant graphiquement dans un espace de dimension réduite tout en la déformant le moins possible [154], [155], [158]. Elle permet de voir s'il existe une structure, à priori non évidente, dans l'ensemble des données.

Dans ces représentations graphiques les individus et les variables sont respectivement représentés par des points et des vecteurs. L'espace est formé par les facteurs (ou composantes principales) et est obtenu suite à l'analyse de la dispersion des données [159].

L'ACP s'applique à des données qui présentent une relation d'ordre, à priori corrélées entre elles [159], et centrées-réduites [154], [160].

Les composantes sont déterminées comme des combinaisons linéaires des variables initiales et doivent maximiser la dispersion (la variance) des observations [154], [161]. Ainsi la première composante décrit la plus grande quantité de la variance du jeu de données, puis la seconde composante, par définition orthogonale à la première, explique le maximum de variance de la partie résiduelle et ainsi de suite. Elles sont non corrélées entre elles [154], [162].

Trois représentations graphiques sont possibles [160] :

- le graphique des individus permettant de représenter la ressemblance entre les individus, c'est-à-dire leur proximité sur l'ensemble des variables ;
- le graphique des variables permettant de représenter leurs éventuelles corrélations ;
- le « biplot » projetant simultanément individus et variables.

A partir de ces représentations et après une interprétation des facteurs, les relations entre les variables pourront être identifiées. Elles mettront en évidence les relations existantes entre les caractéristiques des produits et leurs scores QOC.

II.5. Méthode de vérification de la pertinence du score QOC

Les tests de qualité réalisés en laboratoire ont pour vocation de traduire la capacité des produits à résister aux contraintes de l'usage mais comme le précise Saville [91] : cela repose sur l'hypothèse qu'il existe effectivement une relation entre eux. Pour vérifier l'existence d'une telle relation, un vieillissement réel des produits est nécessaire et il semble naturel d'envisager des essais au porté. Ce type d'essai a l'avantage de contraindre le produit tel qu'il le serait lors d'une utilisation normale mais reste particulièrement difficile à suivre et à encadrer. L'implication des participants, leurs motivations,

leurs capacités à rapporter leurs observations objectivement, leurs habitudes, leurs environnements sont autant de paramètres [91] qui interviennent dans le vieillissement des produits mais qui sont difficiles à contrôler.

Par soucis de simplicité et de répétabilité, nous proposons donc de concentrer le vieillissement des produits sur une procédure d'entretien conforme aux habitudes d'usage des consommateurs. Elle sera suivie de sessions régulières d'enquêtes impliquant des consommateurs et qui auront pour objectif d'évaluer si un produit est encore utilisable ou non.

II.5.1.1. Procédure d'entretien

Une procédure d'entretien doit préciser les éléments suivants :

- le mode de lavage
 - le programme avec sa température et sa durée ;
 - la charge maximale de linge acceptable ;
 - la vitesse d'essorage ;
- le mode de séchage
 - à l'air libre (sur étendoir ou à plat) ;
 - en machine (avec le programme, sa température et sa durée) ;
- le mode de repassage
 - la température et le temps de repassage ;
 - la pression exercée sur le produit.

Par ailleurs, pour des questions d'uniformité des lavages il convient également de fixer les éléments suivants :

- la qualité de l'eau ;
- la lessive et la manière de la doser ;
- le poids de chaque lot lavé.

II.5.1.2. Mise en place de l'enquête consommateur

Suite au vieillissement des produits, la durée de vie pourra être établie en se basant sur les résultats de l'enquête que nous développons ci-dessous. Il s'agit de faire intervenir un panel de consommateurs non entraînés auxquels nous demandons si :

« Au vu de l'état d'usure du produit, continueriez-vous à le porter ? ».

Le champ libre est laissé aux personnes dans l'analyse des produits et trois possibilités de réponses sont acceptées :

- (a) Je le garde pour un usage normal ;
- (b) Je le garde mais pour un usage dégradé (bricolage, jardinage, etc.) ;
- (c) Je ne le garde pas.

Le nombre et la fréquence de tenue des sessions d'enquête est au choix du chef de projet et dépend du produit considéré. Une plus grande précision nécessite un nombre de sessions en conséquence, mais nécessite également un temps conséquent. Nous préconisons simplement un espacement suffisant des sessions pour éviter un effet mémoire trop important. Une attention particulière doit également être portée au panel, pour qu'à minima un noyau commun soit présent à toutes les sessions et permette une cohérence et une continuité dans les résultats. Il faut également veiller à ce que les réponses des sondés soient bien basées sur leur perception de l'usure et qu'elles ne tiennent pas compte de leurs préférences.

A l'issue de ces sessions d'enquête, des statistiques sur le nombre de personnes considérant qu'un produit a atteint ou non sa fin de vie pourront être établies et permettront de classer les produits. Un classement consensus traduisant l'ordre des produits par durée de vie sera donné en agrégeant les classements issus des sessions d'enquête et permettra, associé aux statistiques, d'évaluer la durée de vie des produits. Un tel classement pourra être obtenu par l'agrégation de classement [163].

II.5.1.3. Principe et choix de la méthode d'agrégation de classements

L'agrégation de classements propose un grand nombre de méthodes, dont certaines sont relativement récentes. Pour cette raison nous nous sommes appuyés sur la classification de Li et al. [164], proposée en 2019 (Figure 18), dans le choix d'une méthode.

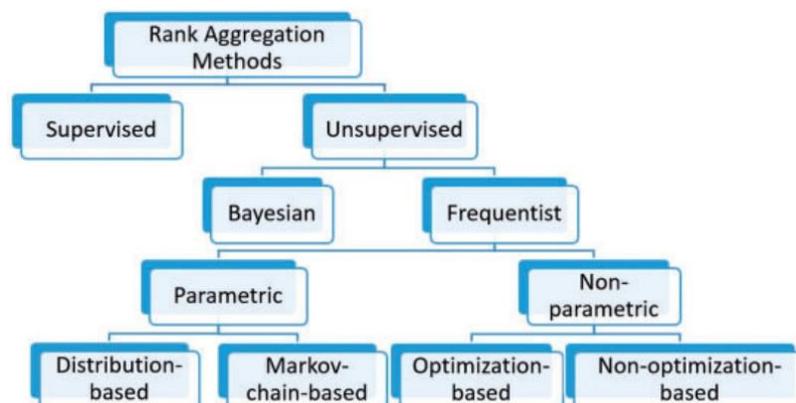


Figure 18 : Classification des méthodes d'agrégation de classements [164]

Nous nous sommes dirigés vers les méthodes non supervisées non paramétrique dans la mesure où nous ne sommes pas dans une optique prédictive et que par ailleurs nos données initiales ne traduisent aucun modèle [164]. Souhaitant obtenir un classement qualifié de consensus, c'est-à-dire qui minimise l'écart avec les classements dont il est issu [165], nous avons opté pour une méthode par optimisation [164]. Le principe de cette classe de méthodes repose sur la minimisation d'une mesure de dissimilarité, laquelle est évaluée en observant les désaccords de position qu'ont les éléments deux à deux. La littérature recense un grand nombre de mesures dont les distances de Spearman et de Kendall τ , les deux les plus populaires [165]–[167].

II.6. Choix de la méthodologie ACV pour l'évaluation environnementale des produits

Une fois les durées de vies établies, elles seront intégrées dans l'évaluation environnementale des produits.

Bien qu'il existe une multitude d'outils d'évaluation environnementale qu'on distingue suivant leur caractère qualitatif ou quantitatif, l'analyse de cycle de vie (ACV) reste la plus reconnue [168], [169]. En tant que méthode quantitative elle bénéficie d'une validité scientifique forte et elle est par ailleurs la seule à avoir fait l'objet de travaux de normalisation à l'échelle internationale (ISO 14040 et ISO 14044). Pour ces raisons, elle est l'outil que nous avons choisi dans la réalisation de nos évaluations.

II.6.1. Principe

D'après l'ISO 14040, l'ACV repose sur :

- la compilation d'un inventaire des entrants et sortants associés à un système de produit ;
- l'évaluation des impacts potentiels associés à cet inventaire ;
- l'interprétation des résultats

Elle se structure en quatre étapes (Figure 19) [170] :

- la définition des objectifs et du champ de l'étude, visant à définir la question posée et le produit ou procédé étudié et dénommé système ;
- l'inventaire de cycle de vie (ICV), c'est-à-dire le recueil des données nécessaires à l'étude ;
- l'évaluation de l'impact visant à traduire les données de l'inventaire en un nombre restreint d'indicateurs d'impacts ;
- l'interprétation dont l'ambition est de formuler les conclusions et recommandations de l'étude.

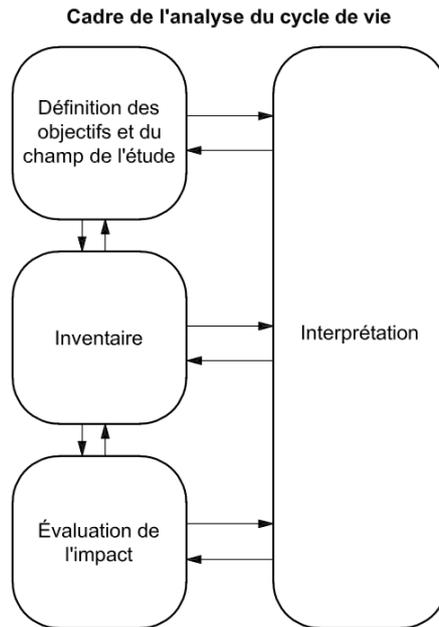


Figure 19 : Représentation des quatre phases d'une ACV [170]

II.6.1.1. Etape 1 : définition des objectifs et champ de l'étude

En vue de garantir la pertinence des conclusions d'une étude d'ACV, l'étape 1 vise à en expliciter les objectifs et l'application envisagée. Elle permet de poser le problème, les objectifs et le champ de l'étude.

Elle repose par ailleurs sur la définition d'une unité fonctionnelle (UF) qui quantifie la fonction rendue par un produit ou un service (dit système). Celle-ci apporte un cadre pour comparer des produits entre eux.

A titre d'exemple dans le cas des textiles d'habillements, une proposition d'UF pour un T-shirt serait : « *porter un T-shirt propre et en bon état pendant 1an* ». Il y a une nécessité à bien déterminer la fonction principale des produits ou un niveau de détail suffisant de l'UF pour éviter les comparaisons non fondées. Boufateh [171] présente par exemple deux blousons, l'un d'hiver et l'autre de pompier, dont les fonctions sont respectivement de protéger contre le froid et le feu et qui par conséquent ne peuvent être comparés. Il faut cependant veiller à ne pas tendre vers une non comparabilité généralisée des produits en proposant par exemple des classes de produits comparables entre eux.

Combinés, l'UF et le système permette le calcul du flux de référence, c'est-à-dire la quantité de produit pour répondre à l'UF.

Pour reprendre l'exemple du T-shirt cité ci-dessus, deux T-shirts l'un ayant une durée de vie de six mois et l'autre de deux ans, auront des flux de références respectifs de 2 et $\frac{1}{2}$, traduisant qu'il faut deux T-shirts d'une durée de vie de six mois pour atteindre l'UF et $\frac{1}{2}$ T-shirt d'une durée de vie de deux ans.

Connaissant les objectifs, le système et l'UF, les frontières du système doivent être déterminées afin de modéliser les processus (élémentaires) à prendre en compte dans l'étude. Par processus on entend ici les étapes du cycle de vie dont font partie les procédés de fabrication, les transports, l'utilisation, la fin de vie etc.

II.6.1.2. Etape 2 : inventaire du cycle de vie

Cette deuxième étape consiste en le recueil des données nécessaires à l'étude. Il s'agit de quantifier tous les flux économiques et élémentaires en vue du calcul des indicateurs d'impacts. On distingue les flux de matières des flux d'énergies entrant dans le système et les flux sortants correspondant aux déchets et aux diverses émissions (eau, air, sol).

L'ICV met en jeu une grande quantité de données, provenant parfois de la littérature ou du terrain et l'un des enjeux réside dans leur qualité.

La qualité des données peut être évaluée de manière qualitative et quantitative. La première méthode consiste en l'évaluation des données sur certains paramètres, cités ci-après, alors que dans la méthode quantitative il s'agit de calculer leur incertitude.

Dans la méthode qualitative, il est question de vérifier la qualité des données sur une échelle de 1 à 5 (1 étant la meilleure évaluation) par rapport aux paramètres suivants (Figure 20) [172] :

- la fiabilité ;
- l'exhaustivité ;
- la représentativité géographique (couverture géographique par rapport aux objectifs de l'étude) ;
- la représentativité temporelle (ancienneté des données) ;
- la représentativité technologique (face à la rapidité d'évolution des technologies) ;
- la taille de l'échantillon.

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

Figure 20 : Matrice d'évaluation de la qualité des données [171]

Dans la méthode quantitative un facteur d'incertitude (Figure 21) est attribué à chacun des scores de cette matrice et permet le calcul d'un intervalle de confiance à 95% :

$$SD\ 95 = e^{\sqrt{([\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2)}}$$

Avec

- U1 : le facteur d'incertitudes sur la fiabilité ;
- U2 : le facteur d'incertitudes sur l'exhaustivité ;
- U3 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation temporelle ;
- U4 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation géographique ;
- U5 : le facteur d'incertitudes sur la corrélation technologique ;
- U6 : le facteur d'incertitudes sur la taille de l'échantillon.

Plus la valeur obtenue est importante, plus la fiabilité de la donnée devient faible et les incertitudes de l'étude utilisant cette donnée augmentent.

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

Figure 21 : Matrice pedigree (base ecoinvent) pour l'estimation de la qualité des données [173]

II.6.1.3. Etape 3 : évaluation des impacts de cycle de vie

L'enjeu de cette troisième étape est l'association des flux élémentaires recueillis à des impacts environnementaux (Figure 22). Les flux sont transformés en catégories d'impact intermédiaires (dit *midpoints* et qui quantifient une pression sur l'environnement) à l'aide de facteurs de caractérisation. Ces facteurs caractérisent la contribution d'un flux à un impact donné et leurs valeurs sont données par des méthodes de calcul. Dans un deuxième temps, les impacts *midpoints* peuvent également être pondérés pour obtenir les dommages (les impacts *endpoints*).

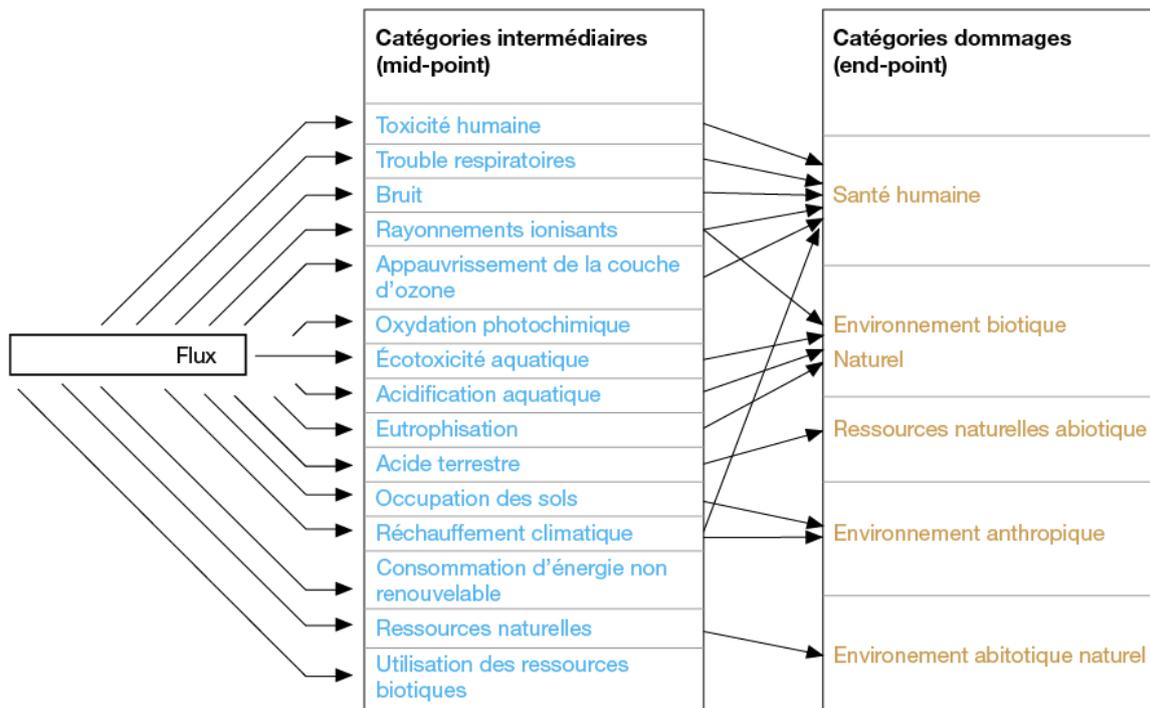


Figure 22 : Cadre général d'évaluation des impacts [174]

Les impacts *midpoints* sont nombreux et diffèrent selon les méthodes de calcul mais les plus courants sont : l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone, l'oxydation photochimique, la toxicité, l'acidification de l'air, l'eutrophisation de l'eau, etc. Plus en amont dans la chaîne de causalité, ils sont plus précis et favorisés sur le plan scientifique.

Les méthodes de calcul sont nombreuses, on distingue par exemple la méthode CML, Impact 2002+, les méthodes ReCiPe, USEtox, ILCD, etc. [175]. Utilisant des modèles différents les conclusions d'une étude peuvent différer suivant l'usage d'une méthode plutôt qu'une autre. Le choix doit être supporté par les objectifs de l'étude, sachant que l'utilisation d'au moins deux méthodes différentes est recommandée dans l'ISO.

La caractérisation, c'est-à-dire le calcul des résultats par indicateur d'impact est donnée par :

$$I_i = \sum F_{i,n} * m_n$$

Où I_i est l'indicateur d'impact i , $F_{i,n}$ le facteur de caractérisation associé au flux n pour l'indicateur d'impact i et m les quantités d'intrants (en kg, kWh, m³, suivant la nature de l'intrant).

II.6.1.4. Etape 4 : interprétation

Finalement, l'étape 4 vise à déduire de l'analyse des conclusions fiables et des recommandations permettant, par exemple, d'obtenir des améliorations et ce de manière cohérente par rapport aux objectifs fixés dans l'étape 1.

Pour cela l'interprétation doit comporter quatre étapes : l'évaluation de la fiabilité de l'étude, la mise en évidence de points névralgiques, l'estimation de l'incertitude et les conclusions et recommandations.

Ainsi des outils tels que les contrôles d'exhaustivité, de sensibilité et de cohérence permettent de mettre en évidence une imperfection de l'évaluation et peuvent être mis à profit pour de futures améliorations.

II.6.1.5. Logiciel et bases de données de l'ACV

L'ACV est facilitée par l'utilisation de logiciels intégrant les méthodes de caractérisation ainsi que des bases de données. Plus d'une vingtaine de logiciels ont été dénombré par la plateforme [avniR] (plateforme d'expertise sur l'intégration de l'ACV dans les démarches de développement des acteurs économiques [176]), certains sont spécifiques à un secteur d'activité, EIME pour le textile par exemple et d'autres sont dits experts tel que Simapro, Gabi ou Open LCA.

Nous avons fait le choix de travailler avec le logiciel Simapro, il est l'un des plus utilisé dans le monde, tant par les industriels que par la communauté scientifique [175] et offre de plus grandes possibilités de modélisation par rapport aux logiciels sectoriels actuels.

Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différentes données et méthodes de traitement dont nous avons besoin dans notre méthodologie (section I.6.). Celles-ci sont résumées ci-après en Table 6.

Nous nous sommes intéressés au consommateur, à ses habitudes d'usage et aux causes potentielles de fin de vie des produits. Guidé par la définition de la durée normative (durée de vie moyenne mesurée dans des conditions de tests), nous nous sommes concentrés sur les facteurs d'usure matérielle. Nous proposons ensuite d'interpréter ces données issues d'enquête consommateur en utilisant la méthode de Fuzzy AHP par l'approche de Chang. Elle permettra de déterminer l'importance de chacune des causes dans la décision de jeter pour former la perception de l'usure par le consommateur.

La connaissance de ces facteurs d'usure a par ailleurs permis de proposer une procédure métrologique, basée sur des tests normés, en vue de mesurer la capacité des produits à résister à l'usure. Chaque test permet d'établir une performance spécifique des produits par rapport à un facteur d'usure, ainsi pour émettre un score unique de qualité (dit score QOC pour qualité orientée consommateur), nous proposons de combiner la perception de l'usure par le consommateur et les performances des produits. Cette combinaison rendue possible par la méthode PROMETHEE II permettra de présager de la durée de vie des produits. Le choix de la méthode PROMETHEE II a été guidé par sa possibilité de fournir un score unique et par son aspect non compensatoire qui permet de ne pas masquer les faiblesses des produits.

Afin de mettre en évidence les contributeurs de la qualité et donc d'identifier les leviers d'allongement de la durée de vie, nous proposons de collecter les caractéristiques des produits et de les combiner au score QOC dans une analyse ACP. Pour cela, nous avons proposé une approche de rétro-ingénierie spécifique.

Enfin, pour répondre à la question de l'adéquation du score QOC par rapport à la durée de vie réelle des produits, nous proposons une procédure de vieillissement réel, basée sur des lavages répétés. Une telle procédure traduira les habitudes d'usage des consommateurs et ne tiendra pas compte du porté pour faciliter le suivi et la continuité du vieillissement. A intervalle régulier, un panel de consommateurs non entraînés sera impliqué dans une enquête avec l'objectif de déterminer l'usure des produits. Leurs jugements combinés à une agrégation de classement permettront d'établir le classement des produits par durée de vie, ainsi que la valeur de cette durée.

Dans le chapitre suivant, nous proposons de mettre en œuvre la méthodologie présentée sur un type de produits spécifique : le T-shirt. C'est un produit qui bénéficie effectivement de cadres méthodologiques (aux échelles nationales et européennes [79], [84]) sur lesquels nous pouvons nous appuyer pour mieux encadrer notre démarche.

Donnée	Qualitative	Quantitative	Objectif
<i>Consommateurs</i>			
Usage (habitudes d'entretien)	✓		Mise en place d'une procédure de lavage
Fin de vie (causes de fin de vie, facteurs d'usure)	✓		Evaluation de la perception du consommateur par rapport aux facteurs d'usure Méthode : Fuzzy AHP
<i>Produits</i>			
Performances			
Dégradation couleur		✓	
Déformation		✓	
Résistance des coutures		✓	Evaluation du score unique de qualité
Résistance à l'apparition de trou(s)		✓	Méthode : PROMETHEE II
Résistance au boulochage		✓	
Altération du toucher		✓	
Autres		✓	
Structure et fabrication			
Composition	✓		Identification des contributeurs de qualité et donc des leviers d'allongement de la durée de vie
Données relatives au fil	✓	✓	
Données relatives à l'étoffe	✓	✓	Méthode : ACP
Durée de vie effective	✓	✓	Adéquation du score QOC

Table 6 : Données mises en jeu

Chapitre III Mise en œuvre : application au cas du T-shirt

Dans ce chapitre nous mettons en œuvre la méthodologie proposée au cas du T-shirt. Ainsi nous commencerons par introduire la population des T-shirts étudiés (section III.1.) avant de décrire l'enquête consommateur sur laquelle nous nous sommes appuyés et qui porte à la fois sur les habitudes d'usage et de fin de vie des textiles (section III.2.). Comme évoqué au chapitre précédent (section II.2.), nous exploiterons ses résultats au moyen de la méthode de Fuzzy AHP afin de quantifier la perception de l'usure par le consommateur, c'est-à-dire les contributions de chaque facteur d'usure dans la décision de mise au rebut des T-shirts (section III.3.). Nous décrirons ensuite la procédure de tests que nous avons menée pour collecter les performances des T-shirts et discuterons des résultats obtenus avant de les combiner à la perception du consommateur dans la méthode PROMETHEE II pour l'évaluation du score QOC (section III.4.). Au moyen de l'ACP et suite à la rétro-ingénierie des T-shirts nous mettrons en évidence les paramètres influents sur le score QOC (section III.5.), autant de paramètres qui nous aideront à identifier les leviers d'allongement de la durée de vie. Enfin, avant de conclure ce chapitre, nous présenterons les résultats de la procédure de vieillissement qui nous a notamment permis d'évaluer la durée de vie réelle (en nombre de lavages) des T-shirts (section III.6.). Nous vérifierons ainsi dans quelle mesure le score QOC est adéquat en tant qu'indice de durée normative.

III.1. Description des T-shirts

Les T-shirts analysés dans ces travaux ont été approvisionnés auprès de fabricants, distributeurs spécialisés et importateurs, nationaux et internationaux, avec qui nous n'avons pas de partenariats. Ils montrent un échantillon de ce qui était disponible sur le marché en 2018, année de leur approvisionnement.

Nous avons choisi des produits de grandes tailles (XXL) en favorisant les couleurs foncées, une coupe droite et un minimum de fantaisie. De cette manière nous disposons d'une surface d'étoffe suffisante pour nos procédures de qualité et de rétro-ingénierie et nous facilitons les comparaisons entre les produits.

Finalement, nous avons analysé 29 références de T-shirt, de confection variées et affichant des prix de vente allant de 2 à 45€. La répartition de ces produits par matière et par couleur est donnée en Table 7.

La très grande majorité des T-shirts (25 sur 29) entre dans la catégorie des vêtements décontractés, les quatre derniers, en polyester, étant plutôt destinés à la pratique sportive.

Composition	Nombre de références	Proportion (%)
Coton (100%)	17	58,6
Polyester (100%)	6	20,8
Lin (100%)	3	10,3
Mélange	3	10,3

<i>Couleur</i>		
Noir	13	44,8
Bleu foncé	7	24,1
Gris	5	17,3
Beige	1	3,5
Blanc	3	10,3

Table 7 : Répartition des T-shirts par matières et couleurs

A chaque fois, trois exemplaires étaient nécessaires : un témoin, un exemplaire pour les procédures de de qualité et de rétro-ingénierie et un exemplaire pour la procédure de vieillissement par lavage répété.

Dans la suite les T-shirts seront identifiés par un code au format TSx (x variant de 1 à 29) attribué de manière aléatoire.

III.2. Résultats de l'enquête consommateur

Telle qu'elle est définie, la durée normative ne tient à priori pas compte du consommateur. Etant donné que celui-ci a un rôle fondamental dans la vie d'un produit, nous avons souhaité l'intégrer dans l'évaluation de notre score unique de qualité par l'intermédiaire de la perception de l'usure par le consommateur. Afin de calculer cette dernière nous présentons ci-après l'enquête consommateur sur laquelle nous nous sommes appuyés.

III.2.1. Présentation de l'enquête

L'enquête sur laquelle nous nous appuyons a été conçue et mise en place lors du programme INTERREG IV³ ACVTEX. Elle avait pour objectif de définir les habitudes des Français dans le cadre de l'entretien et de la fin de vie de sept articles textiles [90] :

- T-shirts ;
- pulls et gilets ;
- chemises ;
- pantalons ;
- sous-vêtements et chaussettes ;
- manteaux et vestes ;
- draps.

Elle s'est tenue en ligne en 2012 et a recueillie 901 réponses provenant d'un échantillon de la population française de plus de 15 ans. Les habitudes collectées ont été considérées comme représentatives des habitudes des Français [90]. Dans la suite nous nous focaliserons sur les questions et réponses relatives aux T-shirts.

III.2.2. Comportement d'usage

Les questions relatives au comportement d'usage questionnaient les consommateurs sur leurs habitudes de tri, d'utilisation et de lavage, de séchage et de repassage. Des exemples de questions sont illustrés en Annexe 1.

III.2.2.1. Habitudes relatives à l'usage

Il a ainsi été identifié que la majorité (58%) des répondants lavent leurs T-shirts après une utilisation et un tiers (31,5%) après deux utilisations, le plus souvent à 40°C (51,2%). Le mode de séchage privilégié est à l'air libre, sur étendoir ($\geq 64,4\%$) et un repassage termine le processus d'entretien dans près de 40% des cas (Figures Figure 23, Figure 24, Figure 25 et Figure 26).

³ ACVtex : projet INTERREG IV 2007/12 :franco-wallon, n° 4.1.6

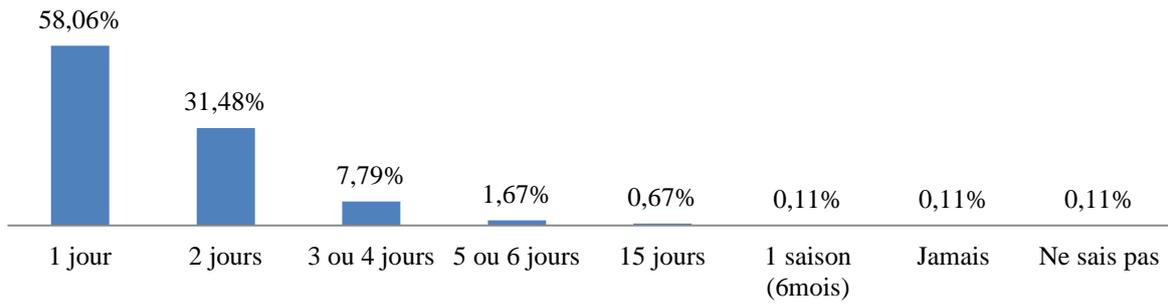


Figure 23 : Nombre de jours d'utilisation avant lavage

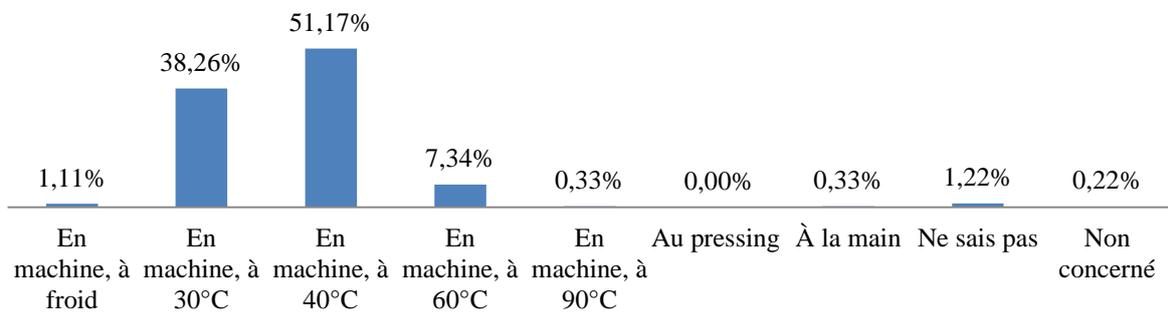


Figure 24 : Mode de lavage des T-shirts

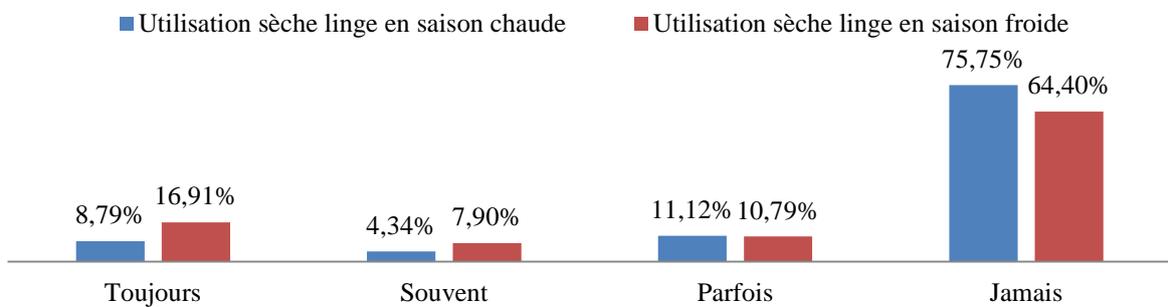


Figure 25 : Habitudes de séchage des T-shirts

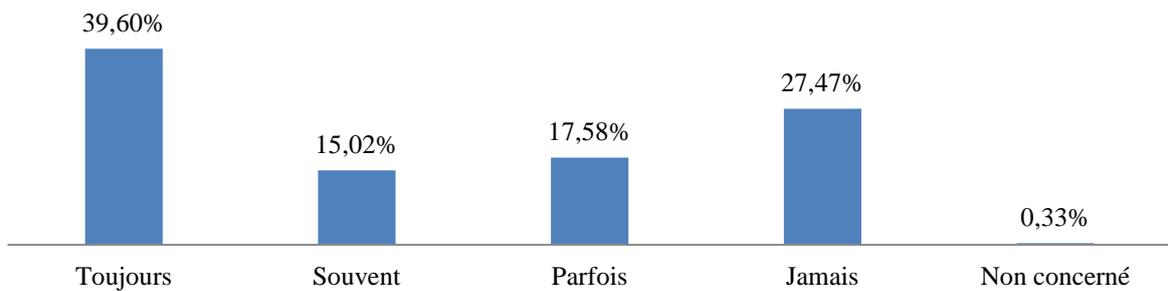


Figure 26 : Habitudes de repassage des T-shirts

III.2.3. Comportement relatif à la fin de vie des T-shirts

Les questions relatives à la fin de vie des produits interrogeaient les consommateurs sur l'importance de sept causes matérielles dans la décision de mise au rebut. Chacune d'entre elle étant examinée sur une échelle de quatre valeurs allant de *Oui, toujours* à *Non, jamais*, traduisant d'une certaine manière la fréquence de mise au rebut (Figure 27) :

- la dégradation de couleur ;
- la déformation ;
- la déchirure des coutures ;
- l'apparition de trou(s) ;
- l'apparition de bouloches ;
- la tenue des tâches (deux sources étant distinguées).

20 [0018] **Les dernières fois que vous avez arrêté de porter des tee-shirts, c'était parce que ...**

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	Oui	Souvent	Parfois	Non
La couleur était modifiée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le produit était déformé	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Une des coutures était déchirée	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le textile avait un trou	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le produit était taché (déodorant, transpiration)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le produit était taché (nourriture, stylo ou autre)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Le textile était bouloché	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Figure 27 : Question relative à la fin de vie des T-shirts

III.2.3.1. Habitudes relatives à la fin de vie des T-shirts

Les tâches étant de nature accidentelle et les T-shirts non spécifiquement traités contre, nous nous sommes concentrés sur les cinq autres.

Les résultats de l'enquête sont présentés en Figure 28 : il apparaît que la déformation et l'apparition de trou(s) se distinguent comme les deux causes principales de fin de vie des T-shirts. Il n'est néanmoins pas évident de classer ces cinq causes entre elles et d'en quantifier l'importance.

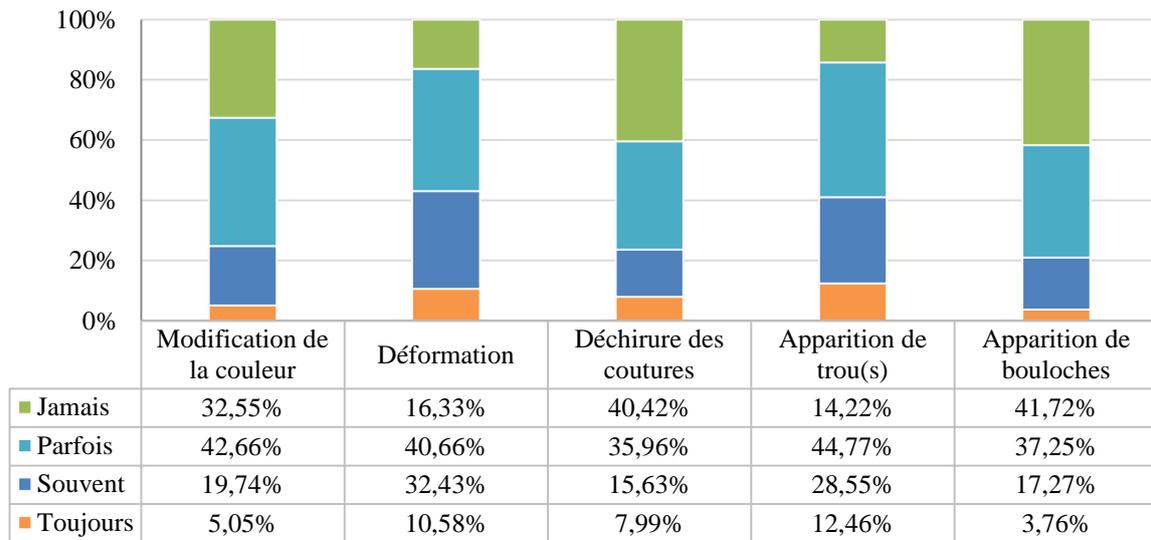


Figure 28 : Causes matérielles de fin de vie des T-shirts

III.3. Evaluation de la perception du consommateur vis-à-vis de l'usure des T-shirts

Pour nous aider à classer ces causes, nous avons exploité ces résultats par la méthode Fuzzy AHP (section II.2.3.) de manière à quantifier les contributions (importances relatives) de chacune d'entre elles dans la décision de mettre au rebut un produit.

III.3.1. Hiérarchisation du problème

Comme le prévoit la méthode Fuzzy AHP, nous avons commencé par structurer le problème [117], [120] en le hiérarchisant et en identifiant l'objectif, les critères et les alternatives (Figure 29) :

- l'objectif est de déterminer le classement de ces cinq causes entre elles c'est-à-dire d'identifier quelle est la cause principale de mise au rebut ;
- les alternatives sont fixées par l'enquête et sont notées
 - A1 – Dégradation de la couleur
 - A2 - Déformation
 - A3 – Déchirure des coutures
 - A4 – Apparition de trou(s)
 - A5 – Apparition de bouloches

- le critère *C* correspond à la fréquence de mise au rebut et est affiné par quatre sous-critères interdépendants
 - *SC1* - *Toujours*
 - *SC2* - *Souvent*
 - *SC3* - *Parfois*
 - *SC4* - *Jamais*

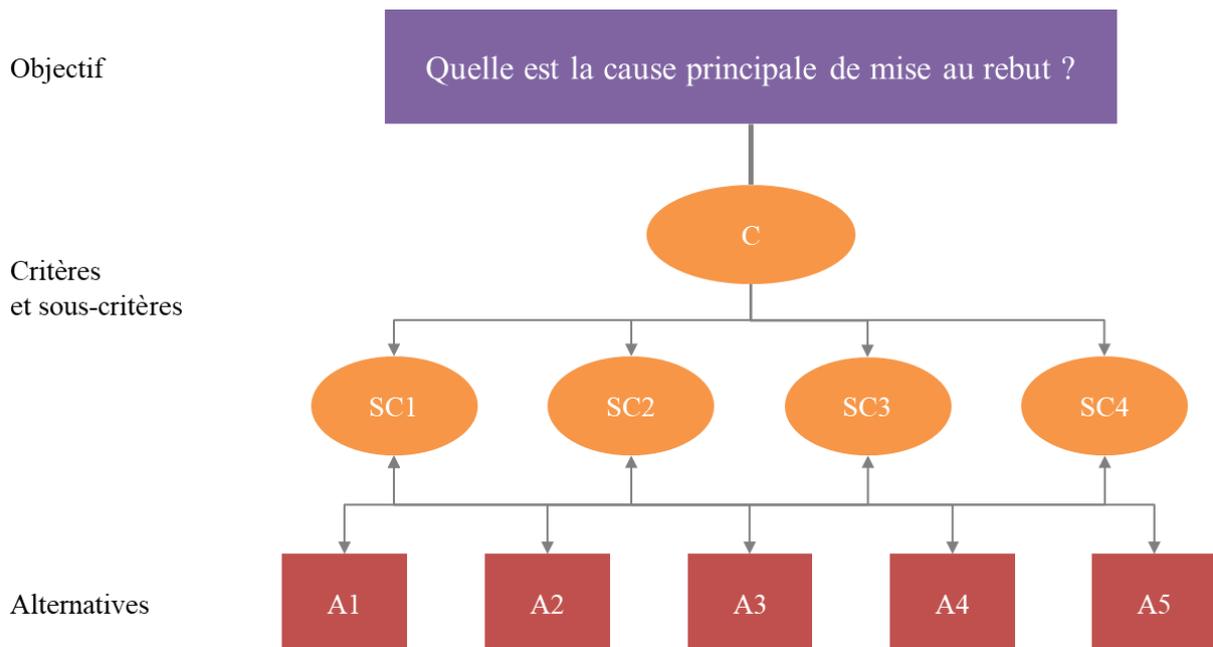


Figure 29 : Hiérarchie du problème

III.3.2. Comparaisons par paire

Suite à cette structuration nous avons procédé aux comparaisons par paires en faisant intervenir trois experts (un docteur en automatique et deux ingénieurs textiles) afin de minimiser le biais dû au jugement. A l'aide de l'échelle linguistique (section II.2.3.3. , Table 4), ils ont d'abord déterminé les matrices floues de priorité des critères puis celle de préférences des alternatives.

Trois matrices floues de comparaison ont systématiquement été obtenues et la matrice formant le consensus a été calculée en utilisant la moyenne géométrique (section II.2.3.3. , Eq. 14, Eq. 15 et Eq. 16).

III.3.2.1. Evaluation des priorités des critères

Les trois experts ont donc déterminé la priorité de chaque sous-critère au regard de l'objectif. Leurs comparaisons linguistiques sont données en Table 8, Table 9 et Table 10.

EXPERT 1	SC1	SC2	SC3	SC4
SC1	E	PI	TFPI	EPI
SC2		E	PI	TFPI
SC3			E	FPI
SC4				E

Table 8 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 1

EXPERT 2	SC1	SC2	SC3	SC4
SC1	E	FPI	TFPI	EPI
SC2		E	PI	FPI
SC3			E	PI
SC4				E

Table 9 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 2

EXPERT 3	SC1	SC2	SC3	SC4
SC1	E	PI	TFPI	EPI
SC2		E	FPI	EPI
SC3			E	TFPI
SC4				E

Table 10 : Comparaison par paire des sous-critères par l'expert 3

La matrice consensus (Table 11) a été calculée à partir des Eq. 14, Eq. 15 et Eq. 16 (section II.2.3.3.).

CONSENSUS	SC1	SC2	SC3	SC4
SC1	(1, 1, 1)	(1, 1.65, 2.5)	(2, 2.5, 3)	(2.5, 3, 3.5)
SC2	(0.4, 0.61, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.65, 2.5)	(1.5, 2.47, 3.5)
SC3	(0.33, 0.4, 0.5)	(0.4, 0.61, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1.96, 3)
SC4	(0.29, 0.33, 0.4)	(0.29, 0.41, 0.67)	(0.33, 0.51, 1)	(1, 1, 1)

Table 11 : Combinaison floue des jugements d'experts relatifs aux sous-critères

Conformément à la procédure proposée (section II.2.3.3. , Figure 13), le ratio de cohérence (CR) de cette dernière matrice (Table 11) a été calculé afin d'en vérifier sa valeur. Pour cela, la matrice a préalablement été défuzzifiée (Table 12) par l'Eq. 13 (section II.2.3.3.) et son CR calculé par l'Eq. 11. D'une valeur de 0,0113, la matrice est considérée comme exploitable sans nécessiter de modification.

	SC1	SC2	SC3	SC4	Vecteur propre
SC1	1	1.68	2.5	3	0.42
SC2	0.59	1	1.68	2.48	0.28
SC3	0.40	0.59	1	1.97	0.19
SC4	0.33	0.40	0.51	1	0.12

$$\lambda_{max} = 4.034$$

$$CI = 0.0113$$

$$CR = 0.013$$

Table 12 : Matrice Consensus défuzzifiée, CI et CR

Le vecteur priorité des sous-critères (Table 13) a finalement été calculé à partir de la matrice consensus (Table 11) par l'approche de Chang [128].

SC1	0.48
SC2	0.34
SC3	0.18
SC4	0

Table 13 : Vecteur priorité des sous-critères

Ainsi, les réponses relatives aux sous-critères *Toujours*, *Souvent* et *Parfois* participent respectivement à 48%, 34% et 18% dans l'objectif de déterminer la cause principale de fin de vie.

III.3.2.2. Evaluation des préférences des alternatives par l'approche de Chang

Nous avons ensuite procédé à l'analyse par extension pour établir les préférences de chaque alternative. Elle consiste en la comparaison par paire des alternatives au regard de chaque sous-critère [128]. La procédure appliquée aux sous-critères est ainsi dupliquée aux alternatives. L'ensemble des résultats détaillés est disponible en Annexe 2.

Les experts ont ici pu s'appuyer sur les statistiques de l'enquête données en Figure 28 et les vecteurs préférences (Table 14) ont finalement été établis.

	A1	A2	A3	A4	A5
SC1	0.12	0.27	0.20	0.30	0.11
SC2	0.16	0.28	0.15	0.26	0.15
SC3	0.20	0.20	0.19	0.22	0.19
SC4	0.22	0.05	0.33	0.06	0.33

Table 14 : Vecteurs préférences des alternatives

III.3.3. Calcul de la perception du consommateur

La perception du consommateur vis-à-vis de ces cinq causes d'usure est finalement donnée par le produit matriciel des préférences (Table 14) par les priorités des sous-critères (Table 13) [128]. Il apparaît que l'apparition de trou(s) et la déformation sont les deux causes les plus importantes, suivies de la déchirure des coutures, la dégradation de la couleur et l'apparition de bouloches (Eq. 24, Table 15).

$$\begin{bmatrix} 0.12 & 0.27 & 0.20 & 0.30 & 0.11 \\ 0.16 & 0.28 & 0.15 & 0.26 & 0.15 \\ 0.20 & 0.20 & 0.19 & 0.22 & 0.19 \\ 0.22 & 0.05 & 0.33 & 0.06 & 0.33 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0.48 \\ 0.34 \\ 0.18 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1507 \\ 0.2592 \\ 0.1816 \\ 0.2712 \\ 0.1373 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 24}$$

	Dégradation de la couleur	Déformation	Déchirure des coutures	Apparition de trou(s)	Apparition de bouloches
Perception du consommateur (%)	15,1%	25,9%	18,2%	27,1%	13,7%

Table 15 : Perception de l'usure par le consommateur

III.3.4. Analyse de robustesse de la perception du consommateur

Les sources d'incertitudes dans le calcul de la perception du consommateur sont multiples et nous nous proposons de tester la robustesse de ce classement en nous focalisant sur deux sources sujettes à discussion :

- les évaluations des experts ;
- l'échelle linguistique utilisée.

Nous avons recalculé la perception du consommateur dans six scénarios résumés en Table 16. L'ensemble des nouvelles contributions calculées est disponible en Annexe 3.

Dans les quatre premiers, nous avons fait varier les entrées du système provenant des experts :

- en supprimant alternativement les réponses de l'un d'entre eux (*Sc1*, *Sc2* et *Sc3*) ;
- en appliquant un biais dans les réponses de l'un d'entre eux avec une préférence marquée pour la réponse *Toujours* (*Sc4*).

Dans les deux scénarios suivants, nous avons modifié l'échelle linguistique (section II.2.3.3. , Table 4) en l'amputant d'une de ces valeurs (*Sc5* et *Sc6*).

		Expert 1	Expert 2	Expert 3	Echelle complète
Sc0	Scénario de référence	✓	✓	✓	
Sc1		✓	✓		
Sc2	Expert	✓		✓	
Sc3			✓	✓	
Sc4	Biais (Toujours)		✓	✓	
Sc5	Echelle	✓	✓	✓	- PI
Sc6		✓	✓	✓	- TFPI

Table 16 : Scénarios de perturbation du système

III.3.4.1. Résultats issus des variations sur les experts

La Figure 30 présente les perceptions calculées à partir des scénarios Sc1, Sc2, Sc3 et Sc4, avec en pointillés les perceptions du Sc0.

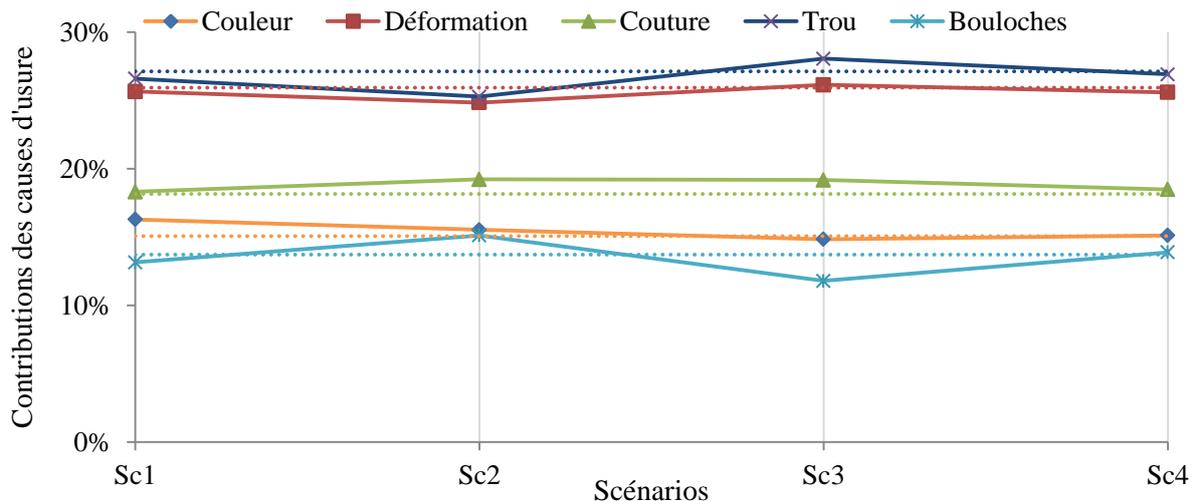


Figure 30 : Perceptions calculées sur les variations des évaluations des experts

Il apparaît que le classement des causes de mise au rebut reste inchangé. Notre objectif de départ ne s'en trouve donc pas perturbé et nous pouvons considérer que ce classement fait consensus. En revanche les contributions associées à chaque alternative varient, parfois de manière importante comme dans le Sc3 probablement dû à des évaluations moins catégoriques de la part de l'expert absent. Par ailleurs le biais du scénario Sc4, apporté par l'un des experts en favorisant le sous-critère *Toujours*, n'a pas une influence significative.

III.3.4.2. Variations de l'échelle linguistique

La Figure 31 présente les résultats des *Sc5* et *Sc6* dans lesquels nous testons la robustesse du système face à une échelle incomplète. Nous ne constatons pas d'influence sur le classement des causes entre elles. Seules les contributions calculées dans le *Sc5* tendent à s'équilibrer, il est donc probable que la valeur retirée dans ce scénario (PI) ait été davantage utilisée.

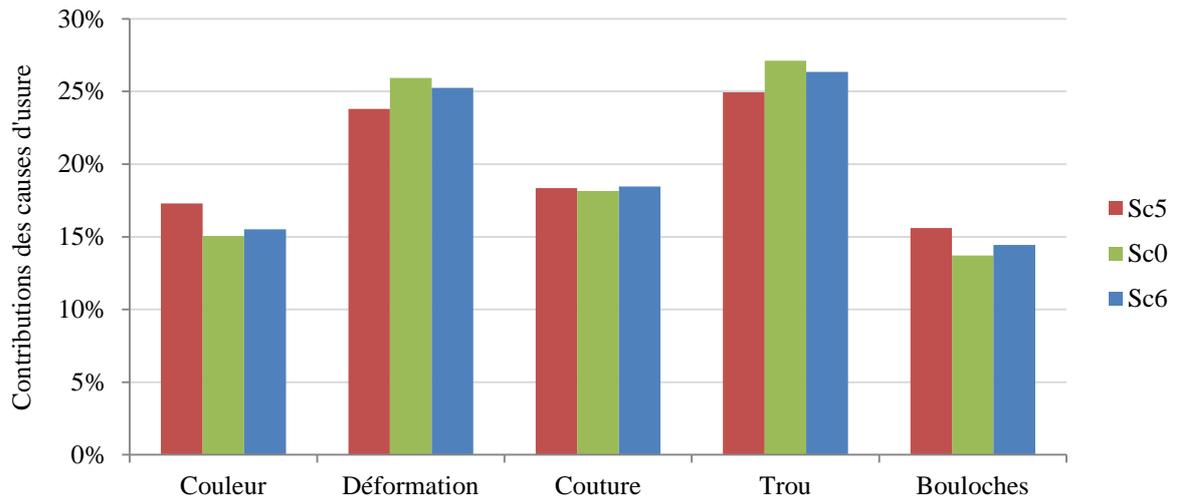


Figure 31 : Perceptions calculées à partir d'une échelle incomplète

III.3.5. Discussion

La perception de l'usure par le consommateur que nous avons calculée par la méthode Fuzzy AHP confirme les résultats qualitatifs de l'enquête : l'apparition de trou(s) et la déformation sont les deux causes prépondérantes dans la décision de jeter et sont suivies de la déchirure des coutures, de la dégradation de la couleur et enfin de l'apparition de trou(s).

L'analyse de la robustesse nous a en outre permis de constater que ce classement est fiable puisque non remis en cause par les diverses perturbations que nous avons imposé au système. Nous notons néanmoins des variations dans les valeurs des contributions qui peuvent s'élever jusqu'à plus ou moins 2%. Pour juger de l'importance de telles variations, il serait utile de connaître l'intensité de la dégradation qui mène au rebut : une variation faible sur une cause particulièrement sensible pourrait en effet être plus dommageable que son inverse.

Pour aller plus loin et accroître le degré de précision, il faut donc envisager d'enrichir la connaissance des causes de fin de vie avec un intérêt particulier pour :

- quantifier l'intensité de la dégradation critique, information qui pourra par ailleurs être utile pour déterminer des valeurs seuils et aider à préciser le moment de la fin de vie ;
- déterminer de manière exhaustive les causes d'usure puisqu'en effet l'enquête sur laquelle nous nous sommes appuyés ne laissait pas de champ de réponses libres. Lors de travaux futurs, il serait donc intéressant d'insister sur des notions plus subjectives tel que le toucher, le confort ou encore la douceur en s'appuyant ensuite sur les travaux de Zhu [141], d'Agarwal [142], de Latroch [99], d'Abbas [140], ou encore de Yosouf [98] pour la caractérisation.

En parallèle, il serait intéressant de définir des profils de consommateurs et d'évaluer la perception de l'usure en fonction de ces profils. De cette manière la qualité des produits pourra être évaluée et adaptée en fonction du public ciblé.

III.4. Evaluation des scores de qualité des T-shirts

Suite à l'évaluation de la perception de l'usure par le consommateur, nous nous sommes intéressés aux capacités des produits à résister à l'usure. Ces performances seront prises en compte dans l'évaluation du score unique de qualité.

III.4.1. Mesure des performances

Pour mesurer les performances des T-shirts face aux cinq facteurs d'altération évoqués, dix tests normalisés ont été menés. A partir de la procédure proposée (section II.3.1.), nous avons considéré les tests en lien avec les étoffes tricotées se rapportant à l'usage. Pour des questions de quantité de matières et de faisabilité des tests en interne, j'ai ensuite sélectionné les 13 tests mentionnés en Table 17. Par ailleurs, pour marquer l'état initial des T-shirts, nous avons décidé de réaliser un lavage préalable aux tests, qui permet entre autre de retirer toutes éventuelles matières résiduelles de la fabrication et du transport.

Test		Unité	Meilleure note
Solidité des coloris aux lavages domestiques et industriels			
Solidité des coloris à l'eau			
Solidité des coloris au repassage à chaud		/5	A maximiser
Solidité des coloris au frottement	A sec		
	Au mouillé		
Stabilités dimensionnelles au lavage et au séchage			
Vrillage après lavage	Sens colonne		
	Sens rangée	%	A minimiser
Résistance à la traction des coutures	Sens colonne	N	A maximiser
	Sens rangée		
Résistance à l'éclatement (méthode pneumatique)			
Propension des étoffes à l'ébouriffage et au boulochage (boite de boulochage)			
Propension des étoffes à l'ébouriffage et au boulochage (Martindale)			

Table 17 : Procédure de tests

Tous ces tests ont été conduits dans le laboratoire du Gemtex et sauf mention contraire, en suivant les normes citées (section II.3.1.), dans une atmosphère conditionnée et conforme à l'ISO 139.

III.4.1.1. Résultats des tests

III.4.1.1.1. Résistance des T-shirts à la dégradation de coloris

La capacité des T-shirts à résister à une dégradation de coloris a été évaluée au travers de quatre tests traduisant l'usage. Les dispersions de leurs résultats sont présentées sous forme de boîtes à moustaches en Figure 32. On y retrouve les éléments standards de ce type de graphique, avec la boîte représentant 50% des individus, la médiane (élément rectangulaire à l'intérieur de la boîte), les valeurs inférieures et supérieures (éléments rectangulaires de part et d'autre de la boîte) et les valeurs aberrantes (cercles).

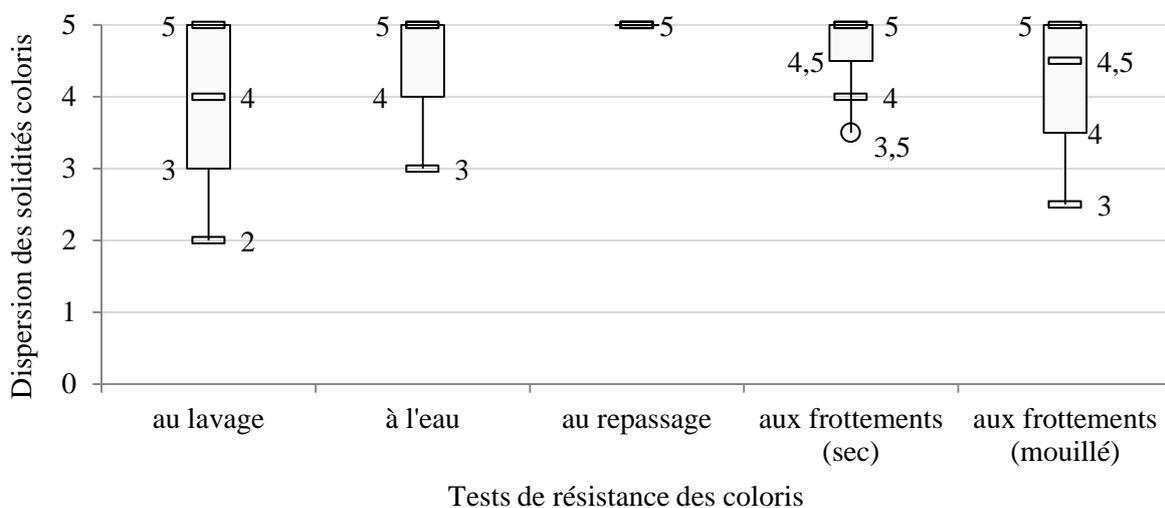


Figure 32 : Dispersion des résultats de tests relatifs à la dégradation de la couleur

Le test de solidité des coloris au repassage est très singulier puisqu'il s'avère que tous les T-shirts y ont obtenu la même note. N'apportant, par conséquent, pas d'information remarquable, nous ne nous attarderons pas dessus.

Le deuxième test le moins différenciateur est celui aux frottements à sec, puisque les évaluations ne varient que de 4 à 5. Sa valeur médiane de 5 traduit le fait qu'une grande majorité des produits (20 sur 29) ont obtenu cette note. Parmi les autres produits, un seul obtient la note de 3,5, trois la note de 4 et cinq la note de 4,5. Ce test à sec n'apporte pas plus d'informations que le test au mouillé, les produits les moins bien notés à sec le sont également au mouillé mais de manière plus significative.

Il semble finalement que les tests au lavage, à l'eau et au frottement mouillé soient plus intéressants pour distinguer les produits entre eux, nous nous focaliserons donc sur les résultats de ces trois tests.

Parmi ces trois tests, seul celui au lavage n'a pas été réalisé dans les conditions de la norme (NF EN ISO 105C-06). En effet, il y est prévu de laver les éprouvettes indépendamment les unes des autres

dans des pots avec une solution de détergent et des billes pour simuler les frottements. La dégradation de couleur est ensuite observée après l'équivalent de 1 lavage. Pour rester au plus proche de l'usage identifié en section III.2.2.1. , nous avons préféré laver les T-shirts en machine à laver selon les conditions spécifiées par les consommateurs et évaluer la dégradation de coloris après 10 lavages.

Les résultats sont représentés en Figure 33, ceux relatifs au lavage et aux frottements au mouillé sont sous forme d'histogrammes et ceux relatifs au test à l'eau sont sous forme de points.

Le test de résistance à l'eau apparaît comme le moins sévère puisque quasi systématiquement supérieur aux autres tests d'une demi cotation. Dans notre cas, c'est également un test dont les résultats sont assez indulgents puisqu'un seul produit est noté sous la barre de 4.

Les tests au lavage et aux frottements au mouillé apparaissent comme les plus exigeants et distinguent mieux les produits entre eux. Leurs évaluations s'échelonnent davantage sur la plage proposée, entre 2 et 5 dans le test au lavage contre 3 à 5 dans le test à l'eau. Le test au lavage est par ailleurs plus sévère que celui aux frottements au mouillé pour 21 T-shirts sur 29 et ne permet qu'à douze produits d'obtenir la note maximale.

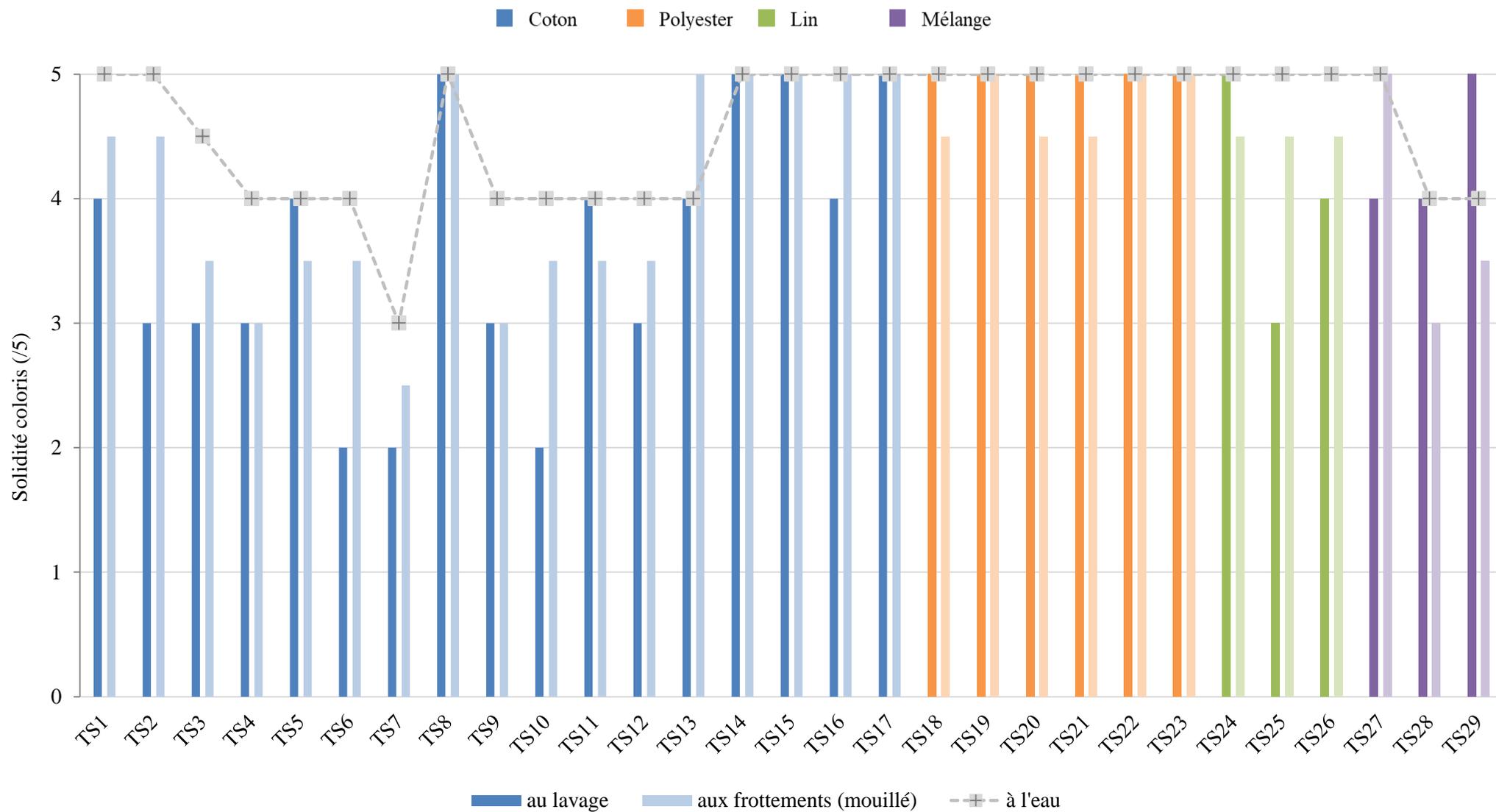


Figure 33 : Résultats des tests de solidité des coloris au lavage, à l'eau et aux frottements mouillé

III.4.1.1.2. Résistance des T-shirts à la déformation

La résistance des T-shirts à la déformation a été évaluée avec les tests de stabilité dimensionnelle et de vrillage et consiste en l'observation et la mesure des variations (de dimension et d'angle) d'un carré de 30*30cm² préalablement tracé sur les produits. Nous avons, ici également, décidé de réaliser ces mesures suite à 10 lavages (réalisés dans les conditions spécifiées par les résultats de l'enquête (section III.2.2.1.)).

La Figure 34 illustre les résultats des stabilités dimensionnelles en rangées et en colonnes. Ils sont exprimés en pourcentage et traduisent la capacité des produits à résister à un élargissement (variation positive) ou à un rétrécissement (variation négative). L'axe des abscisses représente les variations en rangées et l'axe des ordonnées celles en colonnes. Ainsi, plus un T-shirt est proche de l'origine du graphique et meilleure est sa stabilité dans les deux sens.

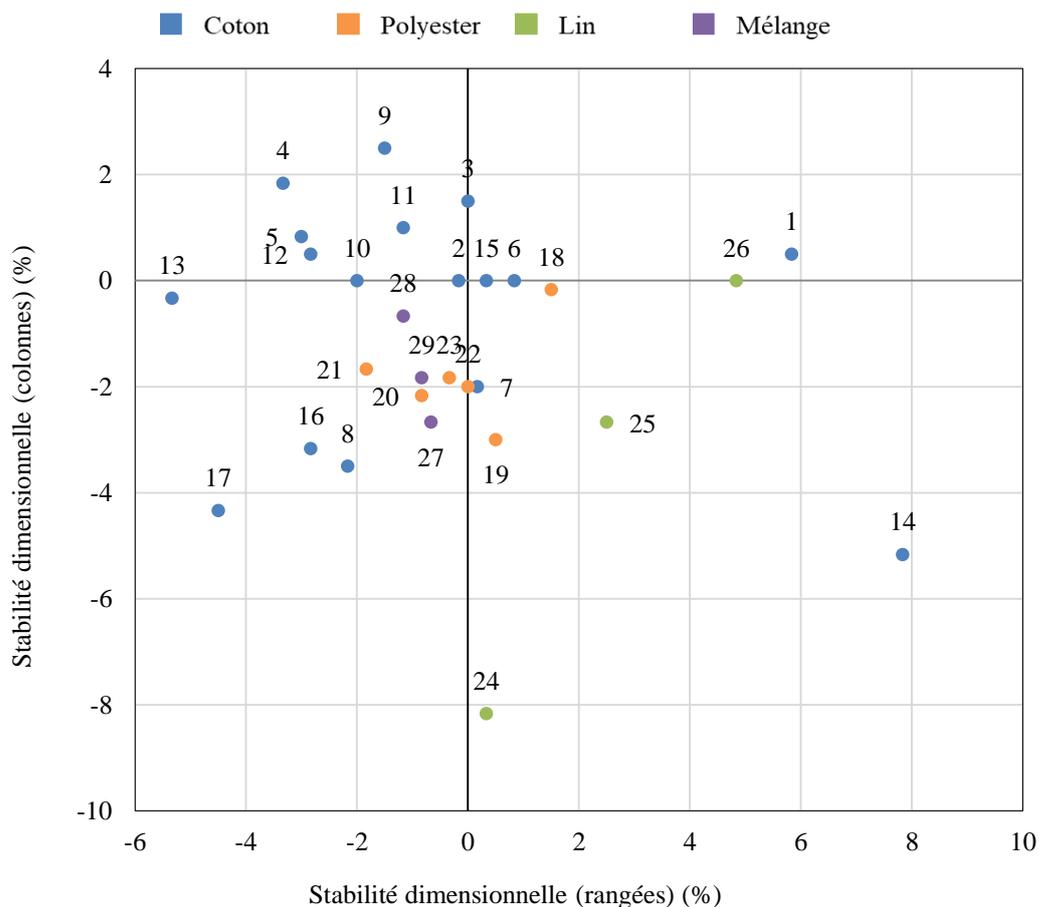


Figure 34 : Stabilité dimensionnelle en rangées et colonnes

Il ressort que les dimensions des produits varient davantage dans le sens rangées avec des variations comprises entre -5% et +6% en rangées, contre -5% et +2,5% en colonnes (exception faite des

individus isolés). Chaque sens a son importance puisque des produits tels que le TS1, le TS13, le TS24 ou encore le TS26 apparaissent très bon dans un sens et beaucoup moins dans l'autre.

Nous observons par ailleurs une tendance globale au rétrécissement puisque 17 T-shirts évoluent négativement dans le sens rangées, 18 dans le sens colonnes et 13 cumulent les deux effets. Leurs comportements ne semblent en revanche pas liés à leur composition.

Les résultats du test de vrillage (Figure 35) présentent une large gamme de valeurs, des plus faibles ($\leq 1\%$) aux plus élevées ($\geq 10\%$). Ils semblent aller dans le même sens que les résultats de stabilité dimensionnelle, puisque les TS1, TS8, TS12, TS14 et TS26 présentent autant des vrillages importants que des variations en rangées et/ou colonnes importantes et inversement pour les TS2, TS3, TS20, TS21, TS22, et TS23.

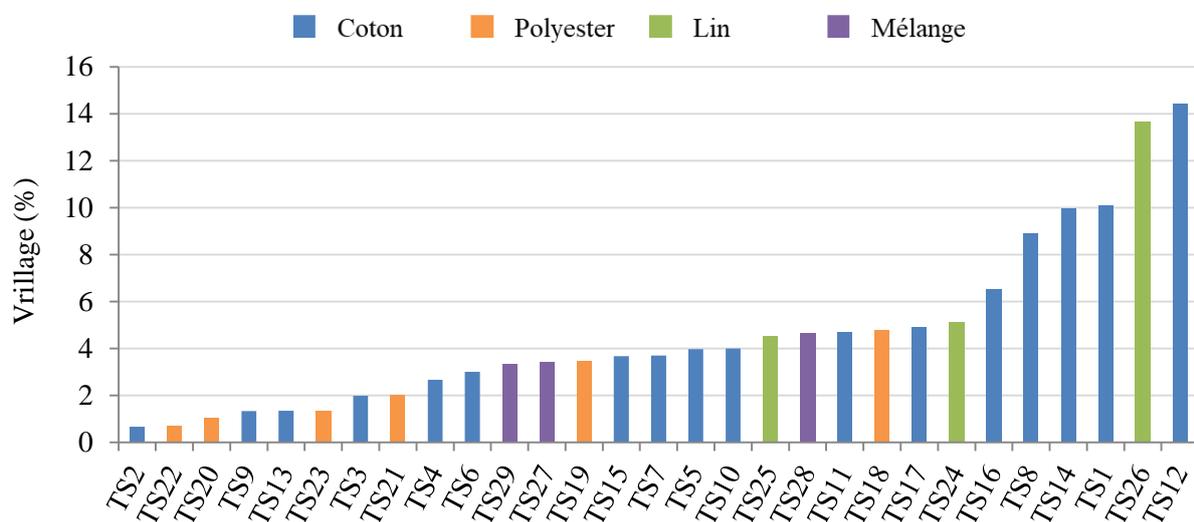


Figure 35 : Résultats du test de vrillage

III.4.1.1.3. Résistance des T-shirts à la déchirure des coutures

La résistance des coutures dans les sens rangées et colonnes est représentée en Figure 36. La résistance étant mesurée par une force de traction avant rupture, les T-shirts ayant les meilleures résistances se situent en haut à droite et ceux ayant les moins bonnes résistances, en bas à gauche.

Nous ne dégagons pas ici de conclusions particulières tant les produits se répartissent de manière uniforme, si ce n'est que le sens rangées semblent davantage distinguer les produits puisque leurs évaluations vont de 50 à 200N, contre 100 à 200N dans le sens colonne.

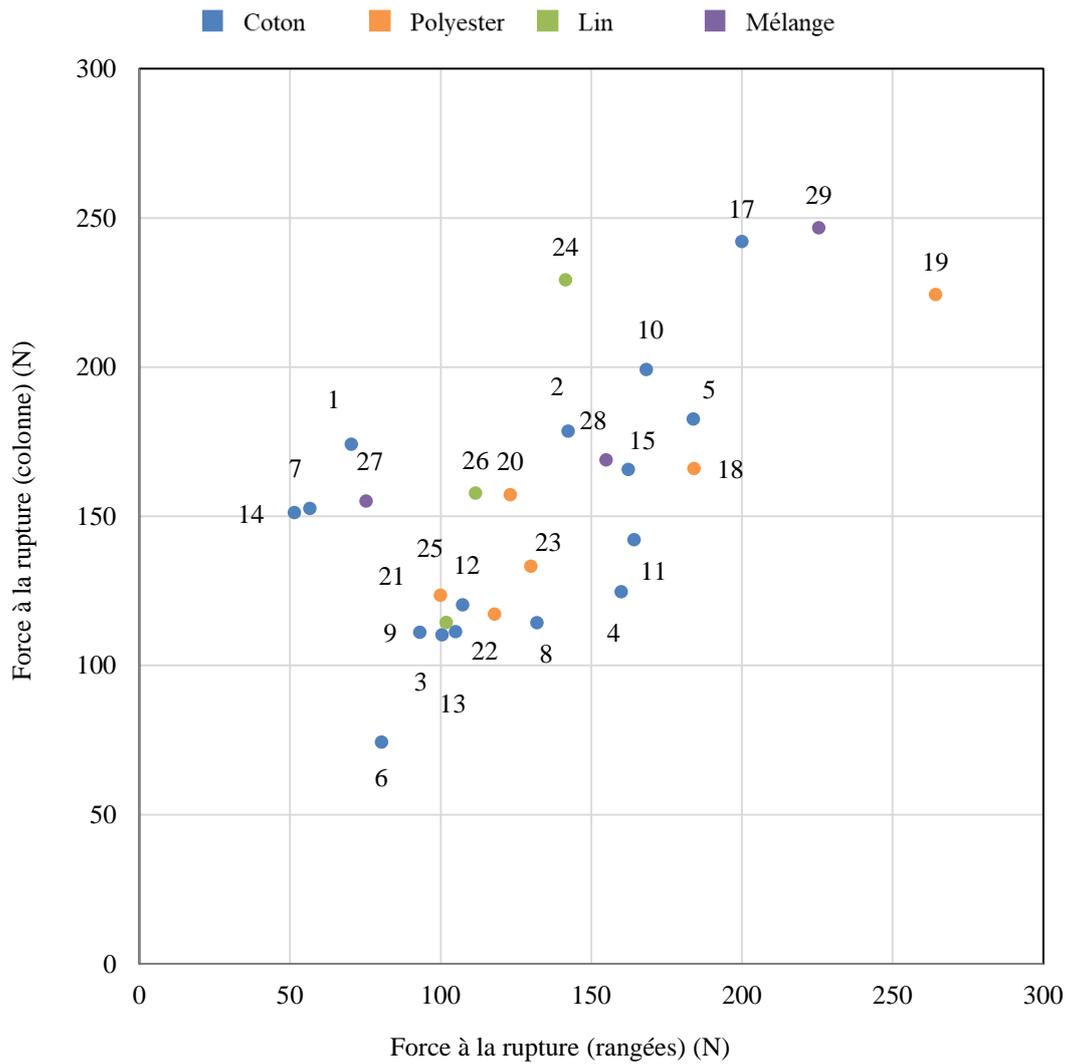


Figure 36 : Résultats de résistance des coutures

III.4.1.1.4. Résistance des T-shirts aux trous

La résistance aux trous a été caractérisée par un test d'éclatement. Les résultats (Figure 37) distinguent les produits sur une large gamme de valeurs variant de 250kPa à 950kPa. Trois produits en polyester se détachent avec des résistances à l'éclatement supérieures à 800kPa. Les autres produits se répartissent régulièrement.

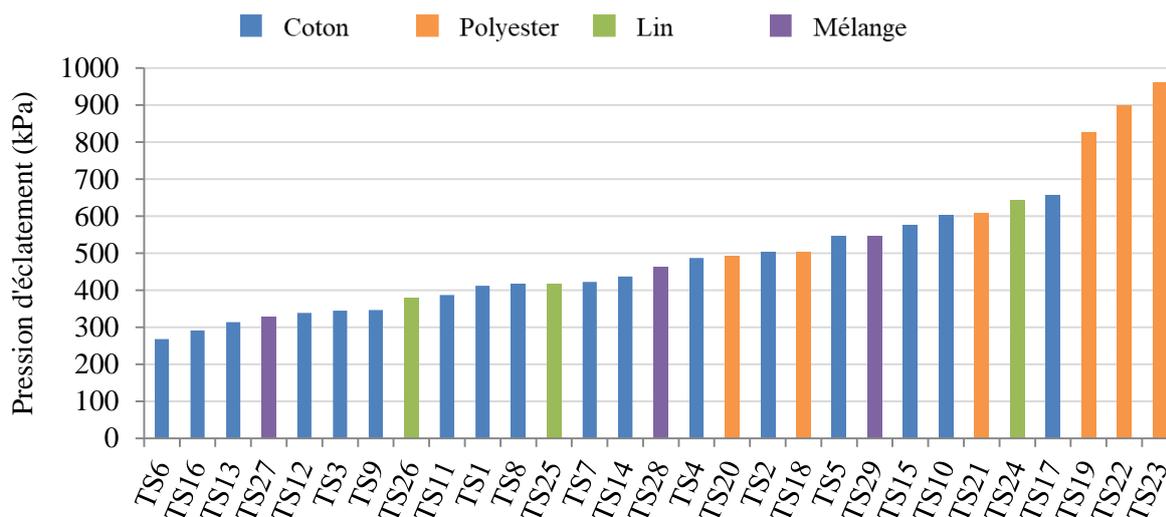


Figure 37 : Résultats du test d'éclatement par la méthode pneumatique

III.4.1.1.5. Résistance des T-shirts au boulochage

Nous avons testé la résistance des T-shirts au boulochage par les tests en boîte de boulochage et au Martindale en fixant respectivement les nombres de cycles à 14400 et 8000.

Nous constatons que les résultats du test en boîte de boulochage (Figure 38) varient de 3 à 5 et distinguent très nettement les matières entre elles, les produits en polyesters et issus de mélange tiennent le haut du classement quand les produits en lin tiennent plutôt le bas du classement ;

A l'inverse, les résultats du test Martindale répartissent les produits quelle que soit la matière et ce sur une échelle de valeurs plus importante variant de 1,5 à 5 (Figure 39). Il semble par ailleurs que ce test soit plus exigeant : un seul produit y obtient la note de 5 et 27 T-shirts sur 29 y obtiennent une note inférieure par rapport au test en boîte de boulochage.

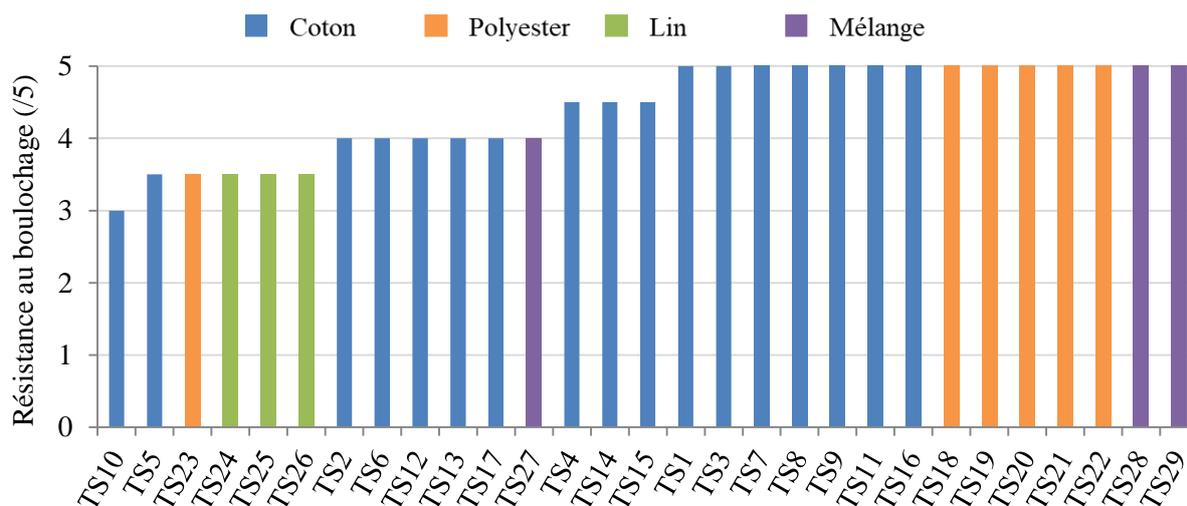


Figure 38 : Résultats du test de boulochage par la méthode boîte de boulochage

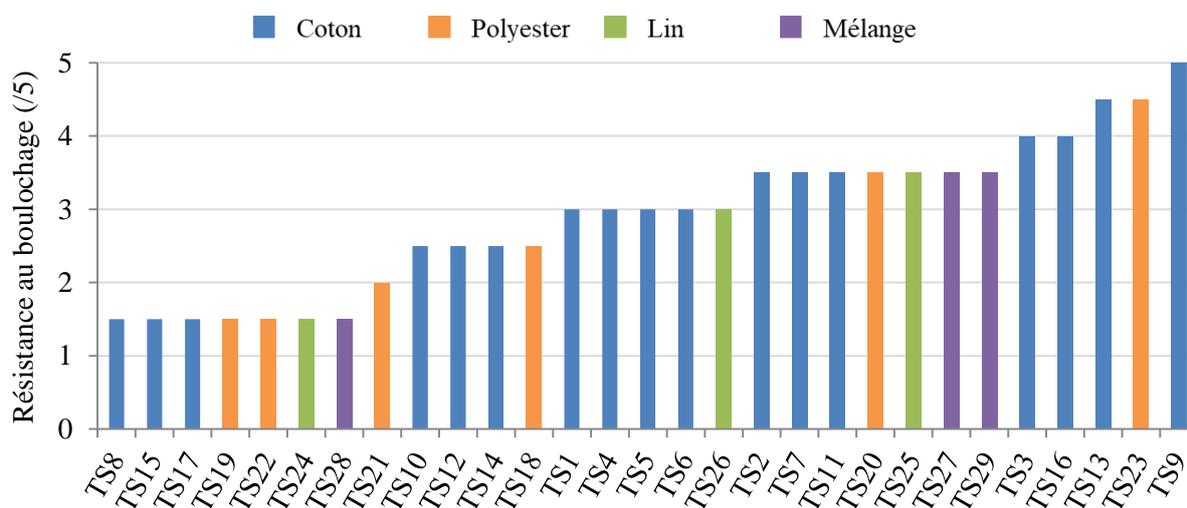


Figure 39 : Résultats du test de boulochage par la méthode Martindale

III.4.2. Evaluation du score QOC

Les performances mesurées sont multiples et traduisent toutes des qualités spécifiques attendues des T-shirts. Devant cette diversité de données et parce que notre objectif est de nous orienter vers une valeur unique tel que la durée normative, nous avons proposé l'évaluation d'un score unique de qualité, dit QOC pour Qualité Orientée Consommateur. Il met en jeu l'ensemble des performances des produits (section III.4.1.1.) ainsi que la perception de l'usure par le consommateur calculée par Fuzzy AHP (section III.3.3.). L'évaluation de ce score s'appuie sur la méthode de surclassement PROMETHEE II (Figure 40) implémentée sur le logiciel Visual PROMETHEE [177], [178].

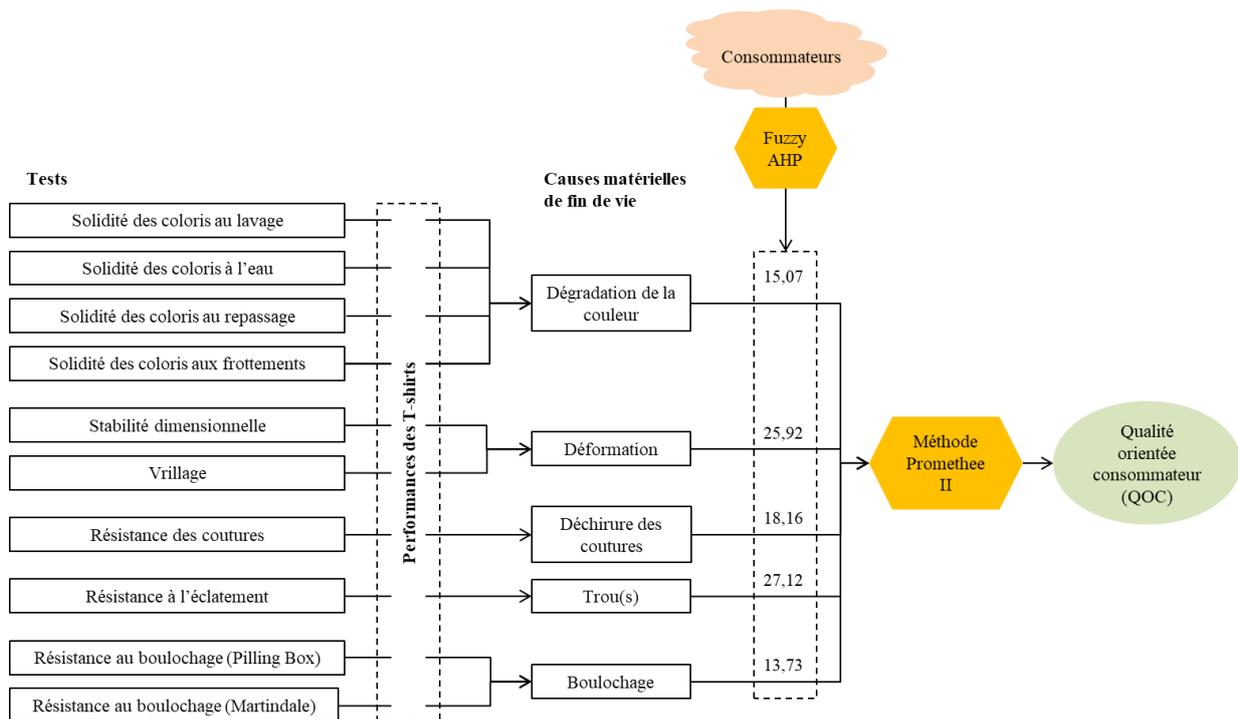


Figure 40 : Méthode de calcul du score QOC

La méthode s'appuie notamment sur des fonctions préférences (section II.3.2.2.) que nous avons choisi linéaire et en *V-shape* [150], [179]. Il en résulte les flux nets (Figure 41) qui représentent les valeurs du score QOC par T-shirt.

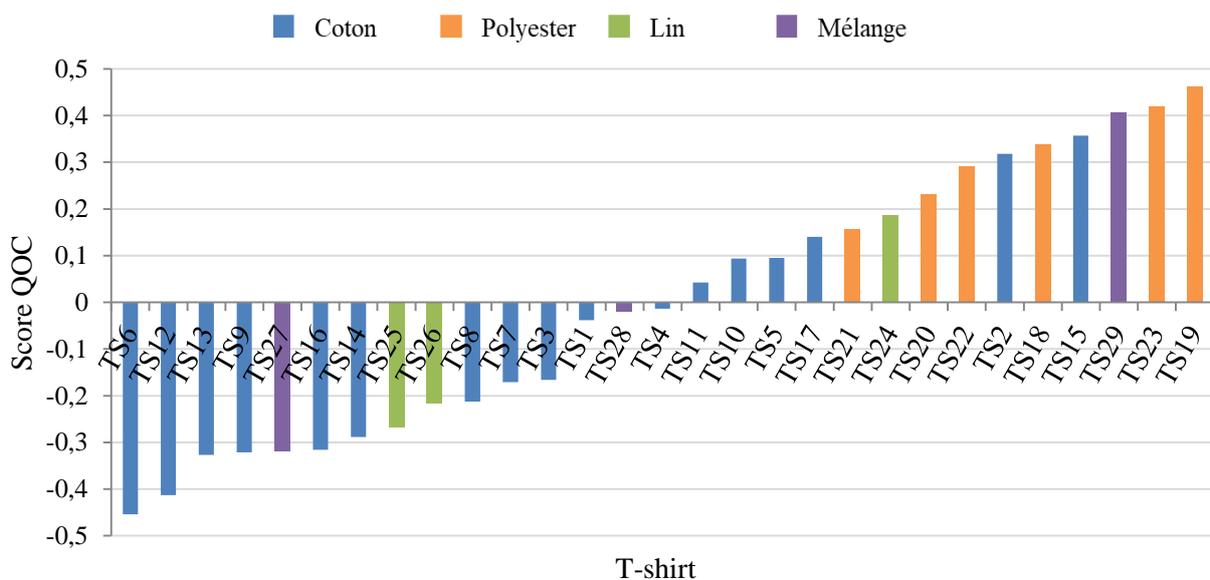


Figure 41 : Score QOC par T-shirt

Le flux net proposé par la méthode PROMETHEE II varie dans $[-1; 1]$. La limite entre bonne et mauvaise qualité, qui plus est subjective, n'est néanmoins ainsi pas représentée par le zéro (origine de l'axe vertical).

Finalement les valeurs calculées évoluent dans $[-0,45; 0,45]$. Les produits se distinguent bien puisque peu de paliers sont à observer. Le classement qui résulte laisse apparaître une bonne capacité des T-shirts en polyester à résister aux contraintes d'usage, puisque tous sont présents en haut de classement. Nous retrouvons par ailleurs un T-shirt issu de mélange, deux issus de coton et un issu de lin.

III.4.3. Evaluation de la contribution de la perception du consommateur dans le score QOC

Le score QOC a ceci de spécifique qu'il tient compte de la perception de l'usure par le consommateur. Afin de vérifier que sa prise en compte est pertinente, nous avons commencé par comparer le score QOC avec un score qualité calculé en pondérant les résultats de tests de manière équivalente (Figure 42).

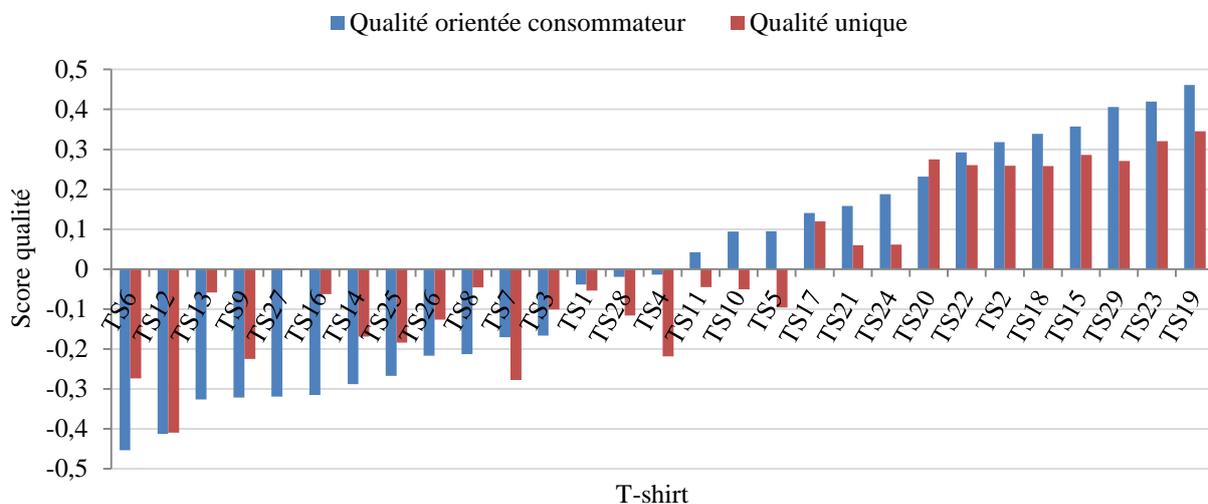


Figure 42 : Comparaison du score QOC et d'un score de qualité unique

Cette comparaison nous permet de mettre en évidence des différences significatives dans les résultats :

- le score QOC permet une distinction des produits sur une plage de valeurs plus importante, permettant ainsi une plus grande distinction des produits ;
- les deux scores présentent des résultats parfois très différents (exemple des T-shirts TS4, TS13 et TS27), ce qui remet en cause la position de certains produits dans le classement.

Ces observations nous amènent à conclure que la prise en compte du consommateur a un impact non négligeable sur le score de qualité des produits et qu'elle permet de mieux s'approcher d'une qualité d'usage en pondérant justement les forces et les faiblesses des produits.

III.4.4. Analyse de robustesse du score QOC

Tout comme nous l'avons fait pour tester la fiabilité des résultats de la méthode Fuzzy AHP, nous proposons ici de tester la robustesse du modèle afin d'en déterminer les limites.

Dans la mesure où la méthode PROMETHEE II implique l'utilisation de fonctions de préférence, de poids et nécessairement de données d'entrées, nous avons testé 85 scénarios jouant sur ces paramètres (Table 18) :

- dans les scénarios 2 et 3 nous testons l'influence d'un changement de fonction de préférences ;
- dans les scénarios 4 à 13 nous envisageons successivement des variations de plus et moins 10% du poids de chaque critère ;
- dans les scénarios 14 à 25 nous évaluons l'influence que peuvent avoir les tests de performances en excluant une mesure à la fois de la méthode ;

Nous testons ensuite la robustesse du score QOC dans 60 scénarios (de 26 à 86) plus extrêmes puisqu'ils sont construits en ne gardant qu'une performance par cause matérielle d'usure. Cette stratégie permettra d'identifier les tests pertinents en vue d'optimiser le coût de la méthode.

Scénario	Dégradation de la couleur					Déformation			Déchirure des coutures		Apparition de trou(s)	Apparition de bouloches		Poids	Fonction de préférences
	SC lavage	SC eau	SC repassage	SC frottements sec	SC frottements mouillé	Stab dim col	Stab dim rangés	Vrillage	Couture col	Couture rangées	Eclato	Pilling box	Martindale		
1 (référence)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Sc0 (section III.3.3.)	Linéaire & V-shape
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Usual
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		Level
4 à 13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	cf Annexe 4	Linéaire & V-shape
14 à 25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Sc0 (section III.3.3.)	
	...														
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
26 à 86	✓					✓			✓		✓	✓		Sc0 (section III.3.3.)	
	...														
					✓			✓		✓	✓		✓		

Table 18 : Scénarios de variations des entrées dans la méthode PROMETHEE II

A partir des nouveaux résultats, nous avons fait le choix de vérifier l'existence d'un modèle de régression linéaire entre le classement initial et chaque nouveau classement, avec l'idée de mesurer l'intensité de la perturbation. Pour cela, le coefficient de détermination (R^2) a été calculé : une valeur proche de 1 traduisant peu de perturbation et inversement.

III.4.4.1. Robustesse suite à un changement de fonction de préférence

Dans les scénarios 2 et 3, nous testons le score QOC face au changement de fonction de préférence.

Dans la méthode PROMETHEE II, des fonctions de préférences interviennent pour définir le degré de préférence d'un produit sur un autre en fonction de leur écart sur un critère, avec au choix six types de fonctions sont proposés par défaut : *usual*, *u-shape*, *v-shape*, *level*, *linear* et *gaussian*.

Dans les scénarios 2 et 3, nous avons respectivement sélectionné les fonctions *usual* et *level*.

Avec des coefficients R^2 proches de 1 (Table 19), il apparaît que ce type d'erreur n'a que peu d'influence sur le résultat.

Scénario	2	3
R^2	0,972	0,982

Table 19 : Coefficients de détermination des scénarios 2 et 3

III.4.4.2. Robustesse suite aux variations de poids

Dans les scénarios 4 à 13, nous avons utilisé les poids en Annexe 4.

Dans chaque cas les valeurs de R^2 calculées sont supérieures à 0,98. De la même manière que précédemment, nous pouvons en conclure que ces changements n'ont que peu d'influence (Table 20).

Scénario	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R^2	0,984	0,986	0,980	0,987	0,987	0,983	0,984	0,988	0,984	0,984

Table 20 : Coefficients de détermination des scénarios 4 à 13

III.4.4.3. Robustesse suite aux changements des données d'entrée

Dans les scénarios 14 à 25, nous testons la robustesse du score face à un changement dans les données de performances en supprimant successivement une performance à la fois.

Les coefficients R^2 sont ici encore proches de 1 (Table 21) et ils montrent que ces suppressions ne modifient que peu le classement initial. Le scénario le moins corrélé obtient un R^2 de 0,96 et correspond à la suppression des résultats Martindale (apparition de bouloches). Nous l'avons tracé en Figure 43 en parallèle du scénario 3, qui obtient le meilleur R^2 . Le test Martindale est celui que nous avons noté comme distinguant le plus les T-shirts entre eux, du point de vue des bouloches, il est donc attendu que sa suppression ait un impact plus fort. Nous remarquons par ailleurs que les meilleurs coefficients sont obtenus avec la suppression des tests de solidité des coloris, puisqu'avec cinq résultats il y a un effet de compensation qu'il n'y a pas avec les autres.

Scénario	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
R^2	0,998	0,999	0,998	0,999	0,999	0,973	0,967	0,972	0,971	0,969	0,968	0,960

Table 21 : Coefficients de détermination des scénarios 14 à 25

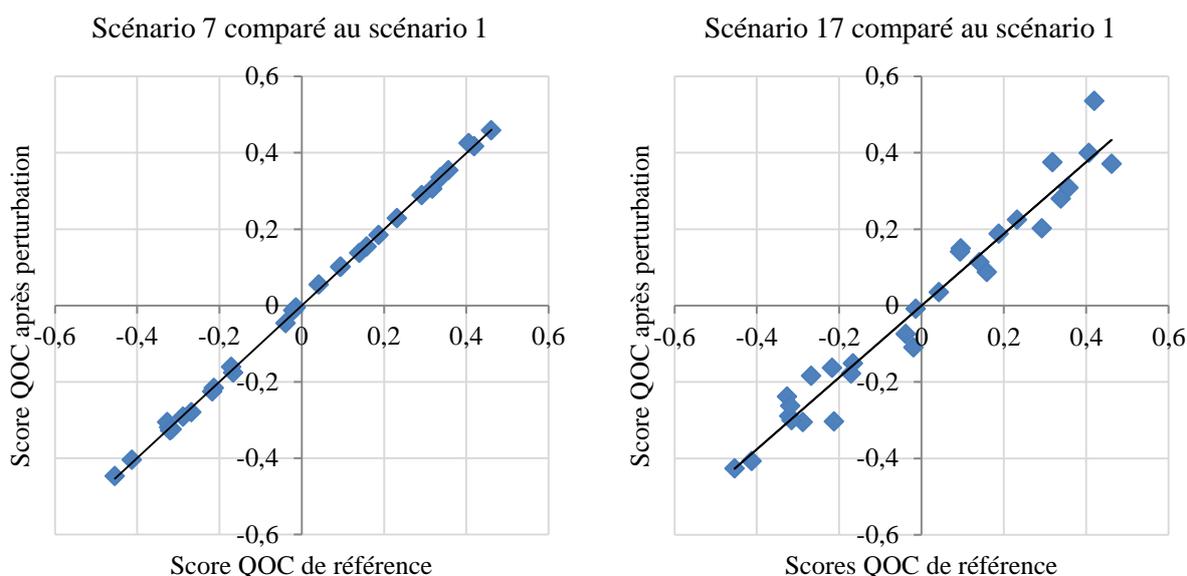


Figure 43 : Représentation des scénarios 7 et 17 par rapport au scénario 1

III.4.4.4. Robustesse aux changements de données d'entrée et piste d'optimisation de la méthode

Pour aller plus loin, nous poursuivons, dans les scénarios 26 à 86, une modification des données d'entrée mais de manière plus extrême.

Nous avons effectivement testé des scénarios en ne gardant qu'un test par cause matérielle de fin de vie et ce dans 60 configurations. De cette manière, nous avons appréhendé la robustesse de notre

modèle sur des cas extrêmes et en avons profité pour chercher des pistes d'optimisation de la méthode. Nous devons prendre en compte le temps et le coût d'une telle méthode et afin de réduire le nombre de tests à réaliser, nous avons cherché les plus significatifs.

Devant la quantité importante de scénarios et de valeur de R^2 nous présentons leur dispersion (Figure 44). Il apparait une valeur maximale de 0,9 et une valeur minimale de 0,6, avec une médiane de 0,8.

Ces résultats mettent en évidence une certaine complexité du modèle puisqu'il ne peut se résumer par cinq tests. Les valeurs sont effectivement moins bonnes que précédemment et aucun scénario n'apparait très pertinent. En revanche, à partir des meilleurs, nous pouvons identifier les tests les plus significatifs à réaliser lors d'une première approche.

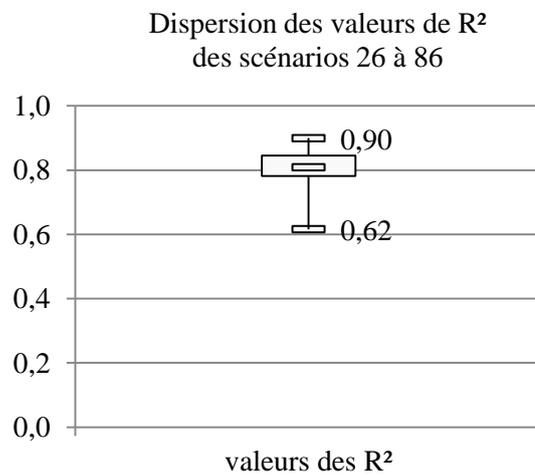


Figure 44 : Dispersion des valeurs de R^2 des scénarios 26 à 86

III.4.5. Discussion

Dans cette section III.4. , nous avons proposé une procédure de tests permettant d'évaluer la capacité des T-shirts à résister aux cinq causes d'usure étudiées.

L'étude des résultats nous a permis d'identifier les tests les plus intéressants, c'est à dire différenciant au mieux les produits. Les tests de solidité coloris au lavage, aux frottements mouillé, les tests de stabilité dimensionnelle et de vrillage ou encore Martindale sont ceux qui nous ont semblés les plus pertinents.

Certains résultats ont néanmoins été obtenus par évaluation humaine et ils peuvent être discutés. Pour cela, nous préconisons l'utilisation de méthodes de mesures plus objectives : tel qu'un spectrophotomètre pour la solidité des coloris et des méthodes assistées par ordinateur pour l'évaluation du boulochage, notamment au travers des travaux de Behera et al. [180], Kang et al. [181] et Xin et al. [182].

Nous avons ensuite proposé une méthodologie d'évaluation d'un score unique de qualité, dit QOC, intégrant la connaissance du produit et du consommateur et basée sur la méthode PROMETHEE II.

Afin de vérifier son intérêt, nous avons commencé par comparer notre score avec un score unique de qualité uniquement basé sur les performances (section III.4.3.). Nous avons constaté des différences significatives qui nous permettent de souligner l'importance du consommateur dans un tel score.

Par la suite, nous avons testé la robustesse du score QOC en faisant varier les paramètres en entrée de la méthode : les fonctions de préférences, les poids et les performances des produits. Nous avons évalué la robustesse de notre modèle à travers une régression linéaire mettant en parallèle chaque nouveau résultat avec le résultat de référence. En calculant les valeurs de R^2 , nous avons mis en évidence que dans 24 scénarios les scores et classements sont restés très proches du résultat de référence traduisant ainsi une certaine robustesse du modèle. Pour aller plus loin, nous avons testé 60 scénarios extrêmes, pour lesquels les valeurs de R^2 sont mitigées, mais qui peuvent en revanche nous servir pour identifier les tests les plus significatifs et optimiser la méthode.

Une limite actuelle à notre méthode est qu'il n'existe pas de produit de référence (normé) qui puisse servir de base de comparaison. Pour le calcul des scores de qualité, nous avons effectivement comparé les 29 produits entre eux et les valeurs obtenues dépendent des individus en présence. Aussi, afin de standardiser cette méthode il serait souhaitable de réaliser une comparaison deux à deux, d'un produit de référence avec le produit étudié.

III.5. Identification des contributeurs qualité par analyse en composantes principales

Suite au calcul des scores de qualité, nous avons souhaité identifier les paramètres qui y contribuent le plus.

Comme nous en avons discuté en section II.4.2. , cette identification est une recherche de relations entre le score QOC (section III.4.2.) et les caractéristiques des produits, caractéristiques que nous avons collecté par approche de rétro-ingénierie avant de les intégrer dans une analyse en composantes principales (ACP).

III.5.1. Rétro-ingénierie

En nous appuyant sur l'approche évoquée en section II.4.1. et en la précisant pour le cas des T-shirts (structures tricotées), la procédure se résume comme suit (Table 22) :

Source	Information collectée	Unité	Méthode
Produit fini et étoffe principale	Composition	%	FD CEN ISO/TR 11827
	Procédé de fabrication	-	
	Liage	-	Observation
	Gauge	aiguille/pouce	Calculée à partir de [154]
	Densité de mailles en colonne	colonnes/pouce	
	Densité de mailles en rangée	rangées/pouce	NF EN 14971
	Densité de mailles	mailles/pouce ²	
	Epaisseur	mm	NF EN ISO 5084
	Masse surfacique	g/m ²	NF EN 12127
Couture de côté	Type	-	
	Nombre de fils	-	NF ISO 4915
	Densité	points/ pouce	
Détricotage de l'étoffe			
Fil	Longueur de fil absorbée	cm/maille	NF EN 14970
	Procédé de fabrication	-	
	Nombre de bouts	-	
	Titre (masse linéique)	Nm	NF EN 14970
	Taux de torsion	tr/m	NF G 07-079
	Ténacité	cN/Tex	NF EN ISO 2062

Table 22 : Paramètres de fabrication des T-shirts

Certains T-shirts n'ont pu être totalement déconstruits à cause de leur caractère indémaillable. Les valeurs manquantes correspondantes ont donc été remplacées par les moyennes des deux plus proches voisins, identifiés par le calcul des distances euclidiennes (calculées à partir des informations de composition, d'épaisseur et masse surfacique et de couture).

III.5.1.1. Vue d'ensemble

Pour avoir une vue d'ensemble des 29 T-shirts, nous présentons dans un premier temps un aperçu de la répartition des produits sur des caractéristiques d'ordre général (Table 23), puis dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux échelles fil (section III.5.1.2.), étoffes (section III.5.1.3.) et machines (section III.5.1.4.).

Certains éléments ressortent et peuvent être considérés comme des marqueurs dans la conception des T-shirts : les fils sont très majoritairement issus de la filature à anneaux (excepté les lins qui sont tous issus d'une filature au mouillé), principalement tricotés en maille cueillie et un liage jersey.

Composition	Nombre de T-shirts	(%)
Coton	17	58,6
Polyester	6	20,8
Lin	3	10,3
Mélange	3	10,3
Procédé de fabrication de l'étoffe principale		
Maille cueillie	28	96,5
Maille jetée	1	3,5
Liage		
Jersey	25	86,2
Côte 1*1	3	10,3
Non identifiée (maille jetée)	1	3,5
Procédé de fabrication du fil		
Filature à anneaux	22	75,9
Filature rotor	2	6,9
Multifilaments texturés (fausse torsion)	2	6,9
Filature au mouillé	3	10,3
Couleur		
Noir	13	44,8
Bleu foncé	7	24,1

Gris	5	17,3
Beige	1	3,5
Blanc	3	10,3

Table 23 : Vue d'ensemble de la population de T-shirts

III.5.1.2. Caractéristiques des fils

L'objectif n'étant pas de revenir sur les résultats produit par produit mais plutôt d'appréhender leur diversité, nous présentons dans la suite les résultats sous forme de boîte à moustaches. Nous revenons ainsi sur les valeurs de titre (Figure 45), de taux de torsion (Figure 46) et de ténacité (Figure 47).

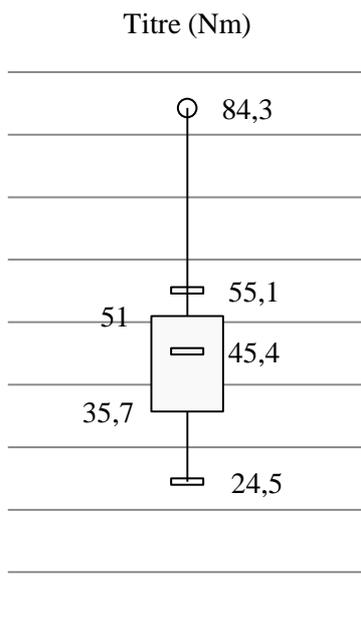


Figure 45 : Titre des fils

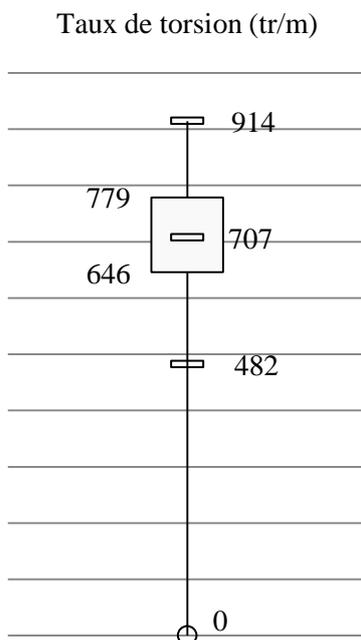


Figure 46 : Taux de torsion des fils

Les titres sont exprimés en Nm, ils ont été mesurés suite au détricotage des T-shirts à l'aide d'un maillemètre (pour mesurer leur longueur) et d'une balance.

La quasi-totalité des individus a une valeur de titre comprise entre le Nm24 et le Nm55. On remarque néanmoins une asymétrie vers le bas indiquant moins d'individus sur les titres inférieurs.

Les valeurs les plus basses correspondent aux fils les plus gros et proviennent des produits en lin. Une valeur aberrante est remarquable : le Nm84, un fil multifilaments de polyester. Les cotons et les polyesters sont répartis de manière homogène avec des valeurs de titre comprises entre le Nm31 et le Nm55.

Les taux de torsion ont été mesurés au moyen d'un torsiomètre par la méthode de la double contre-épreuve.

Les résultats présentent une répartition symétrique avec des fils de lin aux taux de torsion les plus faibles (470tr/m en moyenne) et des fils de coton et de polyester répartis de manière homogène.

Une seule valeur aberrante est observée avec aucune torsion, elle correspond au fil multifilaments évoqué précédemment puisque texturé avec une fausse torsion.

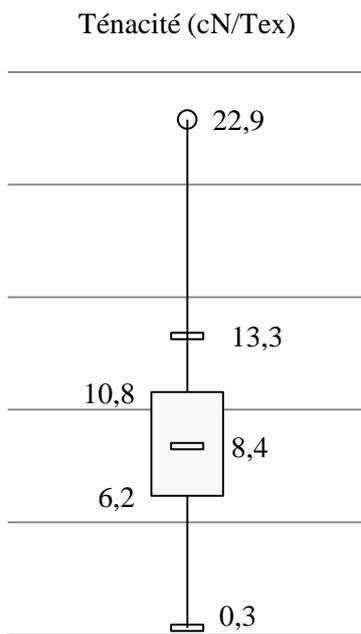


Figure 47 : Ténacité des fils

Enfin, la ténacité, calculée à partir de la force à la rupture des fils, ramenée au titre (en Tex), évolue sur une plage étendue allant de 0 à 13cN/Tex.

Quelques individus se distinguent ($\geq 18cN/Tex$), mais étant peu nombreux ils sont statistiquement considérés comme aberrants. Il s'agit d'un fil de lin et de trois fils en polyester. Le fil de coton le plus résistant étant obtenu à 13cN/Tex.

Les autres valeurs de ténacité semblent indépendantes de la matière.

Le fil le plus fragile est le polyester multifilaments, ne présentant pas de torsion il manque de cohésion dans l'axe longitudinal.

III.5.1.3. Caractéristiques des étoffes

De la même manière que pour les caractéristiques de fil, nous revenons ici sur les caractéristiques d'étoffes avec la longueur de fil absorbée (Figure 48), la densité de maille (Figure 49), l'épaisseur (Figure 50) et la masse surfacique (Figure 51).

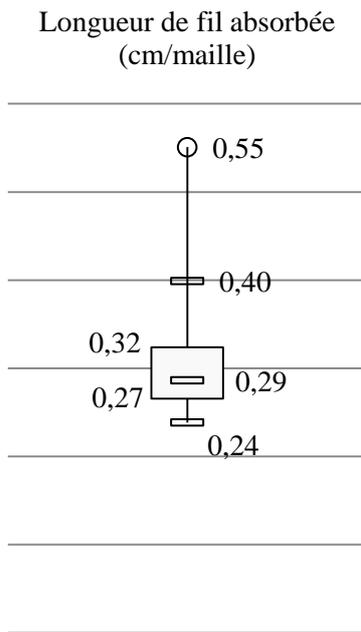


Figure 48 : Longueur de fil absorbée

La longueur de fil absorbée (LFA) présente un rapport 2 entre sa valeur haute et sa valeur basse.

Elle montre par ailleurs une asymétrie vers le haut, c'est-à-dire que la plupart des produits se concentrent sur les valeurs basses et ont donc des structures plus denses.

La LFA distingue assez bien les matières entre elles, avec par ordre croissant de LFA : les polyesters (0,25 en moyenne), les cotons (0,32) puis les lins (0,41).

La valeur aberrante provient de deux cotons en *Côte 1*1*, ce liage induit effectivement une longueur double par rapport au jersey.

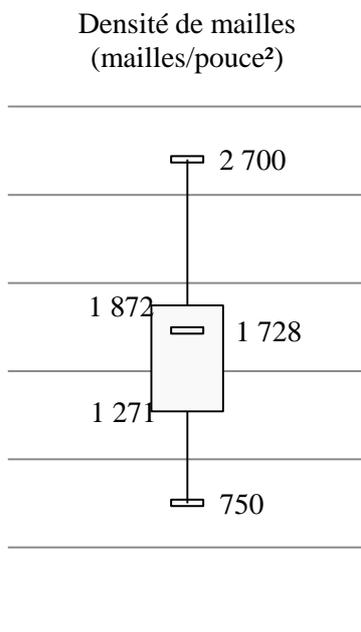


Figure 49 : Densités de mailles

La densité de mailles est calculée à partir du nombre de colonnes et de rangées observées sur une longueur d'un pouce.

Elle présente une gamme assez étendue de 750 à 2700 mailles/pouce². La répartition des matières est relativement homogène et seuls les lins se distinguent par des valeurs basses. Cette caractéristique est d'ailleurs visible à l'œil nu puisqu'ils présentent une certaine transparence.

La boîte à moustache présente une asymétrie inversée par rapport à la LFA puisqu'une LFA courte correspond à une plus grande densité et inversement.

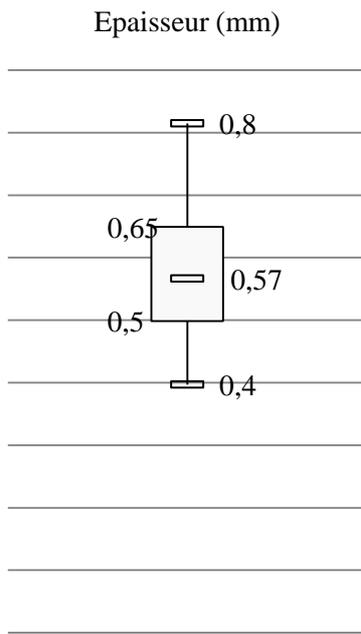


Figure 50 : Épaisseurs

L'épaisseur est sans doute la caractéristique la moins différenciatrice. La seule spécificité vient des *Côte 1*1* qui ont toutes une épaisseur importante ($\geq 0,73$).

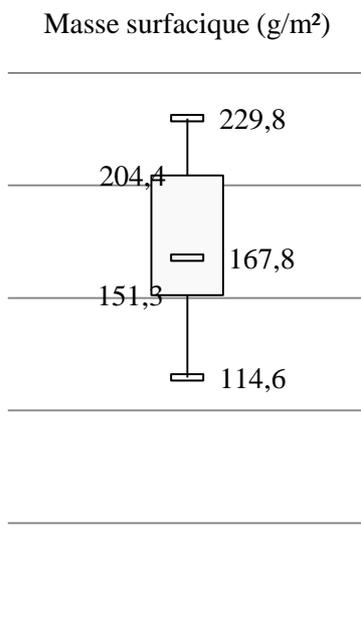


Figure 51 : Masses surfaciques

Enfin, la masse surfacique présente une étendue de valeur présentant un rapport deux entre les valeurs hautes et basses.

Elle différencie bien les produits en lins (206g/m² en moyenne) de ceux en polyesters (143g/m²). Les produits en coton montrent quant à eux de vastes possibilités, puisque pour un même liage on observe des différences pouvant aller jusqu'à 70g/m².

III.5.1.4. Paramètres machines associés

Partant des T-shirts, retrouver l'ensemble des paramètres machines est un exercice complexe. Nous avons ici calculé la jauge telle que présentée en Figure 52.

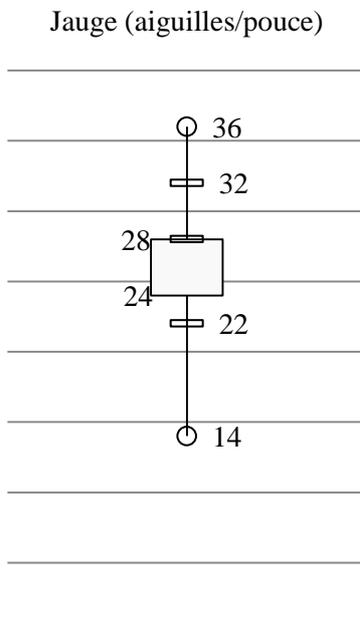


Figure 52 : Jauges calculées

Dans une étude concernant des produits jersey en coton Ucar et al. [183] a proposé une modélisation de la jauge. Nous nous en sommes servis pour calculer nos valeurs de jauge.

Les valeurs obtenues n'étant nécessairement des entiers et ne correspondant pas toujours à des jauges existantes, nous avons précisé ces valeurs.

La majorité serait ainsi issue de jauge entre 22 et 32 aiguilles/pouce. On constate également des valeurs aberrantes de chaque côté. En bas elle correspond aux produits en Côte I*I et en lin. En haut elle correspond au produit le plus dense.

III.5.1.5. Discussion

En menant cette approche de rétro-ingénierie, nous avons constaté certaines caractéristiques communes à la majorité des T-shirts. Ainsi la maille cueillie, la filature à anneaux et le liage jersey apparaissent comme des marqueurs de la conception des T-shirts. Dans notre recherche de paramètres influant sur la qualité, il pourrait être pertinent lors d'une prochaine étude de sélectionner les T-shirts de manière à couvrir davantage de possibilités.

De la même manière, nous avons ici limité notre étude aux produits en lin, en coton et en polyester et ce bien qu'il existe d'autres matières qui pourraient s'inscrire dans le contexte d'économie circulaire, tels que des mélanges issus du recyclage ou des matières bio-sourcées. Avec 3 T-shirts en lin, 6 en polyester et 17 en coton, nous savons par ailleurs que la répartition de nos produits n'est pas homogène. Aussi, nous considérons ce point comme étant à améliorer lors d'une prochaine étude.

Pour aller plus loin dans l'analyse et pour enrichir nos conclusions, nous devons également être en mesure d'obtenir des informations telles que la longueur et la finesse des fibres, la régularité des fils,

les vitesses de productions, les diamètres de métiers, les taux d'étirage ou encore le nombre de chutes. Autant d'informations que nous n'avons pas été en mesure de collecter et pour lesquelles des partenariats avec les industriels sont sans doute à envisager.

III.5.2. Identification des leviers pour un allongement de la durée de vie

Suite à la collecte des caractéristiques des produits et afin d'identifier l'existence de relations entre ces dernières et le score QOC, nous avons utilisé l'ACP.

Dans les sections suivantes, nous revenons sur la sélection des données avant analyse, ainsi que sur ses résultats.

III.5.2.1. Sélection des variables et adéquation de l'échantillonnage

Parmi l'ensemble des caractéristiques des T-shirts données en Table 22, le nombre de bouts et le liage ne seront pas utilisées dans l'ACP car respectivement non différentiateur et induite dans la valeur de LFA.

Restent ainsi à considérer les compositions, les caractéristiques (quantitatives) des fils et des étoffes et la valeur du score QOC. Toutes ces données ont été retranscrites dans une matrice M (Annexe 5) de tailles 29×14 , contenant précisément :

- la composition distinguée par
 - $x1$ le taux de coton (%) ;
 - $x2$ le taux de polyester (%) ;
 - $x3$ le taux de lin (%) ;
 - $x4$ le taux de viscose (%) ;
- les caractéristiques des fils
 - $x5$ le titre (Nm) ;
 - $x6$ le taux de torsion (tr/m) ;
 - $x7$ la ténacité (cN/Tex) ;
- les caractéristiques d'étoffe
 - $x8$ le caractère cousu ou seamless ;
 - $x9$ la densité de mailles (mailles/pouce²) ;
 - $x10$ la LFA (cm/maille) ;
 - $x11$ l'épaisseur (mm) ;
 - $x12$ la masse surfacique (g/m²) ;
- le paramètre métier

- x_{13} la jauge (aiguilles/pouce) ;
- la qualité
 - x_{14} le score QOC (sans unité).

L'adéquation de cet échantillonnage pour l'analyse ACP a été validée par le calcul de l'indice KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) et l'application du test de sphéricité de Bartlett [158], [184]–[186].

Par le calcul du seuil de signification (*p-value*), le test de Bartlett permet de confirmer que les variables sont corrélées significativement pour une factorisation et l'indice KMO mesure l'adéquation de l'échantillonnage pour l'ACP.

Après calcul de ces indicateurs sur la matrice M , nous obtenons les valeurs suivantes (Table 24) :

	Valeur calculée	Valeur seuil acceptable	
		> 0,9	Excellent
		< 0,9	Bon
Indice KMO	< 0,6	< 0,8	Moyen
		< 0,7	Faible
		< 0,6	Insuffisant
Test de Bartlett	$p - value < 2,22e^{-16}$	< 0,05	

Table 24 : Valeurs de l'indice KMO et du test de Bartlett pour la matrice M

L'indice KMO apparaissant comme insuffisant, la matrice a été modifiée pour une analyse cohérente. Les valeurs de composition étant obtenues par codage disjonctif complet nous les avons exclus dans une nouvelle matrice $MI (= M-x_1-x_2-x_3-x_4)$ et obtenons les résultats suivants (Table 25) :

	Valeur calculée	Valeur seuil acceptable	
Indice KMO	0,73	< 0,8	Moyen
Test de Bartlett	$p - value < 2,22e^{-16}$	< 0,05	

Table 25 : Valeurs de l'indice KMO et du test de Bartlett pour la matrice MI

Ces nouveaux résultats montrent que la matrice MI est plus à même de répondre aux besoins de l'ACP.

III.5.2.2. Résultat de l'ACP

L'analyse ACP nous a finalement permis d'obtenir deux premières composantes principales expliquant 65% de la variance (Figure 53). En traduisant un maximum d'information, elles sont celles qui nous intéressent le plus.

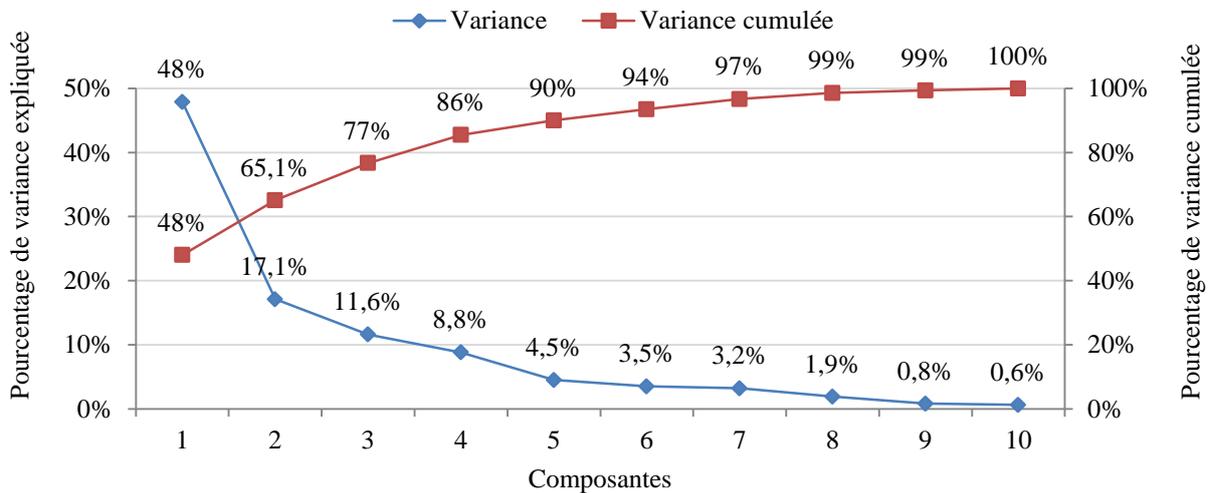


Figure 53 : Variance expliquée et cumulée par composante

Les relations des variables sur les deux premières composantes principales sont présentées sous forme de *biplot* en Figure 54. Les variables y sont représentées sous forme de vecteurs dont le sens et la longueur indiquent leurs contributions à l'une ou l'autre des composantes principales et les individus y sont représentés par des points, dont la couleur indique la matière.

La première composante explique la structure de l'étoffe, elle est effectivement bien corrélée avec la densité de maille, la jauge, la masse surfacique et la longueur de fil absorbée et la deuxième dimension s'explique davantage par les propriétés du fil, puisqu'elle est positivement corrélée à la ténacité du fil et négativement à son titre.

En utilisant la projection des individus, il est remarquable que les produits en lin soient parmi les plus lourds et les plus épais. Ils sont également marqués par une densité de maille relativement faible, causée d'une part par des limites techniques et par le fait que ce sont des produits associés à l'été. Nous remarquons d'ailleurs que cette densité n'est pas à leur avantage puisqu'ils ont été sujets à déformation. A l'inverse les produits en polyester présentent parmi les densités de mailles les plus élevées et les ténacités les plus grandes.

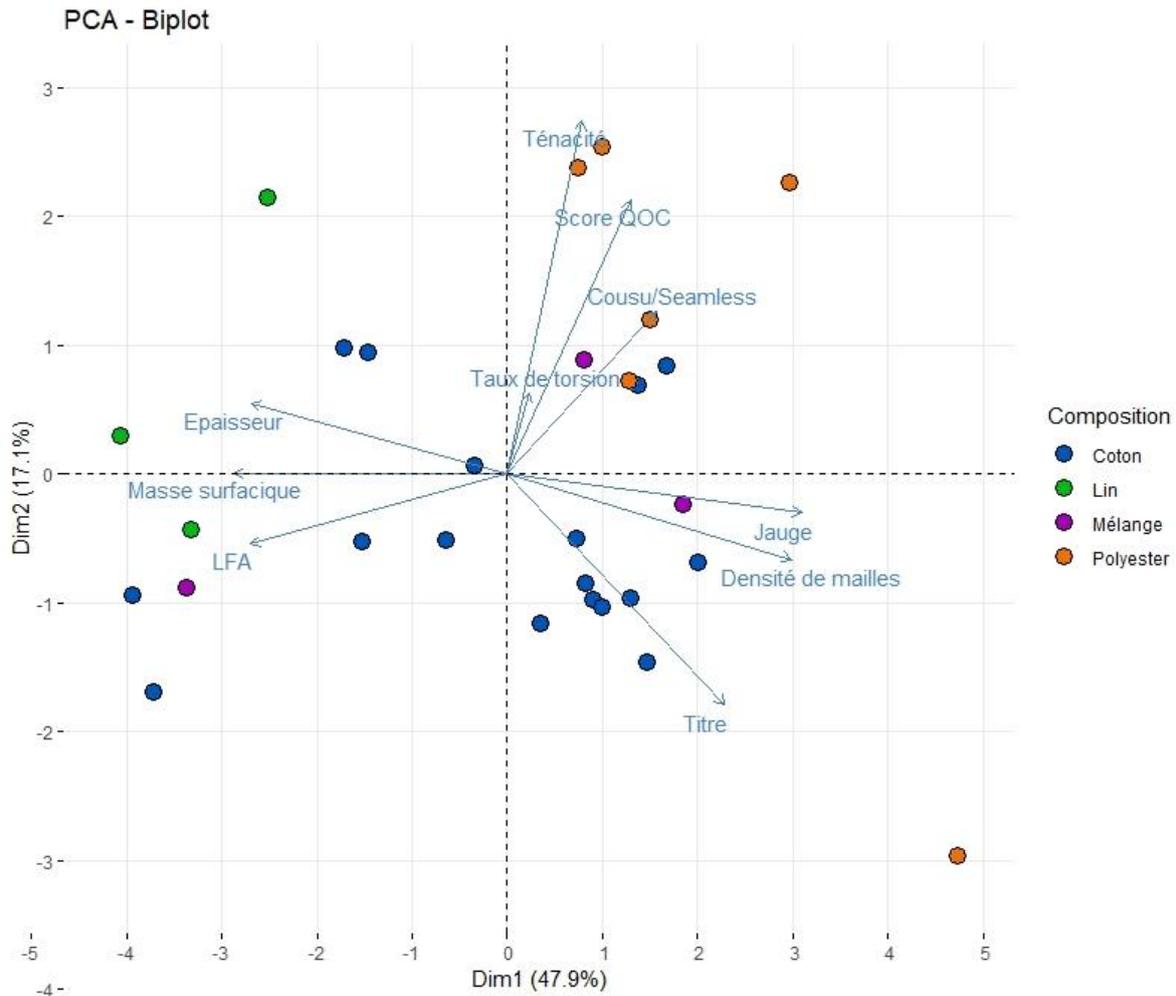


Figure 54 : Représentation de type *biplot* issue de l'ACP

III.5.2.3. Discussion

En considérant la projection des variables sur les composantes principales, nous constatons que le score QOC est davantage corrélé à la ténacité du fil plutôt qu'aux paramètres d'étoffe.

Nous avons néanmoins observé de bons scores QOC pour des produits dont les fils avaient de faible ténacité. En contrepartie ces produits présentaient une densité de maille élevée.

Cette observation m'amène à penser que la densité ne peut être omise dans nos conclusions. Une grande densité de mailles crée en effet d'autant plus de points de friction qui aident la structure à résister aux altérations mécaniques [187]. Conclusion par ailleurs partagée dans d'autres études se concentrant sur le vrillage et qui concluaient qu'une grande densité préserve de la déformation [188]–[190].

Afin d'allonger la durée de vie d'un T-shirts, il faudrait ainsi se concentrer sur ces deux paramètres : ténacité du fil et densité du tricot. Cela se traduit par l'utilisation d'un fil de bonne ténacité (c'est-à-dire composé de fibres longues ou elles même de bonne ténacité [191]), telle que le lin et le polyester [53] et pouvant être tricotée à travers une jauge importante (dans la limite du titre) avec une longueur de fil absorbée faible (réglage de serre). Le procédé de tricotage ne doit par ailleurs pas mettre en jeu un nombre de chutes trop important puisque ce paramètre influe directement sur le vrillage des produits [189].

III.6. Evaluation de la durée de vie des T-shirts

En dernier lieu, nous avons souhaité vérifier l'adéquation de notre score QOC avec la durée de vie des T-shirts et nous développerons dans cette section les résultats que nous avons obtenus suite à l'enquête d'évaluation de la durée de vie des T-shirts. Comme nous l'avons détaillé en section II.5. , nous proposons une évaluation de la durée de vie à partir d'une enquête consommateur après lavages des produits.

III.6.1. Procédure d'entretien

Les habitudes de lavages collectées (section III.2.2.1.) ont permis d'établir que les T-shirts sont majoritairement lavés à 40°C et séchés à l'air libre. Afin de se conformer à ce comportement, nous avons mis en place la procédure d'entretien suivante :

- Machine à laver Miele Softtronic modèle w3268 ;
- Programme *Textile foncé 40* (température de 40°C, durée d'environ 1h13min pour une charge maximale de 3kg et un volume d'eau de 60 litres [192]) ;
- Essorage de 400tr/min ;
- Eau décarbonée d'une dureté moyenne de 10°f (considérée comme douce) ;
- Lessive commerciale universelle, sélectionnée de manière aléatoire en s'assurant qu'une quantité suffisante à l'ensemble de nos lavages soit issue d'un même lot ;
- Dosage de la lessive réalisé suivant les préconisations de la marque, soit 70ml/cycle (60g) de lavage pour du linge moyennement sale lavé dans une eau de dureté moyenne à douce, avec un pH mesuré de 7,6 ;
- Si nécessaire, utilisation de charges en polyester pour atteindre une charge d'environ 2,5kg ;
- Séchage à l'air libre sur étendoir ;
- Pas de repassage.

Seul le choix de ne pas repasser, motivé par une question de temps, n'est pas représentatif puisque près de 40% des répondants ont déclaré repasser leur T-shirts.

Les 29 T-shirts ne pouvant être lavés ensemble, nous les avons divisés en trois lots :

- (1) Les cotons foncés ;
- (2) Les polyesters et coton clairs ;
- (3) Les lins et mélanges.

Les lots (2) et (3) étant plus petits, l'ajout de charges a été nécessaire pour atteindre un poids équivalent au lot (1), soit environ 2,5kg.

III.6.2. Résultats des enquêtes relatives au vieillissement des T-shirts

Pour rappel, l'enquête consistait pour les sondés à répondre à la question suivante :

« Au vu de l'état d'usure du produit, continueriez-vous à le porter ? »

Sachant que trois possibilités de réponses étaient acceptées :

- (a) Je le garde pour un usage normal ;
- (b) Je le garde mais pour un usage dégradé ;
- (c) Je ne le garde pas.

Trois sessions enquêtes ont été menées après respectivement 15, 30 et 50 lavages. Pour des raisons de praticité, nous avons fait intervenir un panel de consommateurs issus de notre institution. Malgré cela, il n'a pas été possible de garder les mêmes personnes lors des trois sessions : 25, 32 et 31 personnes ayant respectivement participé à la 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} session. Ces trois groupes disposent néanmoins d'un noyau commun de 18 personnes.

Pour chaque T-shirt, les taux de réponses suite aux trois sessions d'enquêtes sont représentés en figures Figure 55, Figure 56 et Figure 57. Nous remarquons que dès 15 lavages le niveau d'usure accumulée suffit pour affecter le caractère encore utilisable de bon nombre de T-shirts, puisque 15 produits ne réunissent pas au moins 50% de réponses positives pour un usage normal. Après 50 lavages, seuls 4 produits semblent encore satisfaire la majorité.

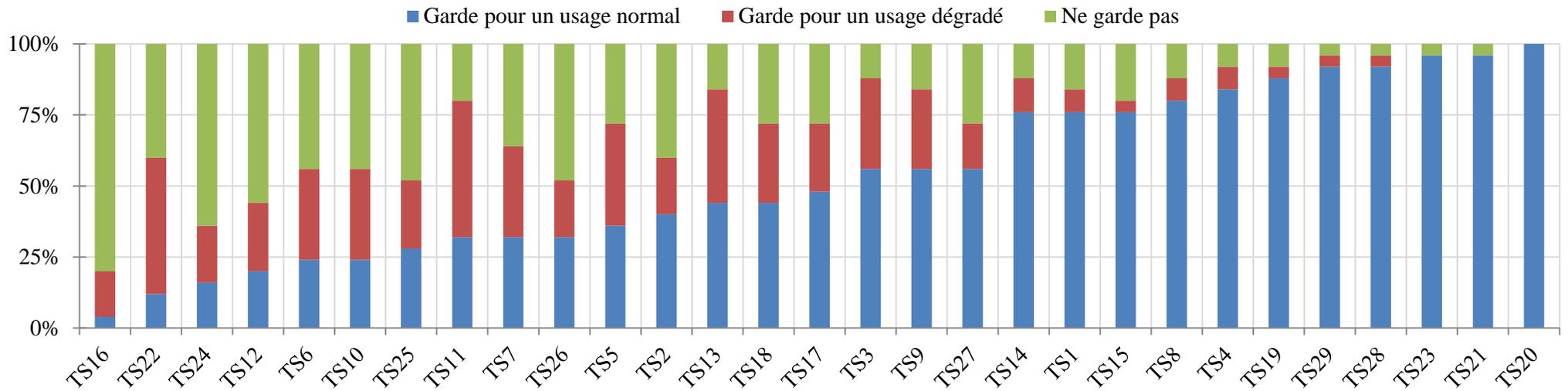


Figure 55 : Résultats de la session après 15 lavages

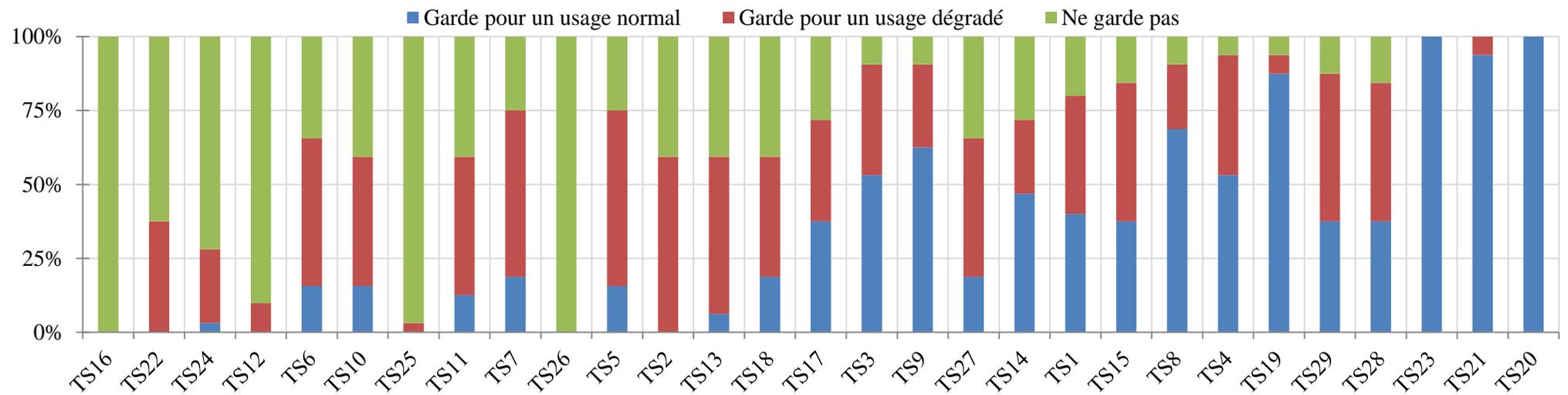


Figure 56 : Résultats de la session après 30 lavages

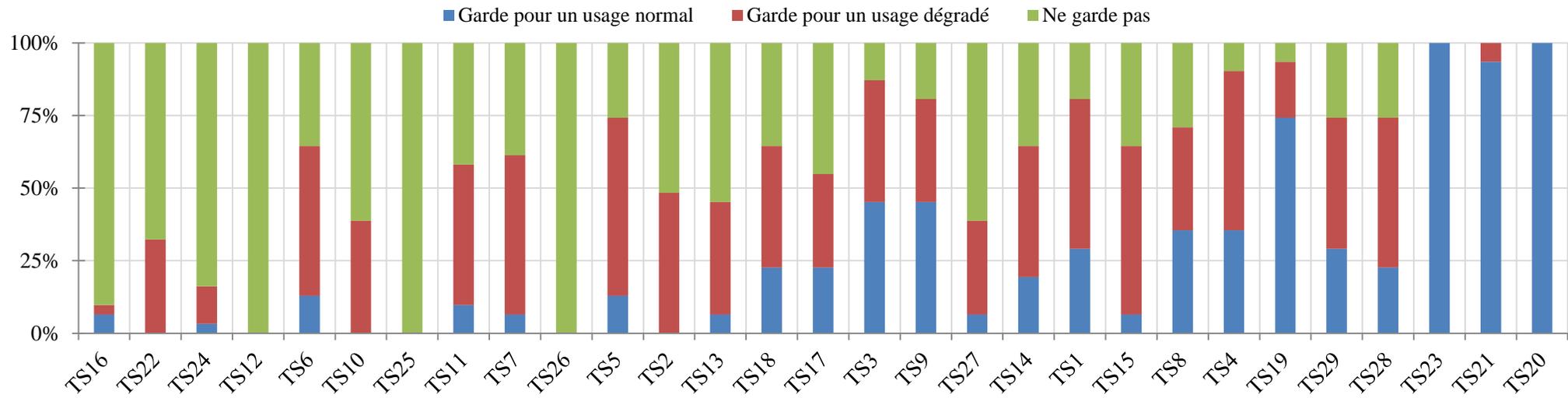


Figure 57 : Résultats de la session après 50 lavages

Pour une représentation plus explicite, nous proposons d'observer l'évolution de ces taux en nous concentrant sur les réponses favorables à un usage normal.

Deux figures sont présentées : les figures Figure 58 et Figure 59, elles distinguent respectivement les produits (décrits par les courbes) suivant que leur évolution soit plutôt exponentielle décroissante ou au contraire progressive.

En Figure 58, nous retrouvons ainsi 22 T-shirts, parmi lesquels 16 ne conviennent plus à la majorité après 15 lavages. Seuls deux restent après 30 lavages et aucun après 50.

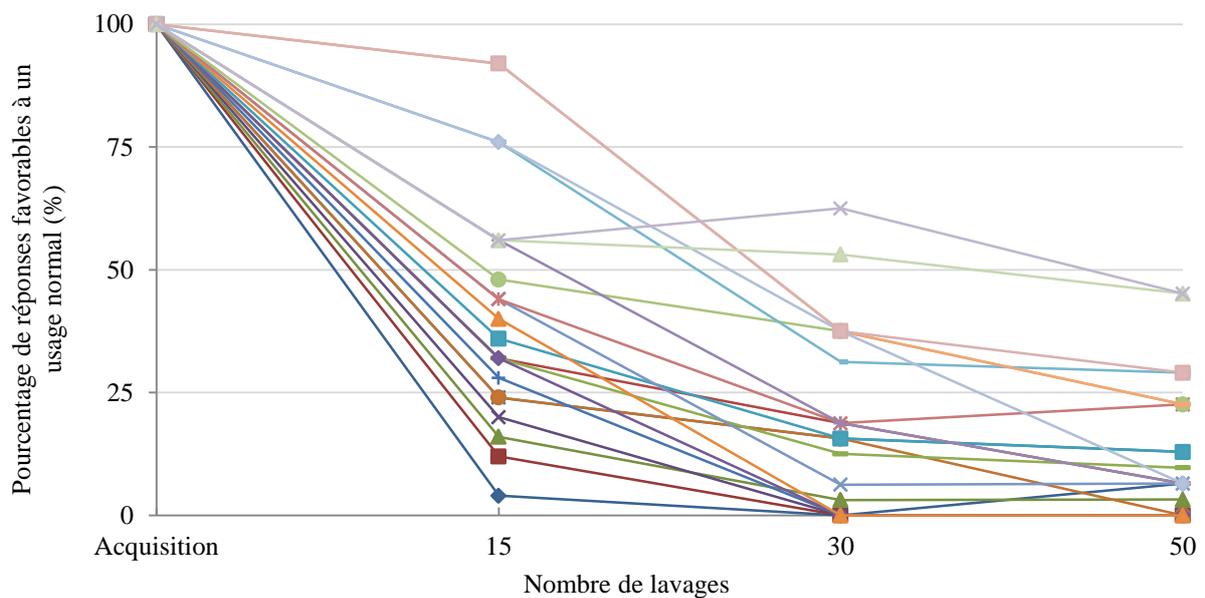


Figure 58 : Evolutions des réponses (a) après 15, 30 et 50 lavages de 22 T-shirts

En Figure 59, nous retrouvons les 7 T-shirts concernés par un comportement progressif. Ils semblent avoir des durées de vie plus importantes puisque seul un T-shirt ne fait plus consensus après 30 lavages et trois après 50 lavages.

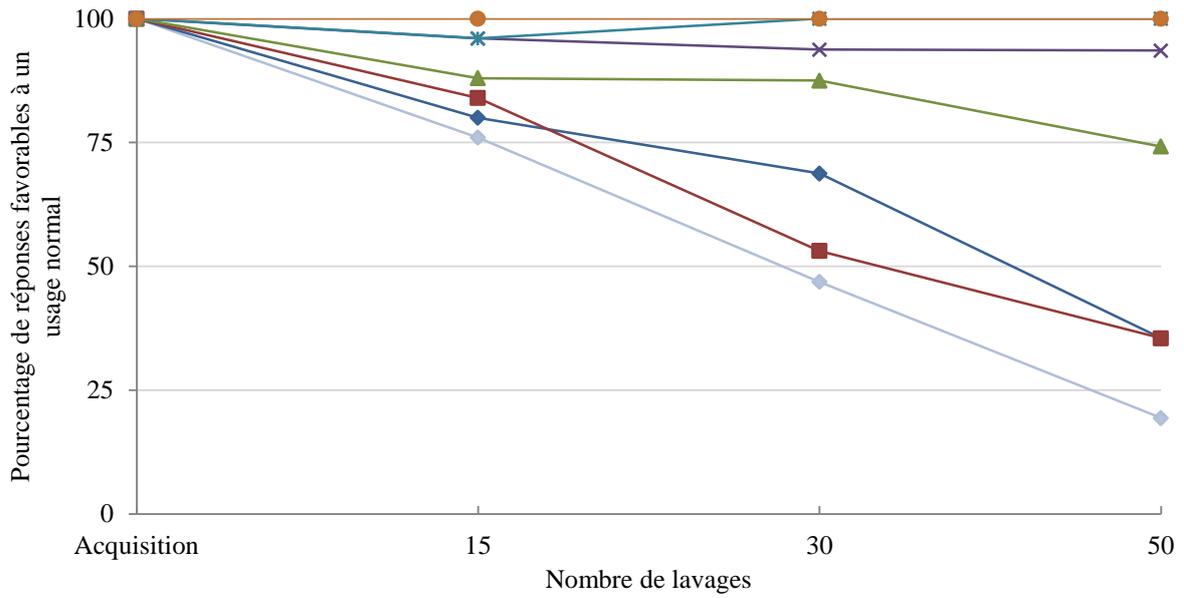


Figure 59 : Evolution linéaire des réponses (a) après 15, 30 et 50 lavages de 7 T-shirts

En se basant sur ces résultats ainsi que sur les écart-types des réponses (un écart-type important étant au désavantage du produit), nous avons émis trois classements de produits (Annexe 6) que nous avons agrégé par la méthode *Cross Entropy* basée sur la mesure de la distance de Kendall (section II.5.1.3.). Le classement final obtenu est illustré en Figure 60 et est comparé au classement que nous avons obtenu suite au calcul du score QOC. En se basant sur ces résultats, nous avons également estimé une durée de vie par produit.

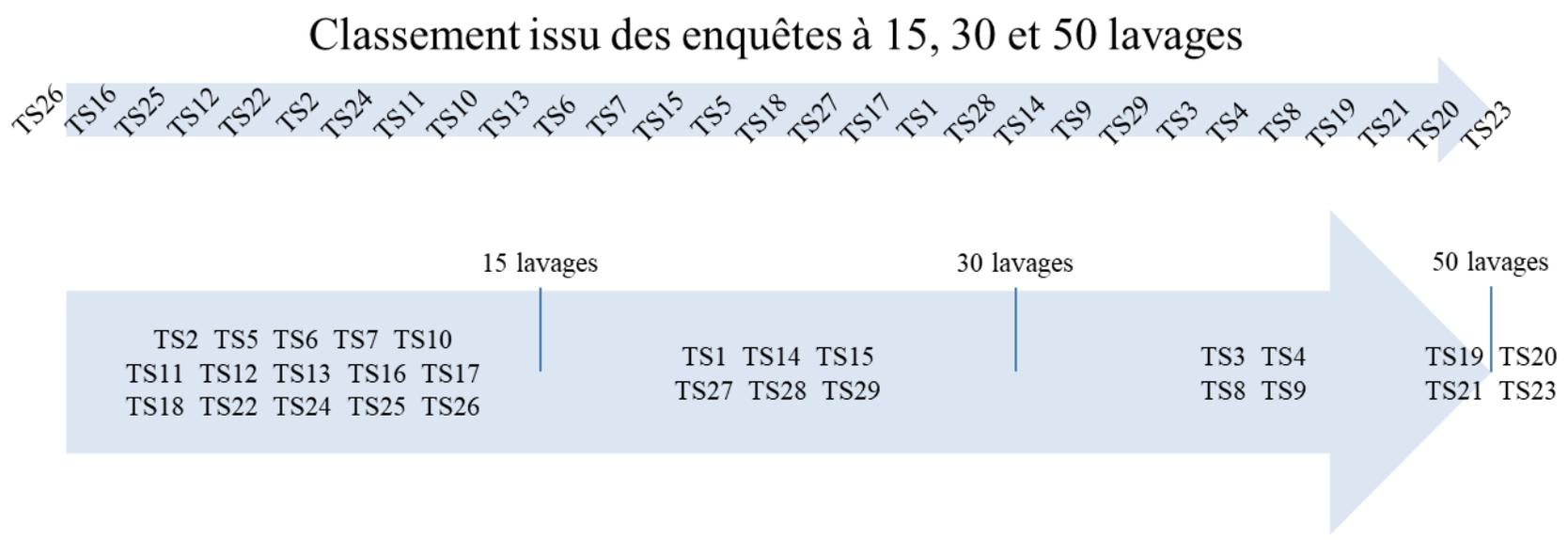
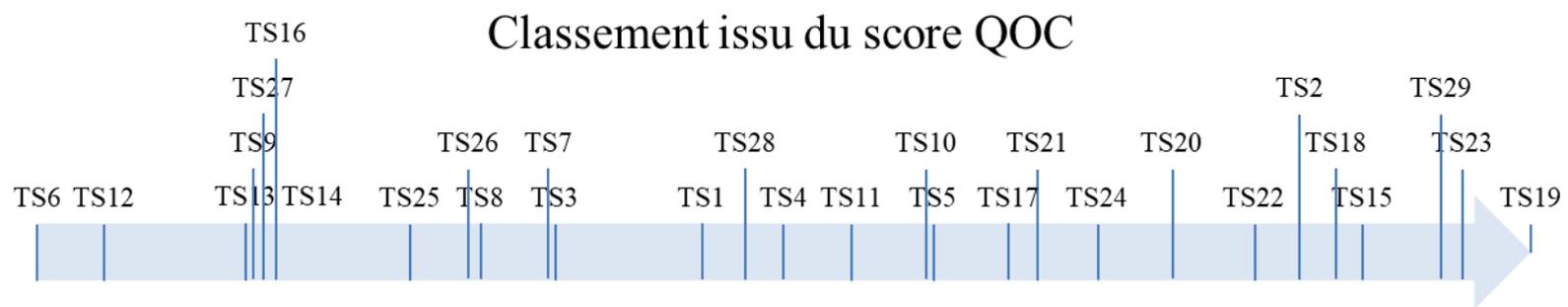


Figure 60 : Comparaison des classements issus du score QOC et de l'enquête de durée de vie

III.6.3. Discussion

Afin de vérifier l'adéquation du score QOC comme indice de durée normative, les T-shirts devaient être vieillis dans des conditions proches de l'usage. Par soucis de simplicité et de répétabilité, nous n'avons pas travaillé à partir de porté réel mais nous sommes concentrés sur un vieillissement par lavage. Nous constatons que nos résultats évoluent de manière significatives (figures Figure 58 et Figure 59), les T-shirts sont bien différenciés et apparaissent usés aux yeux des sondés. Notre procédure semble donc adaptée.

En mettant finalement en parallèle les classements issus du score QOC et des enquêtes (Figure 60), il apparait des différences significatives : seuls 12 T-shirts sur 29 obtiennent une bonne correspondance et 4 une correspondance prometteuse. Afin d'améliorer notre modèle, nous pouvons envisager la prise en compte de davantage de causes d'usure. En effet, lors des sessions d'enquête, le champ ayant été laissé libre aux sondés pour évaluer l'usure des produits, certaines causes, non prises en compte dans le score QOC, sont intervenues telles que : la déformation spécifique du col, la présence de fibrilles, la fronce des manches ou encore le toucher devenu rêche.

A travers ces résultats, nous sommes par ailleurs en mesure de constater une différence importante entre les durées de vie que nous avons estimées (Figure 60) et celles préconisées par les cadres méthodologies de la Commission Européenne et de l'ADEME [79], [84]. Ceux-ci fixent effectivement des durées de vie pour l'ACV de 50 et 52 lavages alors que seuls quatre T-shirts peuvent y prétendre dans ces travaux.

Nous signalons néanmoins que la comparaison est incomplète dans la mesure où nous ne connaissons pas les moments de début et de fin de vie pris en compte par ces cadres. Dans notre enquête, nous avons apporté une distinction entre usage normal et usage dégradé. Ainsi en ne tenant compte que de l'usage normal, pour éviter toutes hypothèses, nous avons obtenu les estimations de durée de vie en Figure 60. Peu de produits y réunissent plus de 50% de réponses favorables à 30 et à 50 lavages. Nous avons dans un deuxième temps considéré les usages normal et dégradé comme équivalents (Annexe 7). Dans ce cas la majorité des produits (19 sur 29) réunissent effectivement plus de 50% de réponses favorables après 50 lavages. Cela pose question quant à l'usage qu'il faut considérer.

Il serait par conséquent intéressant de déterminer les habitudes des Français relativement à la seconde vie de leurs produits. Il s'agirait entre autre de s'intéresser au nombre de produits dans les garde-robes destinés à un usage dégradé, de définir les utilisations possibles et les nouvelles contraintes d'usage puis de s'intéresser au vieillissement impliqué par le stockage.

Bilan du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre la méthodologie proposée au Chapitre II sur le cas des T-shirts. Nous nous sommes ainsi intéressés aux causes matérielles de fin de vies qui les concernent en nous appuyant sur une enquête consommateur ayant réuni 901 réponses. Nous avons étudié la dégradation de la couleur, la déformation, la déchirure des coutures, l'apparition de trou(s) et l'apparition de bouloches. Ce choix est certes limité mais dans la mesure où les habitudes recueillies ont été considérées comme représentatives [89] cela renforce la confiance que nous accordons aux résultats.

La perception de l'usure par le consommateur a été évaluée par la méthode de Fuzzy AHP, elle nous a permis de hiérarchiser le problème pour mieux l'appréhender et par l'utilisation de techniques floues de prendre en compte l'imprécision de l'évaluation humaine. Il en résulte que l'apparition de trou(s) et la déformation sont les deux causes principales de mise au rebut, suivies de la déchirure des coutures, la dégradation de couleur et enfin l'apparition de bouloches. La robustesse de ce résultat a été testée à travers six scénarios et bien que les contributions de chacune des causes aient quelque peu évoluées le classement est resté invariant.

La capacité des T-shirts à résister à ces cinq causes d'usure a été mesurée par une procédure métrologique de dix tests. Les performances ainsi collectées ont été intégrées à la méthode PROMETHEE II et pondérées par la perception du consommateur. De cette manière nous avons calculé un score unique de qualité par T-shirt, basé à la fois sur la connaissance du produit et celle du consommateur. Ce score dit QOC pour Qualité Orientée Consommateur s'est montré significativement différent d'un score unique de qualité uniquement basé sur les performances des produits. Comme dans le cas de la Fuzzy AHP, nous avons également testé la sensibilité du classement obtenu à travers 86 scénarios. Ayant constaté une certaine robustesse face aux facteurs de perturbation, nous avons été plus loin en cherchant des leviers d'optimisation de la méthode en limitant le nombre de performances à prendre en compte. Les résultats ont été plus mitigés et dénotent la complexité du modèle.

Nous avons par la suite cherché à identifier les contributeurs de qualité en nous basant sur le score précédemment établi. Les données de fabrication des T-shirts ont été collectées par rétro-ingénierie et associées aux scores QOC dans la méthode ACP. Il apparaît que le score QOC est corrélé à la ténacité des fils et à la densité de mailles. Nous pouvons ainsi apporter des recommandations sur la mise en œuvre des T-shirts pour maximiser leur qualité.

En dernier lieu, nous avons souhaité vérifier l'adéquation du score QOC comme indice de durée normative. Pour cela nous avons procédé à un vieillissement réel des T-shirts par l'intermédiaire d'une procédure d'entretien, à la suite de quoi nous avons fait intervenir un panel de consommateurs pour

juger de l'usure des produits. De cette manière, nous avons pu estimer les durées de vie des T-shirts en nous basant sur les réponses obtenues. En classant les produits nous avons pu noter que notre score ne traduit pas totalement les durées de vies estimées et nous avons déterminé des pistes d'améliorations à apporter.

Chapitre IV Analyses environnementales

Nous avons discuté au Chapitre I section I.5. de l'enjeu que représente la durée de vie dans une démarche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). Ce dernier chapitre est donc consacré à l'intégration des résultats du Chapitre III dans une telle démarche. Pour ce faire, nous nous concentrerons sur six des 29 T-shirts que nous précisons en parallèle du contexte et des objectifs de cette étude (section IV.1.). Pour répondre à nos besoins, nous nous sommes particulièrement attachés à la fabrication et à l'usage des produits. Nous avons ainsi modélisé six scénarios de fabrication et un scénario d'usage.

Comme le prévoit les normes ISO 14040 et ISO 14044, nous précisons les notions d'unité fonctionnelle (UF), de flux de référence ou encore de données d'inventaires de cycles de vie (ICV) (section IV.2. et IV.3.). Puis afin de quantifier l'influence de la durée de vie, nous présenterons les résultats statiques de l'ACV et diverses exploitations par lesquelles nous avons souhaité leur donner un sens plus dynamique : avec l'utilisation d'un diagramme cumulatif (section IV.4. et IV.5.) et la définition d'un point de bascule qui permet de rendre compte de la notion de surqualité des produits (section IV.6.).

IV.1. Objectifs et choix des produits

L'allongement de la durée de vie a d'ores et déjà été identifié comme un levier d'écoconception pour le secteur des textiles d'habillement [28], [30]. Notre étude n'a donc pas pour vocation de le réaffirmer mais plutôt de compléter les conclusions et méthodes autour de ce levier.

Notre objectif a ainsi été de quantifier l'influence de la durée de vie des produits et de mettre en évidence le bénéfice à long terme.

Pour répondre à notre besoin et en nous appuyant sur les conclusions du projet IMPRO Textiles, nous avons restreint le périmètre de nos modélisations aux étapes de fabrication et d'usage. Il a effectivement été identifié, lors de ce projet, que ces deux étapes sont les plus contributrices à l'impact environnemental du secteur textile habillement (Figure 61) [193].

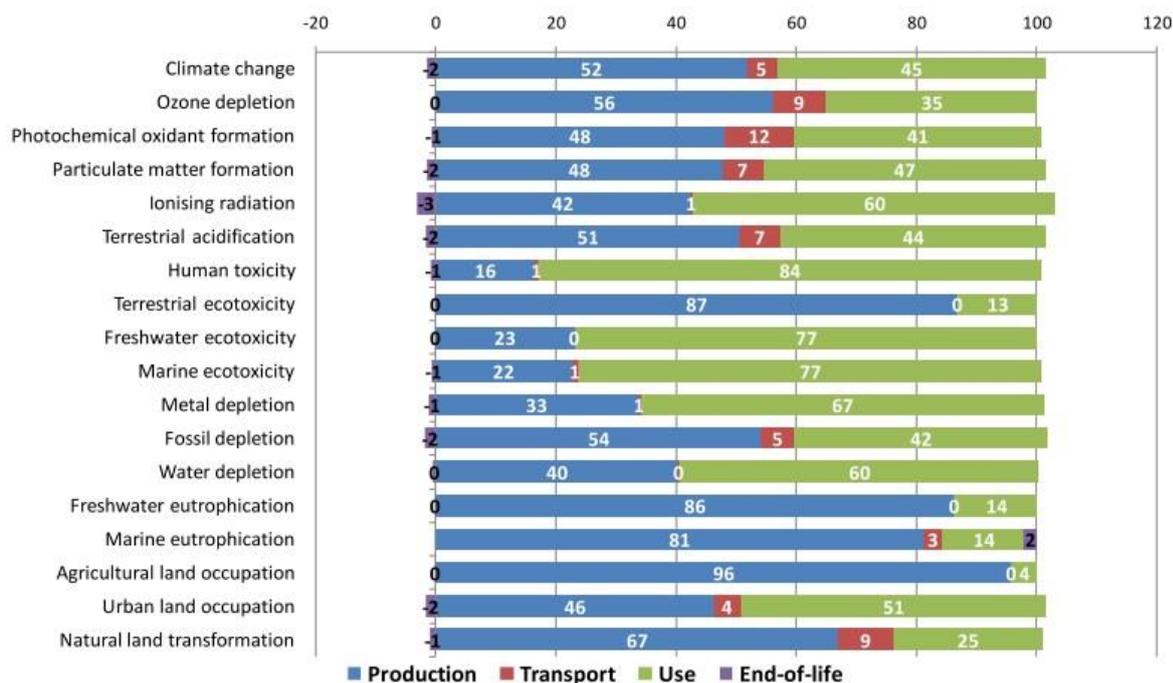


Figure 61 : Impacts de la consommation des textiles dans l'Europe des 27 [193]

Nous avons ainsi modélisé sept scénarios en ACV de manière à répondre aux questions suivantes :

- une durée de vie supérieure conduit-elle à un impact plus important à la fabrication ?
- quelles sont les conséquences d'une plus longue durée de vie à l'usage ?
- de la fabrication ou de l'usage, laquelle de ces étapes génère un impact supérieur ?

IV.1.1. Choix des T-shirts

Nous nous concentrerons sur six T-shirts sélectionnés en fonction de leurs durées de vie (courte ou longue) : deux T-shirts en coton, deux en lin et deux en polyester.

Nous avons par conséquent modélisé six ACV dites *cradle to gate*, qui correspondent aux fabrications des T-shirts, depuis l'extraction de matière première jusqu'à la confection, ainsi qu'une ACV de l'usage, correspondant à l'entretien des T-shirts.

Les données d'inventaire disponibles pour les textiles d'habillement n'étant pas toujours suffisamment détaillées d'un point de vue technique (jauge, densité de mailles, titre du fil, etc.) [194], ces six T-shirts ont été choisis les plus proches possibles : par matière, ils ont au moins en commun leurs liages et couleurs.

Le choix s'est ainsi porté sur les TS3, TS6, TS18, TS20, TS24 et TS25 (Table 26).

T-shirt n°	TS3	TS6	TS18	TS20	TS24	TS25
Composition	100% Coton		100% Polyester		100% Lin	
Procédé de fabrication de l'étoffe	Maille cueillie					
Liage (étoffe principale)	Jersey					
Jauge (aiguilles/pouce)	28	32	36	28	16	16
Densité de mailles (maille/pouce ²)	1989	1824	2700	1672	750	810
Epaisseur (mm)	0,5	0,5	0,4	0,56	0,6	0,65
Masse surfacique (g/m ²)	190,6	152,1	114,6	151,2	204,5	205
Couleur	Noir		Gris		Bleu marine	
Procédé de fabrication du fil	Filature à anneaux		Multifilament	Filature à anneaux	Filature au mouillé	
Titre fil (Nm)	49,6	53,7	84,3	45,3	27	25,7
Durée de vie évaluée (nombre de lavage)	30 ≤ ≤ 50	≤ 15	≤ 15	50	≤ 15	≤ 15
Score QOC	-0,16	-0,45	0,34	0,23	0,19	-0,27

Table 26 : T-shirts sélectionnés pour l'ACV

IV.2. Modélisation de la fabrication des T-shirts

Comme évoqué au Chapitre II section II.6. , la méthodologie ACV est encadrée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Elle repose notamment sur la définition d'une unité fonctionnelle et d'un flux de référence qui permettent d'exprimer le bilan matières et énergies d'un produit.

Dans la suite, nous détaillons ces éléments et revenons sur les données d'inventaire utilisées dans nos modélisations.

IV.2.1. Unité fonctionnelle et flux de référence

S'agissant de modéliser six procédés de fabrication de T-shirt, nous avons défini une UF commune, sur la base d'une taille désirée. Ce choix est en effet plus adapté pour un produit fini acheté sur ce critère [194]. Pour affiner davantage l'UF, la surface d'étoffe est par ailleurs précisée :

« Fabriquer 1 T-shirt de taille XL, représentant une surface d'étoffe de $1,7\text{m}^4$ »

Un flux de référence de 1 T-shirt est ainsi nécessaire pour chaque modélisation (Table 27).

T-shirt	TS3	TS6	TS18	TS20	TS24	TS25
Flux de référence	1 T-shirt					
Masse de produit correspondant (g)	324	259	195	257	348	349

Table 27 : Flux de référence par T-shirt

IV.2.2. Hypothèses

Les six chaînes de fabrication sont présentées en Table 28. Pour des questions de disponibilité des données, nous avons considéré :

- une fabrication identique des deux produits en coton ;
- une fabrication identique des deux produits en lin, partiellement commune à celle du coton ;
- une fabrication par T-shirt en polyester, différenciée par les procédés de filage et filature.

Pour chaque scénario, les pertes associées à chaque étape de fabrication ont été prises en compte.

⁴ Surface moyenne mesurée sur 10 des T-shirts analysés

T-shirt	TS3 & TS6	TS24 & TS25	TS18	TS20
Matière première	Culture du coton	Culture du lin (France)	Synthèse du polyester	
Extraction des fibres	-	Teillage (France)	-	
Fabrication du fil	Filature conventionnelle (filature à anneaux)	Filature au mouillé	Filage en voie fondue	Filage + filature
Tricotage	Tricotage circulaire (maille cueillie, liage jersey)		Tricotage circulaire (maille cueillie, liage jersey)	
Ennoblement	Ennoblement en bac à tourniquet ou dans un appareil de type jet, avec utilisation de colorants réactifs		Ennoblement dans un appareil de type jet, avec utilisation de colorants dispersés	
Confection	Découpe et assemblage par couture		Découpe et assemblage par couture	

Table 28 : Vue d'ensemble des chaînes de fabrication pour les trois systèmes

Nous avons par ailleurs fixé la Chine comme pays de production des T-shirts. En effet bien que le secteur textile ait une activité particulièrement globalisée [195], [196], la Chine n'en reste pas moins l'un des principaux pays producteurs de vêtements et l'un des principaux fournisseurs en France [49]. Ainsi sauf mention contraire (Table 28) tous les procédés ont été modélisés avec le mix énergétique chinois.

Avec cette même volonté d'affiner nos modélisations, je propose qu'en nous appuyant sur les évaluations des durées de vie (section III.6.), nous fixions une valeur pour chaque T-shirt (Table 29).

T-shirt	TS3	TS6	TS18	TS20	TS24	TS25
Durée de vie	30	15	15	50	15	15

Table 29 : Valeurs des durées de vie par T-shirt

IV.2.3. Données d'inventaire et qualité des données

Pour chaque T-shirt, dit système, nous revenons ci-après sur les données d'inventaire utilisées. Les sections IV.2.3.1. , 0 et IV.2.3.3. reprennent respectivement les systèmes coton, lin et polyester. Nous y explicitons les chaînes de fabrication modélisées et discutons de la qualité des données d'autre part.

IV.2.3.1. Inventaire relatif aux systèmes coton

Les modélisations des T-shirts TS3 et TS6 sont exclusivement basées sur l'inventaire des flux issus du projet mené par Thinkstep et Cotton Incorporated [78]. Celui-ci avait pour objectif de développer et de publier des inventaires de cycle de vie globalisés de produits en coton.

Le rapport de ce projet mentionne explicitement les données collectées pour la fabrication de 1000kg de T-shirts jersey (d'une masse hypothétique de 225g chacun), depuis la production du fil, jusqu'au produit fini (Figure 62). L'inventaire proposé distingue six étapes :

- la production des fils, constituant un ensemble agrégé de données et comprenant :
 - l'ouvraison, le nettoyage et le mélange ;
 - le cardage ;
 - le peignage ;
 - le passage du ruban à la mèche, réalisé sur banc à broches;
 - la filature proprement dite (passage de la mèche au fil) réalisée sur continu à filer.
- le tricotage, non explicité comme circulaire mais que nous avons considéré comme tel tant les étoffes de T-shirts sont habituellement réalisées sur ces métiers [59] ;
- la préparation de l'étoffe à la teinture (prétraitement) ;
- la teinture sur appareil de type jet avec utilisation de colorants réactifs ;
- un traitement de finition (ayant ici pour fonction d'adoucir l'étoffe) ;
- la découpe de l'étoffe et l'assemblage du T-shirt.

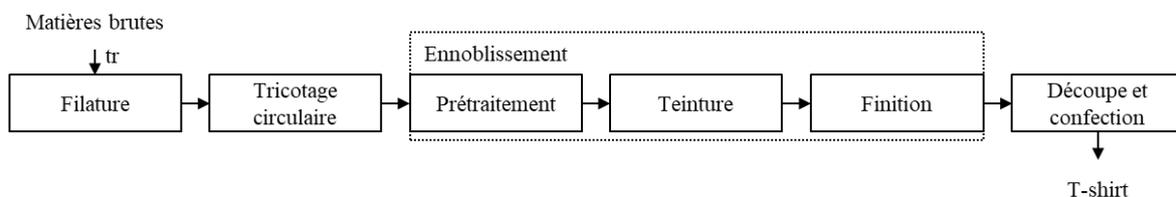


Figure 62 : Chaîne de fabrication du T-shirt coton [78]

L'inventaire de la culture du coton n'ayant pas été publié, nous nous sommes appuyés sur une donnée de la base ecoinvent (Table 30) qui nous permet d'obtenir l'équivalent de la matière brute (Figure 62) distribuée sur le site de transformation.

	Source	Nom
Production de matières premières	ecoinvent	Cotton fibre {GLO}, market for, alloc rec S

Table 30 : Donnée exploitée pour la production de matière brute coton

Comme évoqué au Chapitre II section II.6.1.2. , nous avons estimé la qualité de ces données par la méthode qualitative. Celle-ci prévoit de noter sur une échelle de 1 à 5 (1 étant la meilleure note) la qualité des données vis à vis de cinq critères.

S'agissant de données issues de mesures récentes et représentatives de plusieurs pays nous avons estimé des qualités variant entre 1 et 2 (Table 31). Nous avons néanmoins constaté un manque de précisions quant aux procédés spécifiquement utilisés et aux caractéristiques des produits fabriqués.

Indicateur	Evaluation	Commentaires
Fiabilité	2	Données issues majoritairement de mesures
Exhaustivité	1	Données provenant de 6 sociétés à travers le monde
Corrélation temporelle	2	Données des procédés textiles mesurées en 2015
Corrélation géographique	2	Les zones couvrent Eurasie, Asie de l'Est
Corrélation technologique	2	Données bibliographiques qui couvrent les matières et procédés nécessaires à notre étude

Table 31 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes coton

IV.2.3.2. Inventaire relatif aux systèmes en lin

Dans le cas des T-shirts en lin, TS24 et TS25, nous n'avons pas trouvé de données publiques récentes correspondant à une chaîne de fabrication complète d'un T-shirt en lin⁵. Par conséquent et étant donné la nature locale de cette matière, nous avons envisagé une collecte de données primaires auprès d'acteurs de la filière.

Nous avons finalement pu collecter des données relatives aux étapes d'extraction des fibres (teillage) et de filature (Figure 63), que nous avons moyennées avec les données de la littérature plus ancienne ([197], [198]) (Table 32).

Les étapes en amont et en aval sont basées, quant à elles, exclusivement sur des données secondaires :

- l'étape de culture, modélisée à partir d'études ACV existantes ([197]–[199]) et de la littérature spécialisée ([200]) (Table 32) ;
- les étapes post filature, présumées identiques à celles des systèmes coton. Elles ont été modélisées avec les données évoquées en section IV.2.3.1. .

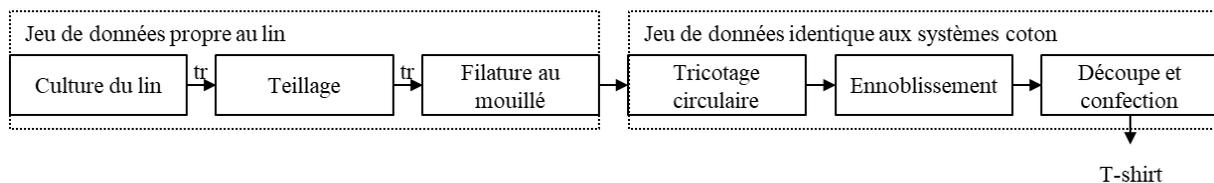


Figure 63 : Chaîne de fabrication des systèmes lin

⁵ Dans le contexte du projet PEF, des jeux de données propres aux différentes matières textiles dont le lin ont été développés et sont en cours d'approbation par la Commission Européenne. Ils n'étaient donc pas disponibles au moment de ces travaux.

L'approbation de ces données sera communiquée sur le site <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactList.xhtml>.

Culture de la matière	Extraction des fibres - Teillage	Filature au mouillé
<i>Source primaire</i>		
Origine	Entreprise française de teillage	Entreprise française de filature
Année d'obtention	2016-2019	2016-2019
Plage couverte	3 ans de production	9 ans de production
<i>Sources secondaires</i>		
ACV comparative de chemises en lin et en coton, réalisée par BioIS (2007) [197]		
ACV comparative des filatures du chanvre et du lin, réalisée par l'INRA (2006) [198]		
ACV comparative de panneaux de porte automobile, pour le compte de l'ADEME (2016) [199]		-
Guide technique consacré à la culture et au teillage du lin, réalisé par ARVALIS ⁶ (2013) [200]		-

Table 32 : Sources des données propres aux systèmes lin

De la même manière que précédemment, nous avons estimé la qualité de cet ensemble de données (Table 33). Les données étant de sources plus anciennes, plus diversifiées voire parfois basées sur des hypothèses, les qualités varient entre 2 et 4.

⁶ Arvalis – Institut du végétal est un institut technique ayant pour missions l'aide aux producteurs, la résolution de problèmes techniques et environnementaux ainsi que la recherche appliquée dans le domaine agricole

Indicateur	Evaluation	Commentaires
Fiabilité	3	Données partiellement basées sur des hypothèses notamment après la filature
Exhaustivité	4	Données issues de peu d'entreprises et de la littérature
Corrélation temporelle	4	Données datant au plus de 2006
Corrélation géographique	2	Données moyennes issues d'une zone incluant la zone de notre étude
Corrélation technologique	3	Procédés et matières partiellement conformes puisque chaîne de fabrication partiellement basée sur celle du coton

Table 33 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes lin

IV.2.3.3. Inventaire relatif aux systèmes polyester

Comme les systèmes coton, les modélisations des T-shirts TS18 et TS20 sont exclusivement basées sur des données secondaires. Elles sont cette fois issues du programme de recherche *Mistra Future Fashion* [74]. Celui-ci avait pour objectif d'identifier les leviers de progression du secteur textile suédois sur le plan environnemental. Les ACV de cinq produits représentatifs de ce marché ont à ce titre été réalisées, avec notamment un T-shirt en coton et une robe en polyester.

En nous basant sur les données d'inventaire de ces deux produits, nous avons pu former la chaîne de fabrication suivante (Figure 64) :

- la production de la matière polyester, obtenue par polycondensation de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol ;
- la fabrication du fil réalisée soit par :
 - filage par fusion et texturation pour former un fil multifilaments (cas du TS18) ;
 - filage, convertissage du câble et filature conventionnelle pour former un filé (cas du TS20) ;
- le tricotage d'une structure en jersey, réalisé sur métier circulaire ;
- la teinture réalisée sur appareil de type jet, avec utilisation de colorants dispersés, séchage et fixation ;
- la découpe de l'étoffe et l'assemblage du T-shirt.

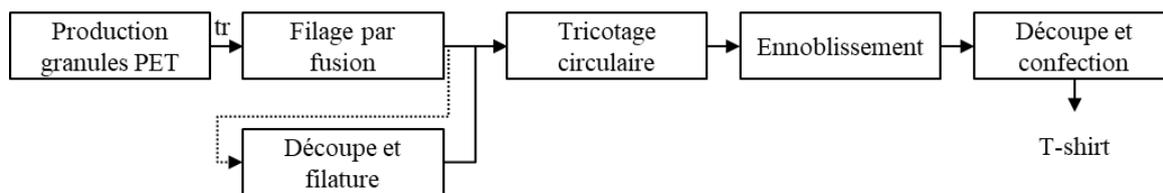


Figure 64 : Chaîne de fabrication des systèmes polyester

Les données sont ici aussi de sources assez anciennes, diversifiées et parfois basées sur des hypothèses. Pour cette raison, nous avons estimé des qualités variant entre 2 et 5 (Table 34) :

Indicateur	Evaluation	Commentaires
Fiabilité	3	Données partiellement basées sur des hypothèses puisqu'associant des paramètres de différentes sources
Exhaustivité	5	Représentativité non évoquée dans les documents de références utilisées par l'étude
Corrélation temporelle	5	Source de données datant au plus de 2003 (incluant des données jusqu'à 1998).
Corrélation géographique	2	Zone de l'étude inclue la Chine
Corrélation technologique	3	Technologies partiellement adaptées (tricotage circulaire) et matière identique à notre étude

Table 34 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour les systèmes polyester

IV.3. Modélisation d'un cycle d'usage des T-shirts

En parallèle de ces six scénarios et afin de quantifier l'influence de la durée de vie lors de l'usage, nous avons modélisé un « cycle d'usage » des T-shirts.

Un tel cycle englobe les événements de la vie d'un T-shirt qui ont une conséquence sur son état d'usure, c'est-à-dire qu'il équivaut à un certain nombre de portés, un lavage et éventuellement un séchage en machine et un repassage. Afin de rester cohérent, nous avons modélisé la procédure d'entretien discuté au Chapitre III section III.6.1. : un porté pour un lavage à 40°C et un séchage à l'air libre.

IV.3.1. Unité fonctionnelle et flux de référence

Nous avons fixé l'unité fonctionnelle correspondante :

« Utiliser et entretenir une fois un T-shirt »

Avec, dans chaque cas un flux de référence nécessaire de « 1 lavage d'un T-shirt ».

IV.3.2. Données d'inventaire relatives à l'entretien

La modélisation de ce cycle d'usage se base exclusivement sur des données secondaires, respectivement issues des documents de la Commission Européenne dans le cadre du PEF [79], de l'ADEME dans le cadre de l'affichage environnemental [84], du programme *Mistra Future Fashion* précédemment évoqué [74] et enfin du mode d'emploi de la machine utilisée dans notre étude [192].

En se basant sur ces références, nous avons estimé les qualités de données évoquées en Table 35 :

Indicateur	Evaluation	Commentaires
Fiabilité	-	Traçabilité des données incomplète
Exhaustivité	-	Traçabilité des données incomplète
Corrélation temporelle	4	Données utilisées datant au plus de 2007
Corrélation géographique	-	Traçabilité des données incomplète
Corrélation technologique	2	Données spécifiques à un lavage à 40°C, incluant celle de la machine utilisée

Table 35 : Evaluation de la qualité des données d'inventaire pour l'usage

IV.4. Analyse des impacts environnementaux

Une fois répertoriés, les flux mis en jeu sont traduits en impacts environnementaux potentiellement générés. Cette évaluation est réalisée au moyen de la méthode de calcul *ILCD 2011 Midpoint +*, choisie suivant les recommandations de l'ADEME et de la Commission Européenne [79], [84], [201], [202]. Elle couvre seize catégories d'impact répertoriées en Table 36. Toutes n'étant pas pertinentes pour notre étude, nous avons cherché à restreindre cette liste.

Catégorie d'impacts	Unité	Correspondance
Changement climatique	kg CO2 eq	estimation de l'augmentation de l'effet de serre
Appauvrissement de la couche d'ozone (stratosphérique)	kg CFC-11 eq	estimation de la dégradation de l'ozone stratosphérique par les émissions de substances telles que les gaz chlorés et bromés à longue durée de vie
Toxicité humaine - cancers	CTUh ⁷	rend compte des effets préjudiciables à la santé humaine liés à l'absorption de substances toxiques par inhalation d'air, ingestion d'eau et/ou d'aliments ou pénétration cutanée
Toxicité humaine – effets autres que cancers	CTUh	
Particules inorganiques respiratoires	kg PM2.5 eq	rend compte des effets nocifs pour la santé humaine des émissions de particules (PM)
Rayonnements ionisants sur la santé humaine	kBq U235 eq	représente les effets néfastes des rejets radioactifs
Rayonnements ionisants sur les écosystèmes	CTUe	
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	estimation de la formation d'ozone au niveau du sol, dans la troposphère.
Acidification de l'air	molc H+ eq	estimation des effets des substances acidifiantes
Eutrophisation terrestre	molc N eq	
Eutrophisation aquatique (eau douce)	kg P eq	estimation de la quantité de nutriments émis, qui atteignent ce compartiment final d'eau douce
Eutrophisation marine	kg N eq	quantité de nutriments émis, qui atteignent ce compartiment final marin (l'azote étant considéré comme le facteur limitant dans l'eau de mer)
Ecotoxicité aquatique	CTUe	estimation de la fraction potentielle d'espèces touchées, intégrée dans le temps et l'espace par unité de masse d'une substance chimique émise
Occupation des sols	kg C deficit	variation du taux de matière organique du sol
Epuisement des ressources en eau	m3 water eq	rareté de l'eau douce

⁷ Unité de toxicité comparative pour l'Homme

Epuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	kg Sb eq	quantité de ressources disponible pour un citoyen du monde
--	----------	--

Table 36 : Catégories d'impacts évaluées par la méthode ILCD 2011 Midpoint+

IV.4.1. Choix des catégories d'impacts

Pour nous aider dans cette sélection, nous nous sommes dans un premier temps appuyés sur les préconisations de l'ADEME et avons gardé le changement climatique et l'eutrophisation aquatique [84]. Puis, afin de compléter cette liste, nous avons calculés les valeurs d'impacts après normalisation.

Cette étape de normalisation est facultative en ACV. Elle permet de quantifier l'importance relative de chaque catégorie d'impact par rapport à un élément de référence [203], en général l'activité humaine.

Dans le cas de l'*ILCD 2011 Midpoint +*, les facteurs de normalisation sont basés sur les émissions et consommations de ressources de la population de l'Europe des 27 en 2010 [204].

De cette manière, nous avons calculé les valeurs représentées en Figure 65. Six des seize catégories d'impacts se détachent avec des valeurs cumulées supérieures à 0,01 : les deux indicateurs liés à la toxicité humaine, les particules inorganiques respiratoires, l'écotoxicité aquatique, les épuisements de ressources en eau et minérales, fossiles et renouvelables.

Nous avons donc sélectionné ces catégories excepté la toxicité humaine (effets non cancérigènes) à laquelle nous avons préféré l'acidification de l'air. Son importance relative suit celle des six évoquées et son niveau de robustesse est meilleur [201], [204].

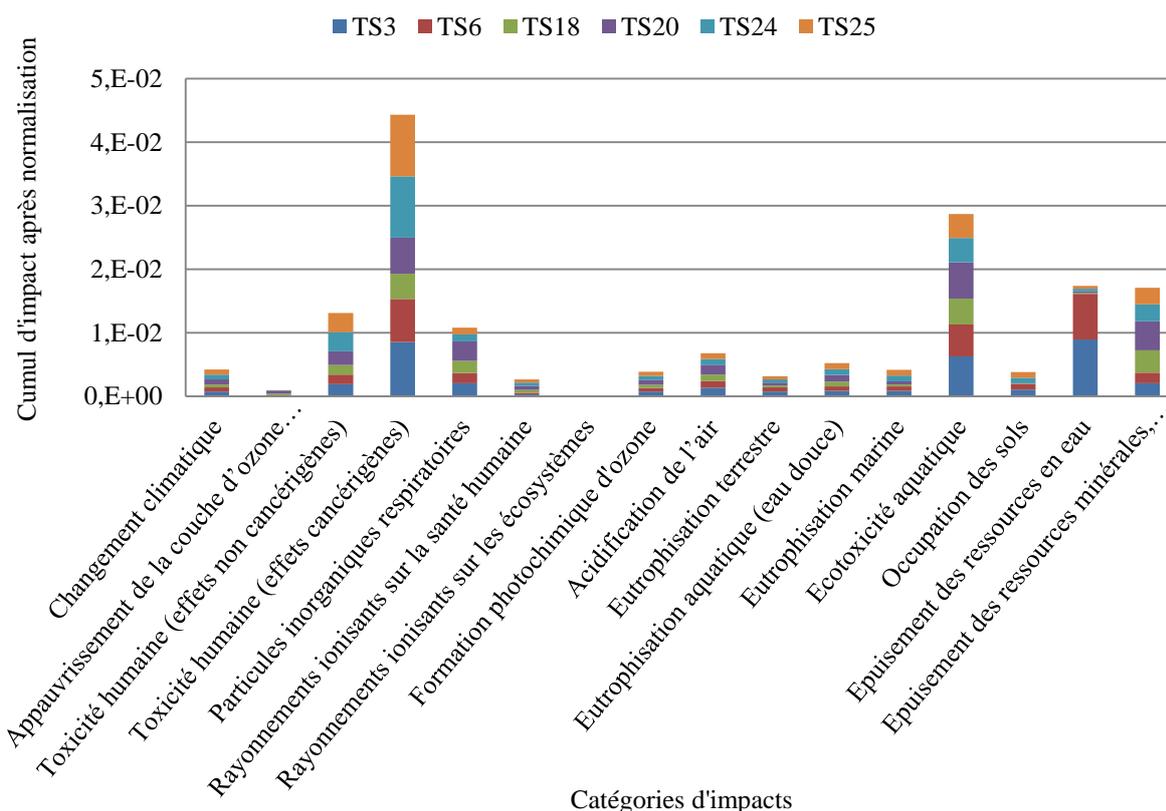


Figure 65 : Cumul d'impacts après normalisation

Finalement, huit catégories d'impacts présentant des niveaux de robustesses variés (Table 37) ont été sélectionnées pour cette étude.

Catégorie d'impact	Niveau de robustesse
Changement climatique	Très bon (I)
Toxicité humaine (effets cancérigènes)	Bas (II/III)
Particules inorganiques respiratoires	Très bon (I)
Acidification de l'air	Bon (II)
Eutrophisation aquatique (eau douce)	Moyen à bas (II)
Ecotoxicité aquatique	Bas (II/III)
Epuisement des ressources en eau	Moyen à bas (III)
Epuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	Moyen (II)

Table 37 : Niveau de robustesse associé aux catégories d'impacts [201], [204]

IV.4.2. Résultats d'analyses environnementales

Suite aux calculs des valeurs d'impacts sur ces huit catégories, nous proposons ci-après des comparaisons par paire de même composition, l'objectif étant d'évaluer et de quantifier l'influence de la durée de vie par matière.

IV.4.2.1. Comparaison des T-shirts en coton : TS3 et TS6

Les procédés de fabrication de ces deux T-shirts étant identiques, seules leurs masses et leurs durées de vie les distinguent (Table 38).

En considérant le T-shirt TS6 (de plus courte durée de vie) comme produit de référence et en affectant à ces résultats (masse et valeurs d'impacts) la valeur 100, nous avons quantifié que pour une durée de vie deux fois supérieure, le T-shirt TS3 génère un impact 25% supérieur lors de sa fabrication (Figure 66). Cette augmentation résultant directement de la différence de masse (Table 38).

	TS3	TS6 (référence)	Variation (%)
Masse (g)	324	259	+ 25
Durée de vie (nombre de lavages)	30	15	+ 100

Table 38 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS3 et TS6

Les fabrications étant identiques, nous ne pouvons obtenir de résultats plus précis à l'échelle des procédés. En revanche, comme de précédentes études [76], [78], [205], nous constatons que la culture du coton, la filature et l'ennoblissement sont les procédés les plus contributeurs, notamment au niveau des indicateurs de toxicité humaine, d'écotoxicité aquatique et d'épuisement des ressources en eaux (Figure 66) et ce sont sur lesquels il faudra s'attarder dans une analyse plus détaillée.

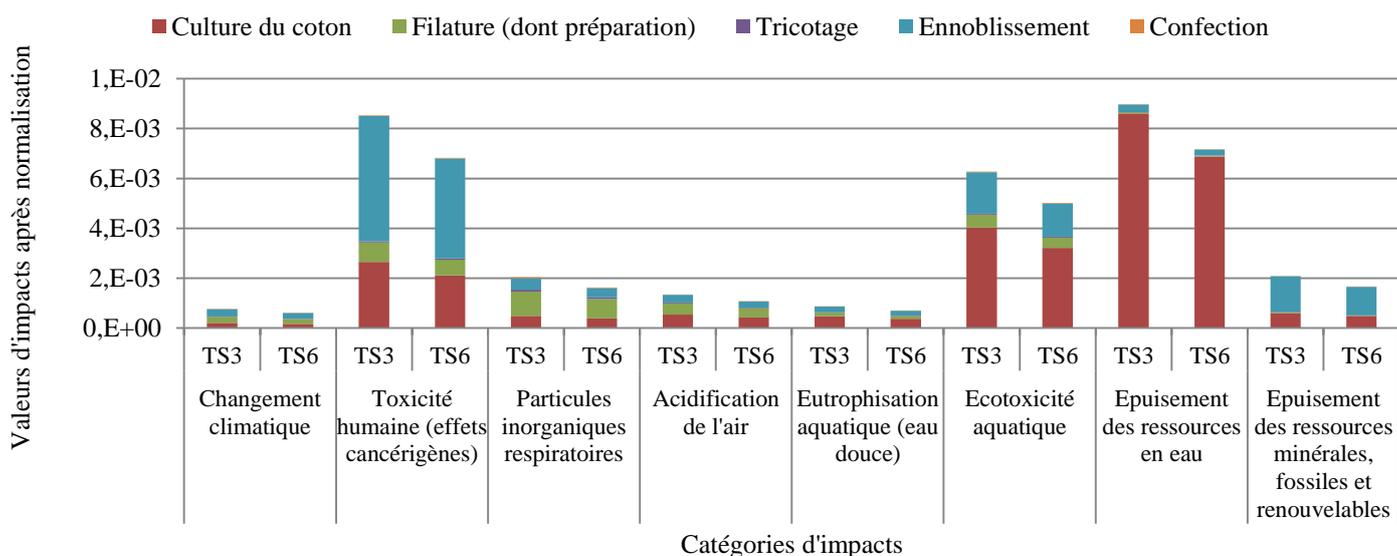


Figure 66 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS3 et TS6

Afin de rendre compte de l'influence de la durée de vie de chaque produit à l'usage, nous avons associé ces résultats à ceux de l'usage dans un diagramme cumulatif. De la même manière que des études comparant véhicules thermiques et électriques [206], [207] utilisaient ce type de graphique pour identifier le choix de motorisation le plus vertueux en fonction du kilométrage parcouru, nous pourrions identifier le « meilleur » T-shirt en fonction du nombre de lavages.

A titre illustratif, nous avons représenté le diagramme des impacts cumulés des TS3 et TS6 sur l'épuisement des ressources en eau (Figure 67).

Le TS6 ayant une durée de vie plus courte, il est régulièrement renouvelé et forme une courbe discontinue ayant l'allure d'un escalier. Chaque discontinuité correspondant à la re-fabrication d'un exemplaire de ce T-shirt et chaque palier correspondant à ses utilisations.

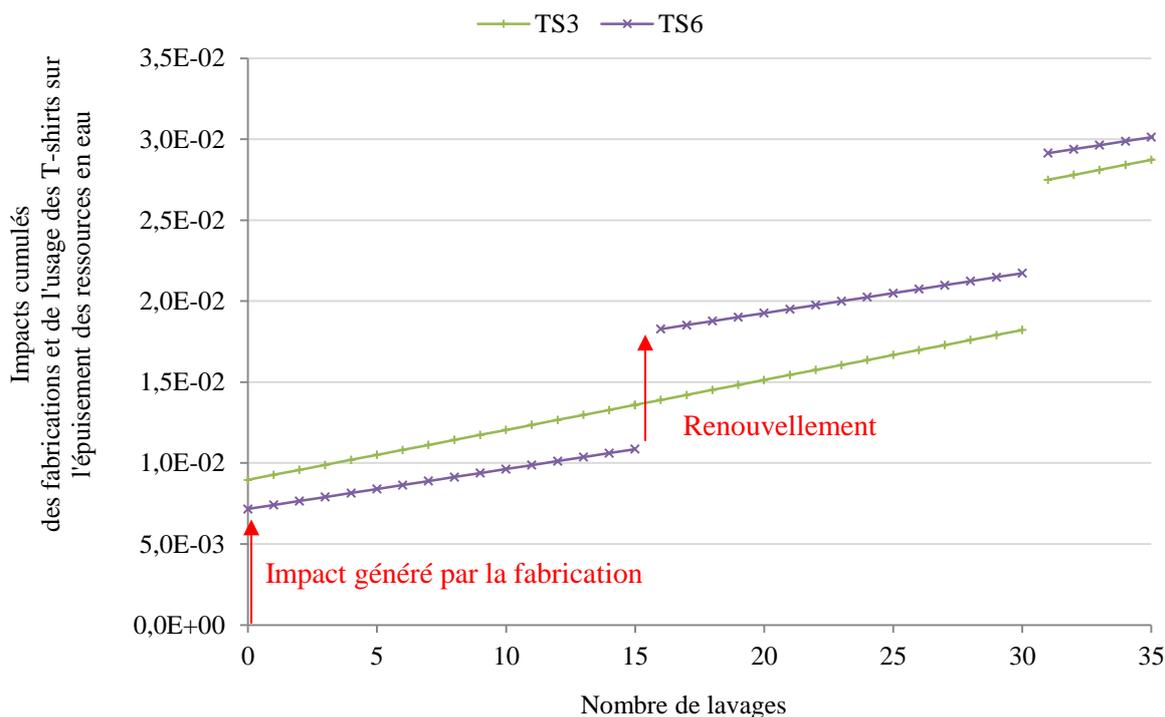


Figure 67 : Cumul de l'impact des TS3 et TS6 sur l'épuisement des ressources en eau au cours des lavages

Comme nous l'avons constaté précédemment, il apparaît que le TS3 génère un impact 25% supérieur à la fabrication, visible ici à 0 lavage.

L'usage étant modélisé identiquement, cette différence se maintient lors des quinze premiers lavages. Elle est néanmoins compensée au seizième lavage, puisqu'une re-fabrication d'un TS6 est nécessaire pour atteindre cette durée de vie. Ce premier renouvellement l'amène à cumuler un impact une fois et demi plus important. Cette différence ne fait par ailleurs que s'accroître tant que le TS3 ne nécessite pas de renouvellement.

Afin d'observer l'évolution de la situation, nous avons considéré le quotient de l'impact cumulé du TS6 sur celui du TS3 et l'avons représenté au cours des lavages (Figure 68).

En ayant une valeur supérieure à 1 quel que soit le nombre de lavages, la courbe qui en résulte met en évidence l'intérêt du T-shirt de longue durée de vie. Elle permet par ailleurs d'observer l'influence de chaque renouvellement de produit (représenté par les ruptures de pente) : leur importance relative diminue au fur et à mesure jusqu'à atteindre un équilibre. La valeur alors atteinte permet de quantifier le bénéfice à long terme d'un produit par rapport à l'autre. Dans ce cas précis, le TS6, de plus courte durée de vie génère finalement un impact 1,2 fois supérieur à celui du TS3, sur l'indicateur d'épuisement des ressources en eau.

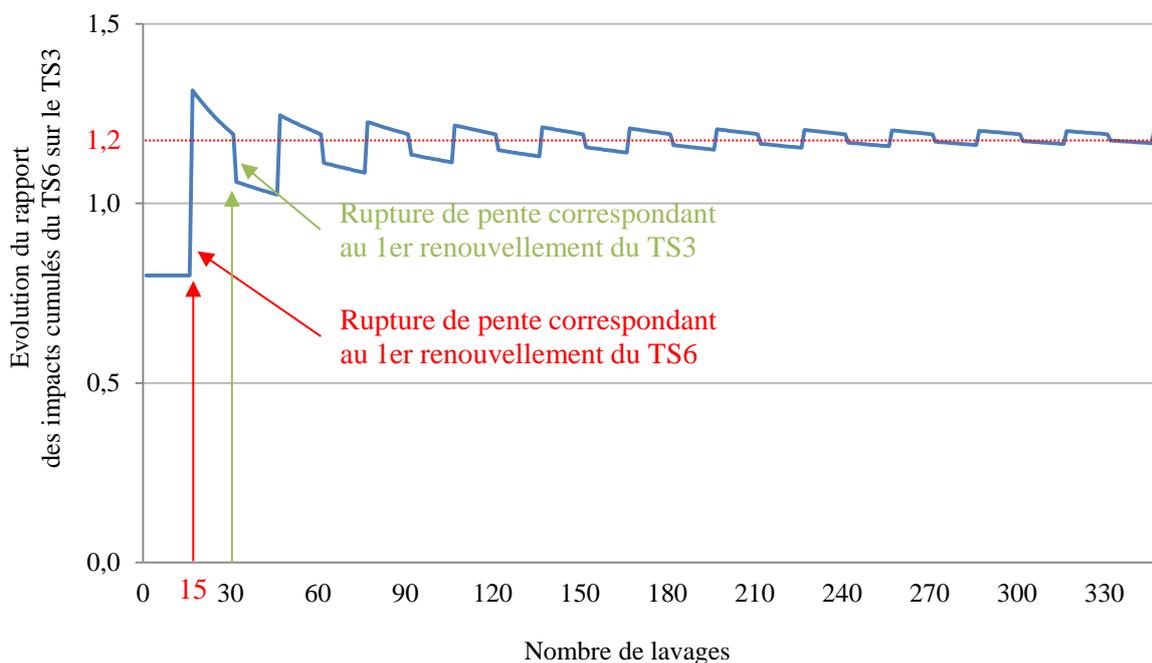


Figure 68 : Evolution du rapport des impacts cumulés du TS6 sur le TS3 sur l'épuisement des ressources en eau

Nous avons calculé la valeur du quotient sur l'ensemble des huit indicateurs sélectionnés à des moments clés (Table 39) : après fabrication (0 lavage), après le premier renouvellement du TS6 (16 lavages), avant le premier renouvellement du TS3 (29 lavages) et à terme.

Au vu des résultats, nous constatons que le TS6 n'est préférable qu'avant son premier renouvellement et qu'au-delà son impact cumulé est jusqu'à une fois et demi plus important que celui du TS3. Ce régime s'établit assez rapidement puisqu'à 29 lavages, cette tendance est déjà visible.

Catégorie d'impact	Quotient des impacts cumulés du TS6 sur le TS3			
	Fabrication	A 16 lavages	A 29 lavages	A terme
Changement climatique	0,8	1,6	1,5	1,5
Toxicité humaine (effets cancérogènes)	0,8	1,5	1,4	1,4
Particules inorganiques respiratoires	0,8	1,6	1,6	1,6
Acidification de l'air	0,8	1,6	1,6	1,6
Eutrophisation aquatique (eau douce)	0,8	1,6	1,5	1,5
Ecotoxicité aquatique	0,8	1,6	1,5	1,5
Epuisement des ressources en eau	0,8	1,3	1,2	1,2
Epuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	0,8	1,6	1,4	1,4

Table 39 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS6 sur ceux du TS3

IV.4.2.2. Comparaison des T-shirts en lin : TS24 et TS25

Nous avons traité le cas des T-shirts en lin de la même manière. Néanmoins, leurs modélisations étant identiques et leurs masses et durées de vie très proches (Table 40), les résultats sont moins probants : aucune variation n'est observée entre leurs impacts générés en fabrication (Figure 69).

	TS24 (référence)	TS25	Variation (%)
masse (g)	348	349	+ 0,3
Durée de vie (nombre de lavages)	15	15	+ 0

Table 40 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS24 et TS25

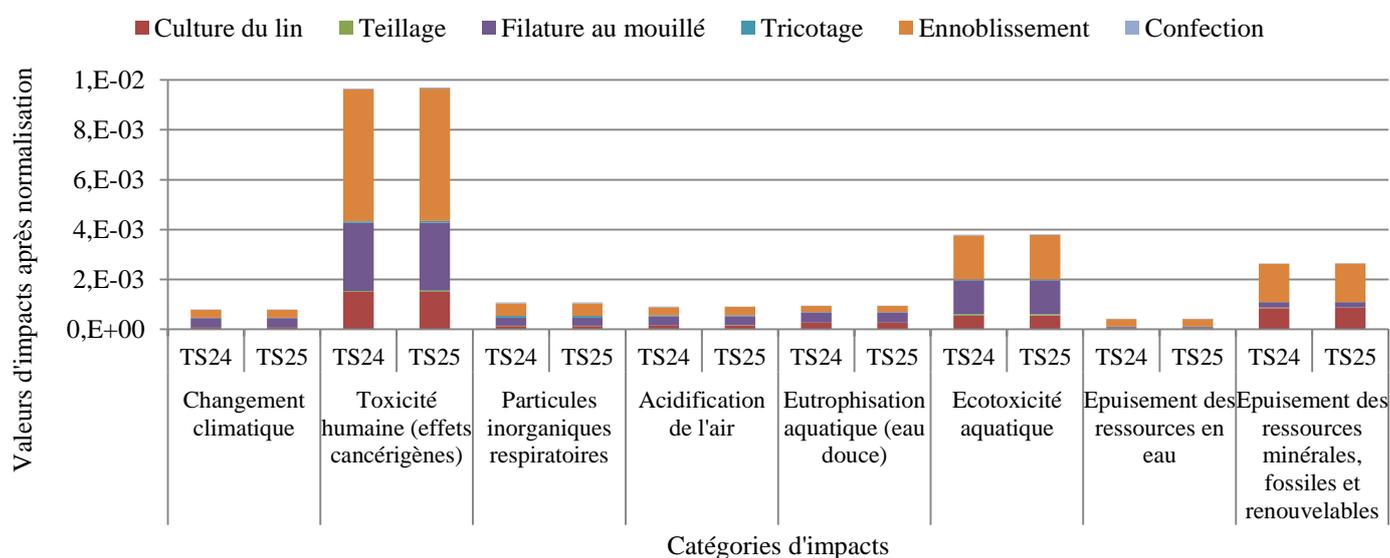


Figure 69 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS24 et TS25 (systèmes lin)

L'évolution des impacts cumulés de ces deux T-shirts (non illustrée ici) ne révèlent par conséquent rien de remarquable. La mince différence de poids qui les distinguent n'a par ailleurs aucune conséquence sur le long terme (Table 41).

Catégorie d'impact	Quotient des impacts cumulés du TS24 sur le TS25		
	Fabrication	A 15 lavages	A terme
Changement climatique	1	1	1
Toxicité humaine (effets cancérigènes)	1	1	1
Particules inorganiques respiratoires	1	1	1
Acidification de l'air	1	1	1
Eutrophisation aquatique (eau douce)	1	1	1
Ecotoxicité aquatique	1	1	1
Epuisement des ressources en eau	1	1	1
Epuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	1	1	1

Table 41 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS24 sur ceux du TS25

IV.4.2.3. Comparaison des T-shirts en polyester : TS18 et TS20

Nous avons finalement comparé les T-shirts TS18 et TS20 en polyester, pour lesquels nous avons modélisé deux fabrications distinctes (section IV.2.3.3.). Ils se distinguent donc sur trois aspects : leurs fabrications, leurs masses et leurs durées de vie (Table 42).

	TS18 (référence)	TS20	Variation (%)
masse (g)	195	257	+ 32
Durée de vie (nombre de lavages)	15	50	+ 233

Table 42 : Pourcentages de variations relatifs aux masses et durées de vie des TS3 et TS6

Cela nous a permis d'obtenir les valeurs d'impacts présentées en Figure 70. Comme précédemment (sections IV.4.2.1. et IV.4.2.2.) nous constatons que les étapes modélisées identiquement varient en fonction de la masse, c'est-à-dire de + 32% en défaveur du TS20, de plus longue durée de vie.

De manière plus précise et plus fluctuante, nous observons pour la seule étape de fabrication des fils, des variations comprises entre +51% et +188% suivant la catégorie d'impact (Figure 71). Le TS20, plus lourd, nécessite non seulement une masse de fil plus importante, mais son procédé de fabrication est également plus coûteux en énergie.

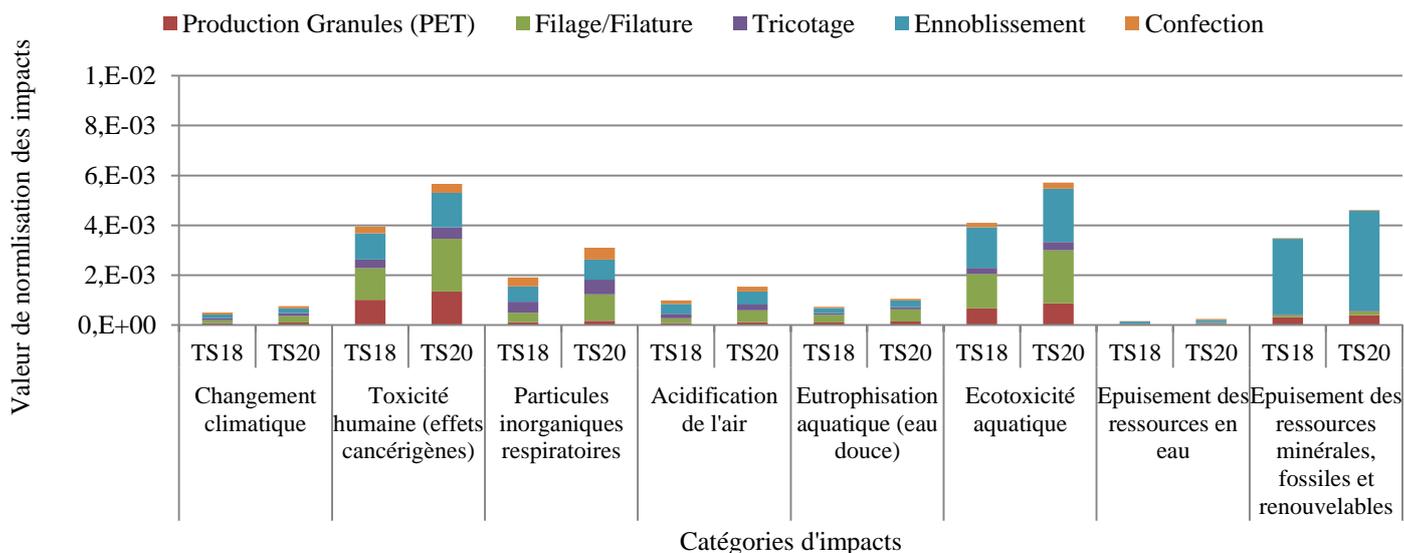


Figure 70 : Comparaison des valeurs d'impacts après normalisation, pour les TS18 et TS20 (systèmes polyester)

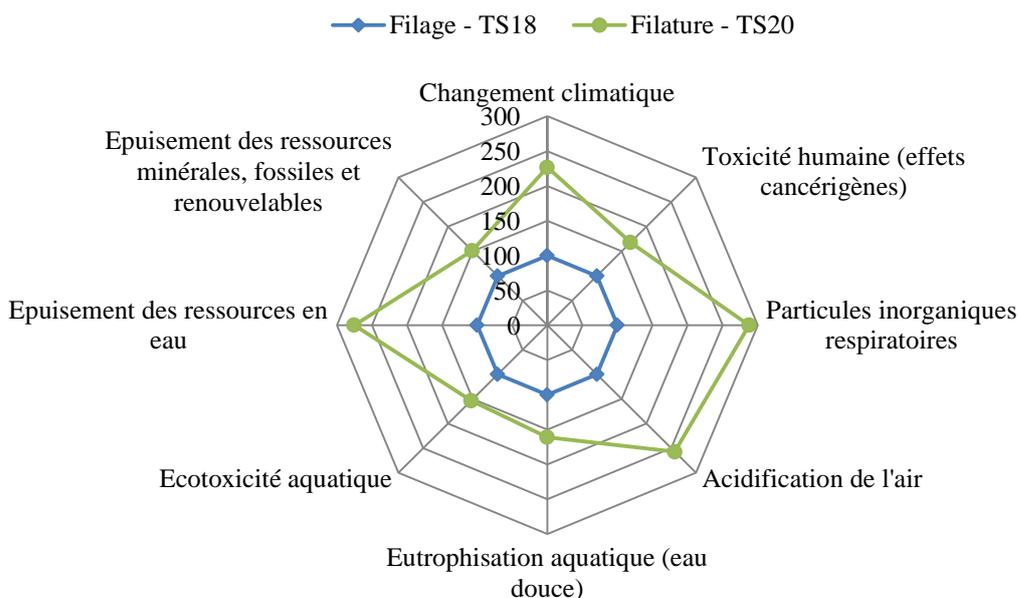


Figure 71 : Comparaison en pourcentage, des impacts générés par le filage et la filature du PET

Dans ce cas précis, une durée de vie trois fois supérieure implique un impact moyen une fois et demi supérieur en fabrication et allant jusqu'à être trois fois supérieur pour la seule étape de filature.

Néanmoins, comme pour les produits en coton et en lin, le renouvellement de T-shirts nuance ces conclusions. Nous avons calculé les valeurs du quotient des impacts cumulés à la fabrication, après le premier renouvellement du TS18 (à 16 lavages), avant le premier renouvellement du TS20 (49 lavages) et à terme.

Il s'avère, ici aussi, que le T-shirt 20, de plus longue durée de vie, génère un impact supérieur à la fabrication qui est rattrapé et dépassé par celui du TS18 suite à son premier renouvellement et qui devient en moyenne deux fois supérieur à terme.

Catégorie d'impact	Quotient des impacts cumulés du TS18 sur le TS20			
	Fabrication	A 16 lavages	A 49 lavages	A terme
Changement climatique	0,7	1,3	2,4	2
Toxicité humaine (effets cancérigènes)	0,7	1,3	2,1	1,8
Particules inorganiques respiratoires	0,6	1,2	2,4	2
Acidification de l'air	0,6	1,3	2,5	2,1
Eutrophisation aquatique (eau douce)	0,7	1,4	2,6	2,2
Ecotoxicité aquatique	0,7	1,4	2,5	2,1
Epuisement des ressources en eau	0,7	0,8	0,8	0,8
Epuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	0,8	1,5	2,7	2,3

Table 43 : Valeurs du quotient des impacts cumulés du TS18 sur ceux du TS20

IV.5. Discussion

Dans la section IV.4. nous avons explicité les résultats des ACV et les avons exploités de manière originale :

- à travers un diagramme cumulatif, dans lequel nous avons représenté l'évolution du cumul d'impact des deux T-shirts en fonction des lavages ;
- à travers le calcul du quotient de ces impacts cumulés et son tracé en fonction des lavages.

Ces représentations nous ont permis de donner un sens dynamique aux résultats de l'ACV. Nous avons ici fait le choix de réaliser des comparaisons par paire sur la base de la composition, de cette manière nous avons mis en évidence l'influence de la durée de vie sur des produits issus de chaînes de fabrication similaires. Les résultats montrent l'intérêt des T-shirts de plus longues durées de vie, qui bien qu'ils aient un impact plus important en fabrication sont systématiquement « meilleurs » à terme, le renouvellement des produits apparaissant comme la cause de ce changement.

Néanmoins pour appuyer ces conclusions nous devons aller plus loin en réalisant une étude de sensibilités ou encore une analyse de l'incertitude. Nous avons en effet mis en parallèle une fabrication et une utilisation mais nous n'y avons pas apporté de variations. L'affirmation de ces conclusions nécessite donc de faire varier à la fois les technologies, la géographie, le scénario d'utilisation ou encore les données d'entrées voire même les méthodes de calcul des impacts environnementaux.

Par ailleurs, ayant posé quelques hypothèses (section IV.2.2.), nous pourrions affiner ces conclusions avec des jeux de données plus adaptés et de meilleures qualités. Lors de prochaines études, il faudra notamment considérer un périmètre plus large, en prenant en compte la fin de vie, davantage de transports entre les sites de production et éventuellement celui du consommateur. De telles variables devraient avoir une conséquence sur la vitesse d'évolution du quotient des impacts cumulés. Il faudrait également être en mesure de mieux distinguer les chaînes de fabrication pour qu'elles correspondent mieux aux caractéristiques et aux qualités de produits obtenus.

IV.6. Point de bascule : indice de cohérence entre procédés de fabrication et qualité

Au vu des résultats présentés en section IV.4.2.1. et IV.4.2.3. il est assez intéressant d'observer que pour des durées de vie deux voire trois fois supérieures, les impacts des fabrications ne présentent finalement qu'un rapport 1,5. Ceci nous amène à nous questionner quant à la fabrication des T-shirts de plus faibles durées de vie. Les moyens mis en œuvre sont-ils disproportionnés par rapport à la qualité produite ?

Afin de mieux rendre compte de cette possibilité, nous proposons de nous intéresser au nombre d'usages nécessaires pour atteindre un équilibre entre impact de la fabrication et de l'usage et proposons d'appeler ce nombre le point de bascule et de le noter E . Cette valeur, fictive, nous donnera la durée de vie que les T-shirts devraient atteindre pour amortir (d'un point de vue environnemental) leur fabrication.

IV.6.1. Evaluation du point de bascule

Pour déterminer le point de bascule E défini précédemment, nous avons adopté une logique de cumul des impacts similaire à la Figure 65 en représentant sur un même graphique l'impact de fabrication d'un T-shirt et l'impact cumulé de ses entretiens (Figure 72). La valeur de E est déterminée de la manière suivante :

$$E = n, \quad \text{quand : } IF_i = n * IU_i, \quad \text{soit } E = \frac{IF_i}{IU_i} \quad \text{Eq. 25}$$

Avec :

IF_i , l'impact généré par la fabrication de 1 T-shirt sur l'indicateur i ;

IU_i , l'impact d'un cycle d'entretien sur l'indicateur i ;

n , le nombre de cycles d'entretien.

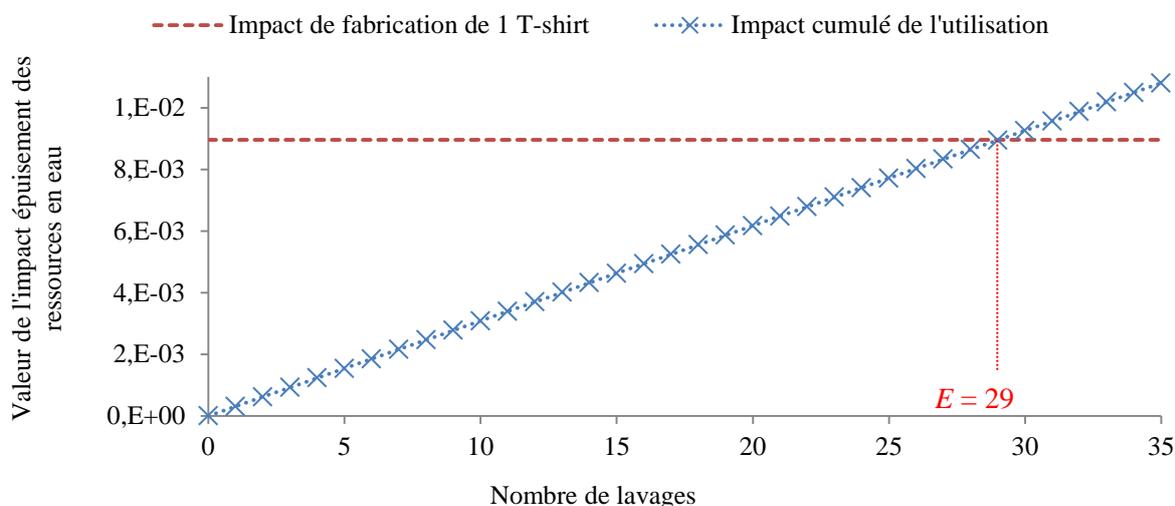


Figure 72 : Exemple de mise en évidence du point de bascule E par méthode graphique

IV.6.2. Résultats pour les six T-shirts

En se basant sur les résultats d'ACV correspondant à la fabrication et l'usage des six T-shirts, nous avons calculé les points de bascule suivants (Table 44) :

Catégorie d'impact	Robustesse	TS3 & TS6	TS18	TS20	TS24 & TS25
Changement climatique	I	428	457	533	407
Toxicité humaine (effets cancérigènes)	II/III	115	88	96	121
Particules inorganiques respiratoires	I	812	1261	1555	400
Acidification de l'air	II	630	762	899	395
Eutrophisation aquatique (eau douce)	II	309	437	476	314
Ecotoxicité aquatique	II/III	232	252	266	131
Épuisement des ressources en eau	III	29	1	1	1
Épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables	II	119	332	333	141

Table 44 : Valeurs des points de bascule E par T-shirt et catégorie d'impact

Au vu de ces résultats, nous devons prêter une attention toute particulière aux valeurs de E puisqu'elles ne sont inférieures à 100 que sur l'épuisement des ressources en eau. Ceci s'explique par le fait que l'usage a un impact fort sur cet indicateur et bien plus faible sur les autres (Figure 73).

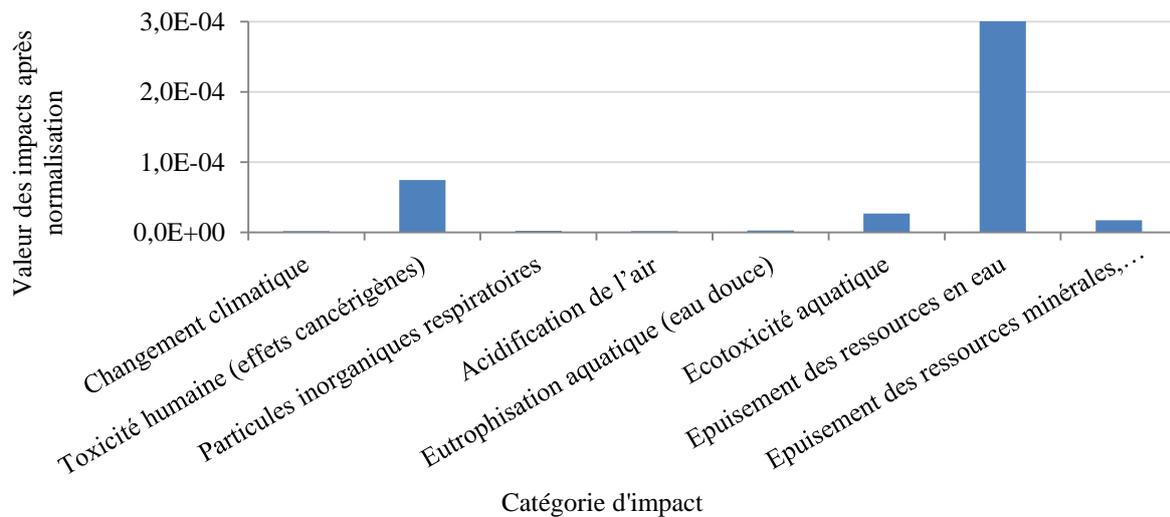


Figure 73 : Résultats typiques des impacts du procédé de lavage après normalisation

En étant bien supérieures aux durées de vie que nous avons évaluées, ces valeurs de E mettent en évidence la valeur du matériau textile qui ne doit pas être considéré comme jetable tant son amortissement nécessite du temps. Il y a une réelle nécessité de faire durer le produit le plus longtemps possible.

En considérant maintenant la comparaison par paire telle qu'en section IV.4. , c'est-à-dire à matière identique, nous remarquons des ordres de grandeurs de E relativement similaires, bien loin des rapports deux ou trois que nous avons pu obtenir à l'évaluation des durées de vie. Bien que nos modélisations aient été limitées, il semblerait que les fabrications des T-shirts de plus faibles durées de vie soient effectivement disproportionnées.

IV.7. Discussion et bilan

Dans ce chapitre nous avons intégré les durées de vies estimées au Chapitre III section III.6. afin d'affiner les évaluations environnementales de six de nos T-shirts. Nous avons ici fait le choix de garder une unité fonctionnelle basée sur la durée de vie plutôt que sur le score QOC puisque ce dernier nécessite encore d'être optimisé.

Suite aux calculs des impacts environnementaux par ACV, nous avons constaté que les trois T-shirts de plus longues durées de vie avaient systématiquement un impact un tiers supérieur en fabrication. Différence qui provient, dans le cas des produits en coton, d'une différence de masse qui se traduit par un besoin supérieur en énergies et en matériaux. A cela s'ajoute, dans le cas des produits en polyester, une différence de consommation énergétique pour la seule étape de fabrication des fils. A noter que la qualité des données utilisées n'est pas homogène et qu'en cela il est nécessaire de poursuivre les efforts qui sont menés dans l'industrie pour proposer des inventaires de qualité et qui permettent une analyse plus fine des impacts environnementaux.

Cette vision étant néanmoins statique, nous avons exploité les résultats avec la volonté de leur donner un sens plus dynamique. Pour cela nous avons associé les résultats d'impacts des fabrications et des usages dans une représentation sous forme de diagramme cumulatif. Cette dernière, tracée en fonction des lavages, rend compte de l'influence du renouvellement. Dans chaque cas, il s'est avéré que le premier renouvellement du T-shirt de plus courte durée de vie l'a amené à cumuler un impact environ une fois et demi supérieur à celui de son homologue de plus longue durée de vie. Il faut néanmoins souligner qu'une étude de sensibilité doit être menée pour confirmer ces conclusions. L'objectif sera ici d'étudier l'influence de diverses variations sur les résultats, des variations à la fois sur le périmètre, des variations géographiques et technologiques ou encore des variations dans les méthodes de calculs.

Pour aller plus loin et observer ce comportement à long terme nous avons représenté le quotient des impacts cumulés du produit de plus courte durée de vie sur celui de plus longue durée de vie. De cette manière nous avons mis en évidence que ce nouvel ordre une fois établi ne s'inverse plus et finit par atteindre un régime d'équilibre. Régime qui s'installe par ailleurs assez rapidement, avant le premier renouvellement du produit de plus longue durée de vie.

Ces résultats nous ont fait nous questionner : les impacts générés par la fabrication sont-ils cohérents avec la longévité des produits ? Pour apporter des éléments de réponses, nous avons défini un point de bascule, noté E , égal au nombre de lavages nécessaires pour atteindre un équilibre entre l'impact de la fabrication et celui de l'usage. L'idée étant de comparer les valeurs pour chaque T-shirt. Il faut cependant noter que E dépend de la chaîne de fabrication et de l'usage modélisés et dans notre cas,

pour un usage équivalent au lavage, nous avons calculé des valeurs particulièrement élevées qui mettent en évidence la valeur du matériau et la nécessité de le faire durer.

Au travers ces exploitations, nous avons abordé des points de vue différents de celui de l'ACV, qui permettent d'appuyer l'intérêt des produits de longue durée de vie et surtout de le quantifier. En affinant les modélisations avec des jeux de données plus fins, cette démarche pourra être déclinée à l'échelle des procédés et aider à identifier de nouvelles pistes d'écoconception.

Conclusion

La problématique relevée lors de ces travaux résulte entre autre de l'économie circulaire et de sa stratégie d'allonger la durée de vie des produits. Cette dernière soulève effectivement la question de son évaluation et de sa prise en compte dans les études environnementales. D'un côté, les durées rencontrées dans la littérature restent hypothétiques et de l'autre, suite aux publications des cadres méthodologiques pour l'affichage environnemental, un besoin de précision est mis en évidence.

L'objectif de cette thèse était ainsi de contribuer aux réflexions sur la notion de la durée de vie des textiles d'habillement, ceci par la construction d'indicateurs comme aide à la décision.

Un état de l'art sur le sujet de la durée de vie nous a permis de mieux cerner la complexité de cette recherche. Il s'agit en effet d'une notion dépendante de variables objectives et subjectives provenant à la fois du produit et du consommateur. Sa définition n'étant par ailleurs pas complètement harmonisée, les variables à quantifier ne sont pas établies. Aussi, le point de départ de notre réflexion tient dans les travaux de l'ADEME et plus particulièrement dans la définition de la « durée normative⁸ ».

En interprétant cette définition, nous avons émis l'hypothèse que les conditions spécifiques de tests doivent retranscrire la capacité des produits à résister aux contraintes de l'usage. Nous souhaitons de cette manière proposer une méthode d'évaluation objective qui ne tienne pas compte d'aléas subjectifs tels que la mode. Il était en revanche essentiel à nos yeux que la durée normative soit la plus proche possible de la durée de vie réelle et elle devait pour cela intégrer les usages et les habitudes du consommateur.

Nos recherches ont conduit, à partir de méthodes existantes, à la proposition d'un modèle de décision multicritère pour l'évaluation de la durée normative. Il s'agit du score unique de qualité dit QOC pour Qualité Orientée Consommateur. Construit autour de l'usure, ce score combine le ressenti du consommateur face à diverses détériorations (la perception de l'usure) et la capacité des produits à leur résister (leurs performances) et à ce titre a l'ambition de prédire la longévité des produits.

Il est modélisé à partir des méthodes Fuzzy AHP (l'analyse multicritère hiérarchique floue) et PROMETHEE II, respectivement utilisées pour déterminer la perception de l'usure et pour l'agrèger avec les performances des produits. Nous avons choisi la méthode Fuzzy AHP pour exprimer la perception du consommateur. Sa démarche consistant en la décomposition d'un problème complexe en de plus petits problèmes est effectivement « naturelle » et donc plus facile à appréhender, en outre la possibilité d'inclure des techniques floues la rend adaptée aux traitements de données provenant

⁸ Durée normative : durée de fonctionnement moyenne, mesurée dans des conditions spécifiques de tests exprimée en temps, nombre de cycles ou sans unité [30].

d'évaluations humaines incertaines et imprécises. D'un autre côté, nous avons choisi la méthode de surclassement PROMETHEE II pour l'agrégation des différents éléments. Issue des méthodes d'agrégation partielle, elle est non compensatoire et évite de masquer les faiblesses des produits. Elle a en outre l'avantage de proposer un score unique et répond pour cela à notre besoin. Cette méthode est également relativement simple à mettre en place et offre des outils tels que les valeurs seuils, les données qualitatives ou la possibilité d'inclure des techniques floues qui permettront de préciser le modèle.

En s'inspirant des boucles de l'économie circulaire, nous avons proposé une « boucle d'écoconception » qui, par l'association du score QOC avec les caractéristiques des produits permet l'identification des paramètres de qualité. La collecte de ces caractéristiques a été réalisée par approche de rétro-ingénierie multi-échelle, du produit fini jusqu'au fil. Celle-ci nous a permis de dégager certains marqueurs de la fabrication des T-shirts et il serait intéressant, lors d'une prochaine étude, d'identifier dans l'espace de fabrication des T-shirts, les qualités QOC associées.

En parallèle, nous avons réalisé une étude de cas sur 29 T-shirts avec l'objectif de vérifier l'adéquation du score QOC avec une durée de vie réelle. Pour cela, nous avons mis en place une étude de vieillissement basée sur l'entretien. Par rapport aux cadres méthodologiques pour l'affichage environnemental, nous avons ciblé 50 lavages et réalisé des enquêtes consommateurs à intervalles réguliers. Les résultats nous ont permis d'identifier certaines faiblesses du modèle et également de mettre en évidence que peu de produits peuvent effectivement prétendre à des durées de vie de 50 lavages.

En dernier lieu, nous avons intégré les résultats obtenus sur les T-shirts à l'analyse de cycle de vie. Nos modélisations permettent de souligner une limite connue de l'ACV : les données d'inventaire de cycle de vie. Elles ne permettent pas encore de distinguer les flux d'énergie par produit. Avec cette limite, nous avons observé que la fabrication des produits de plus longues durées de vie génère en général un impact plus important. Les résultats de l'ACV étant statiques, nous avons proposé des outils plus originaux qui offrent un point de vue nouveau et une vision dynamique des impacts des produits au cours de leur usage :

- le diagramme cumulatif est une représentation de l'impact cumulé de la fabrication et des lavages. Il permet de visualiser l'influence non négligeable du renouvellement de produit ;
- le quotient des impacts cumulés, de forme asymptotique, met d'une part en évidence l'équilibre qui s'installe entre les impacts cumulés de deux produits de durées de vies différentes et permet donc de quantifier comparativement le bénéfice de l'un d'entre eux au cours de leurs utilisations ;

- le point de bascule qui en quantifiant la durée d'« amortissement environnementale » en nombre de lavages permet de rendre compte de la valeur d'un produit.

Par l'utilisation de ces outils, nous avons constaté le bénéfice des produits de plus longue durée de vie et avons pu le quantifier à court, moyen et long terme.

Cette étude de cas nous a par ailleurs permis d'illustrer complètement la mise en place du score QOC. Bien que le modèle puisse être affiné, la démarche est opérationnelle et les méthodes adaptées. Certains éléments ont été identifiés comme clés et devront faire l'objet de futures investigations telles qu'une connaissance plus fine du consommateur ou encore la détermination d'un produit comme base de comparaison pour une démarche standardisée et reproductible.

Etant donné l'étendue des paramètres autour de la durée de vie, cette recherche a un caractère exploratoire et certains aspects restent à préciser quand d'autres sont encore à explorer :

- du point de vue de l'acquisition de données, nous pouvons envisager :
 - une connaissance plus fine du consommateur en prenant davantage de détériorations en compte et en connaissant, pour chacune d'entre elles, l'intensité critique de mise au rebut ;
 - un questionnement quant à la représentativité des tests métrologiques par rapport à l'usage
 - des données d'inventaire de cycle de vie plus précises de manière à mieux différencier les produits
- du point de vue méthodologique, sont à envisager :
 - la détermination d'une base de comparaison par catégorie de produit de manière à standardiser la méthode
 - la considération d'un périmètre plus large en ACV, incluant notamment la fin de vie des produits.

Par l'ensemble de ces travaux, nous apportons à nos partenaires financeurs les réponses suivantes :

- le score de qualité dit QOC, calculé à partir de la connaissance du produit et du consommateur permettra une modulation plus précise de la taxe recyclage. En étant construit autour de l'usure il représente un indice de durée normative. Les détériorations pour chaque catégorie de produit devront être connues et la capacité des produits à leur résister devra être mesurable au moyen de tests métrologiques normalisés. Comme évoqué, une base de comparaison devra être déterminée afin de standardiser la démarche. Cette base pourrait être virtuelle de manière à être inaltérable.

- le lin, au vu de sa ténacité et des résultats d'ACV que nous lui avons calculé, est un bon candidat pour des approches d'écoconception et s'intègre par conséquent aux stratégies d'économie circulaire. Nous mettons cependant un point de vigilance quant à l'application qui en est faite. Les T-shirts que nous avons analysés ont effectivement montré une certaine limite de l'utilisation du lin dans la maille.

Références bibliographiques

- [1] E. Zaccai, *Le développement durable: dynamique et constitution d'un projet*, 2nd ed. Berne-Bruxelles: Ecopolis, 2002.
- [2] Commission mondiale de l'environnement et du développement, G. H. Brundtland, and M. Khalid, *Rapport Brundtland: notre avenir à tous*. Montréal, QC, CA: Editions du Fleuve, 1987.
- [3] C. Gendron, "Beyond environmental and ecological economics: proposal for an economic sociology of the environment," *Ecol. Econ.*, vol. 105, pp. 240–253, 2014.
- [4] J. Barry, *Environment and Social Theory*, 2nd ed. Routledge - Taylor & Francis Group, 2007.
- [5] C. Gendron and J. Revéret, "Le développement durable," *Econ. Sociétés*, vol. 37, pp. 111–124, 2000.
- [6] CIRAIG (International Reference Centre for the Life Cycle of Products; Processes and Services), "Circular economy: a critical literature review of concepts," Montréal, QC, CA, 2015.
- [7] Ellen MacArthur Foundation, "Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition," 2013.
- [8] S. Sauvé, S. Bernard, and P. Sloan, "Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research," *Environ. Dev.*, vol. 17, pp. 48–56, 2016.
- [9] G. Van Lierde, "Développement d'un cluster en économie circulaire: Cas de la Région de Bruxelles-Capitale," 2015.
- [10] J. Greyson, "An economic instrument for zero waste, economic growth and sustainability," *J. Clean. Prod.*, vol. 15, no. 13–14, pp. 1382–1390, 2007.
- [11] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens, *The limits to growth*. New York: Universe Books, 1972.
- [12] W. McDonough, M. Braungart, P. T. Anastas, and J. B. Zimmerman, "Applying the principles of green engineering to cradle-to-cradle design.," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 12, p. 434, 2003.
- [13] M. S. Andersen, "An introductory note on the environmental economics of the circular

- economy,” *Sustain. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 133–140, 2007.
- [14] Z. Yuan, J. Bi, and Y. Moriguchi, “The circular economy: A new development strategy in China,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 10, no. 1–2, pp. 4–8, 2006.
- [15] W. R. Stahel, “The service economy: ‘Wealth without resource consumption’?,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 355, no. 1728, pp. 1309–1319, 1997.
- [16] ADEME, “Economie circulaire : notions,” Angers, 2014.
- [17] P. Ghisellini, C. Cialani, and S. Ulgiati, “A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 114, pp. 11–32, 2016.
- [18] A. Murray, K. Skene, and K. Haynes, “The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context,” *J. Bus. Ethics*, vol. 140, no. 3, pp. 369–380, 2017.
- [19] European Commission, “Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe,” 2014.
- [20] M. McDonald, D. Normandin, and S. Sauvé, *L’économie circulaire : une transition incontournable*, [En ligne]. Montréal: Presses de l’Université de Montréal, 2016.
- [21] J. Korhonen, A. Honkasalo, and J. Seppälä, “Circular Economy: the concept and its limitations,” *Ecol. Econ.*, vol. 143, pp. 37–46, 2018.
- [22] M. Lieder and A. Rashid, “Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry,” *J. Clean. Prod.*, vol. 115, pp. 36–51, 2016.
- [23] UNEP, “Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth,” 2011.
- [24] M. McDonald, D. Normandin, and S. Sauvé, “Introduction,” in *L’économie circulaire : une transition incontournable*, [En ligne]., S. Sauvé, Ed. Montréal: Presses de l’Université de Montréal, 2016, pp. 13–22.
- [25] J. Kirchherr, D. Reike, and M. Hekkert, “Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, pp. 221–232, 2017.
- [26] B. Suarez-Eiroa, E. Fernandez, G. Méndez-Martinez, and D. Soto-Oñate, “Operational principles of circular economy for sustainable development: linking theory and practice,” *J.*

- Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 952–961, 2019.
- [27] C. Arnsperger and D. Bourg, “Vers une économie authentiquement circulaire,” *Rev. l’OFCE*, vol. 145, no. 1, pp. 91–125, 2016.
- [28] UNEP, C. . Bakker, and C. S. . Schuit, “The Long view : exploring product lifetime extension,” 2017.
- [29] A. McLaren, L. Oxborrow, T. Cooper, H. Hill, and H. Goworek, “Clothing longevity perspectives: exploring consumer expectations, consumption and use,” in *Product Lifetimes and the Environment (PLATE) Conference proceedings*, 2015, no. June, pp. 229–235.
- [30] ADEME, E. Fangeat, C. Chauvin, and le pôle usage et durée de vie, “Allongement de la durée de vie des produits,” Angers, 2016.
- [31] S. Murakami, M. Oguchi, T. Tasaki, I. Daigo, and S. Hashimoto, “Lifespan of commodities, part I: The creation of a database and its review,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 14, no. 4, pp. 598–612, 2010.
- [32] T. Cooper, “Beyond Recycling: the longer life option.” The new economics foundation, London, p. 24, 1994.
- [33] LNE *et al.*, “Assistance dans l’élaboration d’une stratégie nationale relative à la durée de vie des produits, du réemploi et la réparabilité qui contribuent à des économies de matière premières, de CO2 et de déchets..” p. 74, 2014.
- [34] Conseil National de la Consommation, “Rapport du groupe de travail du Conseil national de la consommation relatif à la durabilité des produits,” 2015.
- [35] Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRS), “Définition d’obsolescence.” [Online]. Available: <http://www.cnrtl.fr/definition/obsolescence//0>. [Accessed: 11-Apr-2019].
- [36] T. Cooper, “Inadequate Life ? Evidence of Consumer Attitudes to Product Obsolescence,” *J. Consum. Policy*, vol. 27, pp. 421–449, 2004.
- [37] M. Park, “Defying obsolescence,” in *Longer Lasting Products: Alternatives to the Throwaway Society*, Gower Publishing, 2012, pp. 77–106.
- [38] B. Granberg, “The quality re-evaluation process: Product obsolescence in a consumer-producer interaction framework,” 1997.
- [39] K. Laitala, “Consumers’ clothing disposal behaviour - a synthesis of research results,” *Int. J.*

- Consum. Stud.*, vol. 38, pp. 444–457, 2014.
- [40] M. Collett, B. Cluver, H.-L. Chen, and B. G. Cluver, “Consumer perceptions the limited lifespan of fast fashion appareil,” *Res. J. Text. Appar.*, vol. 17, no. 2, pp. 61–68, 2013.
- [41] K. Laitala and C. Boks, “Sustainable clothing design: use matters,” *J. Des. Res.*, vol. 10, no. 1/2, pp. 121–139, 2012.
- [42] H.-K. Chun, “Differences between fashion innovators and non-fashion innovators in their clothing disposal practices,” Oregon State University, 1987.
- [43] J. Cox, S. Griffith, S. Giorgi, and G. King, “Consumer understanding of product lifetimes,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 79, pp. 21–29, 2013.
- [44] Ellen MacArthur Foundation, “A new textiles economy: redesigning fashion’s future,” 2017.
- [45] T. Cooper, H. Hill, J. Kininmonth, K. Townsend, and M. Hughes, “Design for Longevity: Guidance on increasing the active life of clothing,” 2013.
- [46] T. Cooper, *Longer Lasting Products: Alternatives To The Throwaway Society*. Gower Publishing, 2010.
- [47] WRAP, “Sustainable Clothing Technical Report,” 2015.
- [48] M. De Saxcé, “Méthodologie d’évaluation des impacts environnementaux des textiles par l’Analyse du Cycle de Vie,” Université de Lille Nord de France, 2012.
- [49] Union des Industries Textiles, “Rapport d’activité 2017/2018,” 2018.
- [50] AFNOR, “NF EN ISO 2076 : Textiles - Fibres chimiques - Noms génériques,” 2014.
- [51] AFNOR, “NF EN ISO 12947-1 : Détermination de la résistance à l’abrasion des étoffes par la méthode Martindale,” 1999.
- [52] J. Gordon Cook, *Handbook of textile fibres: Natural fibres*. Merrow Publishing Co. It.
- [53] R. Sinclair, “Understanding textile fibres and their properties: what is a textile fibre?,” in *Textiles and Fashion*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 3–27.
- [54] H. Eberle, H. Hermeling, M. Hornberger, D. Menzer, and W. Ring, *Technologie du vêtement*, Guérin. Montréal, 1995.
- [55] R. Alagirusamy and A. Das, “Conversion of fibre to yarn: an overview,” in *Textiles and*

- Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 157–189.
- [56] I. A. Elhawary, “Fibre to yarn: staple-yarn spinning,” in *Textiles and Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 191–212.
- [57] C. Lawrence, “Fibre to yarn: filament yarn spinning,” in *Textiles and Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 213–253.
- [58] G. Castelli, S. Maietta, G. Sigrisi, and I. Matteo Slaviero, *Reference books of textile technologies: weaving*. ACIMIT, Fondazione, 2000.
- [59] E. J. Power, “Yarn to fabric: knitting,” in *Textiles and Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 289–305.
- [60] C. Mazza and P. Zonda, *Reference books of textile techonologies: knitting*. Milan, 2001.
- [61] P. R. Richards, “Fabric finishing: dyeing and colouring,” in *Textiles and Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 475–505.
- [62] T. L. Vigo, “Preparatory processes,” in *Textile processing and properties: Preparation, dyeing, finishing and performance*, Elsevier B.V., 1994, pp. 1–51.
- [63] T. L. Vigo, “Fundamentals of dyes and dyeing processes for textiles,” in *Textile processing and properties: Preparation, dyeing, finishing and performance*, Elsevier B.V., 1994, pp. 52–111.
- [64] T. L. Vigo, “Methods of applying dyes to textiles,” in *Textile processing and properties: Preparation, dyeing, finishing and performance*, Elsevier B.V., 1994, pp. 112–192.
- [65] T. L. Vigo, “Fabrics with improved aesthetic and functional properties,” in *Textile processing and properties: Preparation, dyeing, finishing and performance*, Elsevier B.V., 1994, pp. 193–291.
- [66] J. McLoughlin and A. Mitchell, “Fabric finishing: joining fabrics using stitched seams,” in *Textiles and Fashion: Materials , Design and Technology*, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 377–411.
- [67] S. Roos, G. Sandin, B. Zamani, G. Peters, and M. Svanström, “Will clothing be sustainable? Clarifying sustainable fashion,” in *Textiles and Clothing Sustainability*, 2017, pp. 1–45.
- [68] K. Leffland, H. Kaersgaard, and I. Andersson, “Comparing environmental impact data on cleaner technologies,” 1997.

- [69] S. Ellebaek Larsen, J. Hansen, H. H. Knudsen, H. Wenzel, H. F. Larsen, and F. Moller Kristensen, "EDIPTEx – Environmental assessment of textiles," 2007.
- [70] J. M. Allwood and S. E. Laursen, "Well dressed? The present and future sustainability of clothing and textiles in the United Kingdom," 2006.
- [71] J. K. Steinberger, D. Friot, and O. Jolliet, "A spatially explicit life cycle inventory of the global textile chain," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 14, pp. 443–455, 2009.
- [72] T. Cooper *et al.*, "Clothing longevity protocol," 2014.
- [73] G. Baydar, N. Ciliz, and A. Mammadov, "Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 104, pp. 213–223, 2015.
- [74] S. Roos, G. Sandin, B. Zamani, and G. Peters, "Environmental assessment of Swedish fashion consumption Five garments – sustainable futures," 2015.
- [75] J. Strand, "Environmental impact of the Swedish textile consumption -a general LCA study Jelina Strand," Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), 2015.
- [76] Y. Zhang, X. Liu, R. Xiao, and Z. Yuan, "Life cycle assessment of cotton T-shirts in China," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. Volume 20, no. Issue 7, pp. 994–1004, 2015.
- [77] J. Lhotellier, E. Less, E. Bossanne, and S. Pesnel, "Modélisation et évaluation des impacts environnementaux de produits de consommation et biens d'équipement - Synthèse," 2018.
- [78] Cotton Incorporated, "LCA update of cotton fiber and fabric life cycle inventory," 2017.
- [79] European Commission, S. Pesnel, and J. Payet, "Product environmental footprinting category rules (PEFCR): T-shirts," 2019.
- [80] E. Labouze, Y. Le Guern, and C. des Abbayes, "Analyse de cycle de vie d'un pantalon en jean," 2006.
- [81] S. Pesnel and A. Perwuelz, "Importance de la durée de vie d'un article sur l'analyse de cycle de vie. Contribution à l'affichage environnemental des textiles. Afnor," *Réunions sur l'affichage environnemental ADEME, GT n°5 Contrib. GEMTEX*, 2009.
- [82] R. Benkirane, S. Thomassey, L. Koehl, and A. Perwuelz, "Influence of lifetime on textile product LCA," 2016 [avniR] Conference, 2016. [Online]. Available: http://avnir.org/documentation/Recherche/ECLin_Poster_Congres_Avnir.pdf.

- [83] N. Gregson, M. Crang, S. Fuller, and H. Holmes, “Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU,” *Econ. Soc.*, vol. 44, no. 2, pp. 218–243, 2015.
- [84] ADEME, “Principes généraux pour l’affichage environnemental des produits de grande consommation - Partie 23 : méthodologie d’évaluation des impacts environnementaux des articles d’habillement,” 2016.
- [85] Conseil National de la Consommation, “Rapport du groupe de travail du Conseil national de la consommation relatif au double affichage des prix de vente et d ’ usage des biens de consommation,” 2015.
- [86] Union européenne, “Recommandation de la commission du 9 avril 2013 relative à l’utilisation de méthodes communes pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l’ensemble du cycle de vie,” *J. Off. l’Union Eur.*, p. 210, 2013.
- [87] Y. Aujollet, H. Legrand, M. de Jovenel, and P. Louviau, “Avenir de la filière REP de gestion des déchets de textiles, linge de maison et chaussures (TLC),” 2018.
- [88] Eco TLC, “Éco-modulation durabilité textile : Modalités de déclaration,” 2019.
- [89] S. Pesnel, A. Perwuelz, and V. Pasquet, “Résultats du sondage sur l’entretien et la fin de vie des articles textiles,” 2012. [Online]. Available: <http://www.acvtex.eu/>.
- [90] V. Pasquet, “Contribution à l’étude de l’impact environnemental de procédés de traitements de textiles par l’outil d’analyse du cycle de vie,” Université Lille Nord de France, 2012.
- [91] B. P. Saville, “Serviceability,” in *Physical testing of textiles*, 1st ed., B. P. Saville, Ed. Woodhead Publishing Limited; The Textile Institute, 1999, pp. 184–208.
- [92] B. P. Saville, “Strength and elongation tests,” in *Physical testing of textiles*, 1st ed., B. P. Saville, Ed. Woodhead Publishing Limited; The Textile Institute, 1999, pp. 115–167.
- [93] B. P. Saville, “Dimensional stability,” in *Physical testing of textiles*, 1st ed., B. P. Saville, Ed. Woodhead Publishing Limited; The Textile Institute, 1999, pp. 168–183.
- [94] B. P. Saville, “Colour fastness testing,” in *Physical testing of textiles*, 1st ed., B. P. Saville, Ed. Woodhead Publishing Limited; The Textile Institute, 1999, pp. 244–255.
- [95] E. Classen, “Comfort testing of textiles,” in *Advanced Characterization and Testing of Textiles*, 1st ed., D. Jackson and S. Webber, Eds. Woodhead Publishing, 2018, pp. 59–69.
- [96] B. P. Saville, “Comfort,” in *Physical testing of textiles*, 1st ed., B. P. Saville, Ed. Woodhead

- Publishing Limited; The Textile Institute, 1999, pp. 209–243.
- [97] G. Ö. Kayseri, N. Özdil, and G. S. Mengüç, “Sensorial comfort of textile materials,” in *Woven fabrics*, vol. i, no. tourism, H.-Y. Jeon, Ed. In-Tech, 2012, p. 13.
- [98] K. Yosouf, “Contribution à la caractérisation du bruit de frottement des étoffes : application au prêt-à-porter (cas du vêtement furtif),” Université de Haute Alsace, 2016.
- [99] H. Latroch, “Contribution au développement de nouveaux outils de caractérisation mécanique des étoffes : contribution à l’étude et à la caractérisation de la signature sonore du frottement des étoffes,” Université de Haute Alsace, 2013.
- [100] B. Roy and D. Bouyssou, *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. 1993.
- [101] M. Agrebi, “Méthodes d’aide à la décision multi-attribut et multi-acteur pour résoudre le problème de sélection dans un environnement certain/incertain : cas de la localisation des centres de distribution,” Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2018.
- [102] C. A. Bana e Costa, “Les problématiques de l’aide à la décision : vers l’enrichissement de la trilogie choix-tri-rangement,” *Rech. opérationnelle*, vol. 30, no. 2, pp. 191–216, 1996.
- [103] B. Rousval and D. Bouyssou, “De l’aide multicritère à la décision à l’aide multicritère à l’évaluation,” 2009.
- [104] D. Ayadi Azzabi, “Optimisation multicritère de la fiabilité : application du modèle de goal programming avec les fonctions de satisfactions dans l’industrie de traitement de gaz,” Université d’Angers; Université de Sfax, 2010.
- [105] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1981.
- [106] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. N. Sanchez, and T. Ray, “Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach,” *Encycl. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, pp. 175–186, 1998.
- [107] C. Kahraman, *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making*, vol. 3, no. 1. Springer, 2008.
- [108] P. Mota, A. R. Campos, and R. Neves-Silva, “First Look at MCDM: Choosing a Decision Method,” *Adv. Smart Syst. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 25–30, 2013.
- [109] C. Kahraman, S. C. Onar, and B. Oztaysi, “Fuzzy Multicriteria Decision-Making: A Literature Review,” *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 8, no. 4, pp. 637–666, Jul. 2015.

- [110] B. Roy, *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Paris: Economica, 1985.
- [111] X. Ling and J.-B. Yang, "Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach," Manchester, 2001.
- [112] F. T. S. Chan and N. Kumar, "Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach," *Omega*, vol. 35, no. 4, pp. 417–431, 2007.
- [113] O. S. Vaidya and S. Kumar, "Analytic hierarchy process: An overview of applications," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 169, pp. 1–29, 2006.
- [114] A. Mitra, A. Majumdar, A. Ghosh, P. K. Majumdar, and D. Bannerjee, "Selection of Handloom Fabrics for Summer Clothing Using Multi-Criteria Decision Making Techniques," *J. Nat. Fibers*, vol. 12, no. 1, pp. 61–71, 2015.
- [115] Y.-J. Cho, "An analysis on priority of clothing evaluative criteria using AHP," *J. Korean Soc. Cloth. Ind.*, vol. 9, no. 1, pp. 81–88, 2007.
- [116] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [117] T. L. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 48, pp. 9–26, 1990.
- [118] K. Bennis and L. Bahi, "Application de la logique floue à l'aide à la décision participative pour l'évaluation de l'impact sur l'environnement – cas de Tanger," *J. Decis. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 56–78, 2016.
- [119] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process - what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, pp. 161–176, 1987.
- [120] A. Guitouni, M. Bélanger, and J.-M. Martel, "Cadre méthodologique pour différencier les méthodes multicritères," 2010.
- [121] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Int. J. Serv. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 83–98, 2008.
- [122] M. Mammeri, "Une approche d'aide multicritère à la décision pour l'évaluation du confort dans les trains : construction d'un modèle d'évaluation," Université Paris Dauphine - Paris IX, 2013.
- [123] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Inf. Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.

- [124] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory- and Its Applications Fourth Edition*. Springer Science+Business Media New York , 2001.
- [125] P. L. Biju, P. R. Shalij, and G. V Prabhushankar, “Evaluation of customer requirements and sustainability requirements through the application of fuzzy analytic hierarchy process,” *J. Clean. Prod.*, vol. 108, pp. 808–817, 2015.
- [126] F. O. Catak, S. Karabas, and S. Yildirim, “Fuzzy analytic hierarchy based DBMS selection in Turkish national identity card management project,” *Int. J. Inf. Sci. Tech.*, vol. 2, no. 4, 2012.
- [127] P. J. M. Van Laarhoven and W. Pedrycz, “A fuzzy extension of Saaty’s priority theory,” *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 11, pp. 229–241, 1983.
- [128] D.-Y. Chang, “Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 95, pp. 649–655, 1996.
- [129] A. Lesniak, D. Kubek, E. Plebankiewicz, K. Zima, and S. Belniak, “Fuzzy AHP application for supporting contractors’ bidding decision,” *Symmetry (Basel)*, vol. 10, pp. 1–14, 2018.
- [130] S. H. Chen, S. T. Wang, and S. M. Chang, “Some properties of graded mean integration representation of L-R type fuzzy numbers,” *Tamsui Oxford J. Inf. Math. Sci.*, vol. 22, no. 2, pp. 185–208, 2006.
- [131] J. J. Buckley, “Fuzzy hierarchical analysis,” *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 17, pp. 233–247, 1985.
- [132] T. L. Saaty and L. G. Vargas, “Dispersion of group judgments,” *Math. Comput. Model.*, vol. 46, pp. 918–925, 2007.
- [133] A. Dargi, A. Anjomshoe, M. R. Galankashi, A. Memari, and M. B. M. Tap, “Supplier Selection: A Fuzzy-ANP Approach,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 31, pp. 691–700, 2014.
- [134] M. Bide, “Testing textile durability,” in *Understanding and improving the durability of textiles*, P. A. Annis, Ed. Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 126–142.
- [135] S. C. Ray, “Process control in knitting,” in *Process control in textile manufacturing*, Woodhead Publishing Limited, 2013, pp. 243–264.
- [136] M. Fulton, M. Rezazadeh, and D. Torvi, “Tests for evaluating textile aging,” in *Advanced Characterization and Testing of Textiles*, 1st ed., D. Jackson and S. Webber, Eds. Woodhead Publishing, 2018, pp. 93–125.
- [137] A. Shaw, “Durability of protective clothing,” in *Understanding and improving the durability of*

- textiles*, P. A. Annis, Ed. Woodhead Publishing Limited, 2012, pp. 174–183.
- [138] R. K. Nayak and R. Padhye, “The care of apparel products,” in *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*, no. 2, R. Sinclair, Ed. Elsevier Ltd, 2015, pp. 799–822.
- [139] J. G. Martindale and P. A. Inst., “A new design of cloth wearing tester,” *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 33, no. 9, pp. T151–T158, 1942.
- [140] W. Abbas, “Contribution à l’étude et l’évaluation de la qualité et du confort au porter de produits confectionnés : cas de la chemise homme,” Université de Haute Alsace, 2014.
- [141] Yijun ZHU, “Contribution à l’évaluation et à la modélisation du bien-être des matériaux textiles habillement par l’utilisation des techniques de calcul avancé,” Université de Lille 1, 2010.
- [142] G. Agarwal, “Interaction of textile parameters, wash- ageing and use of fabric softener during the laundry with mechanical properties of the knitted fabrics and correlation with textile hand,” 2011.
- [143] S. E. Jeguirim *et al.*, “Intelligent Techniques for Modeling the Relationships between Sensory Attributes and Instrumental Measurements of Knitted Fabrics,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 7, no. 3, pp. 88–97, 2012.
- [144] F. Philippe, L. Schacher, D. C. Adolphe, and C. Dacremont, “Tactile Feeling: sensory analysis applied to textile goods,” *Text. Res. J.*, vol. 74, no. 12, pp. 1066–1072, 2004.
- [145] J. Hu, W. Chen, and A. Newton, “A psychophysical model for objective fabric hand evaluation: an application of Stevens’s law,” *J. Text. Inst.*, vol. 84, no. 3, pp. 354–363, 1993.
- [146] S. Kawabata, *The standardization and analysis of hand evaluation*, 2nd ed. Textile Machinery Society of Japan, 1980.
- [147] S. Ben Mena, “Introduction aux méthodes multicritères d’aide à la décision,” *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, vol. 4, no. 2, pp. 83–93, 2000.
- [148] C. Aenishaenslin, D. Bélanger, C. Fertel, V. Honoh, B. Mareschal, and J.-P. Waaub, “Guide pratique de mise en place d’un processus décisionnel multicritère et multi-acteurs et outils,” *Les Cah. du GERAD*, p. 29, 2019.
- [149] D. Vanderpooten, “Aide multicritère à la décision : Concepts, méthodes et perspectives,” 2008.
- [150] J. P. Brans and P. Vincke, “Note - A Preference Ranking Organisation Method,” *Manage. Sci.*,

vol. 31, no. 6, pp. 647–656, 1985.

- [151] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, “PROMETHEE : A comprehensive literature review on methodologies and applications,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 200, no. 1, pp. 198–215, 2010.
- [152] V. Raja, “Introduction to reverse engineering,” in *Reverse Engineering: An industrial perspective*, K. J. Fernandes, Ed. 2008, p. 242.
- [153] S. Das Gupta, R. Mukhopadhyay, K. C. Baranwal, and A. K. Bhowmick, “Reverse engineering concepts,” in *Reverse engineering of rubber products: concepts, tools, and techniques*, CRC Press, Ed. 2013, pp. 109–132.
- [154] A. Baccini, “Statistique descriptive multidimensionnelle,” *Publ. l’Institut Mathématiques Toulouse*, p. 33, 2010.
- [155] P. Besse and A. Baccini, “Analyse des données ou statistique exploratoire multidimensionnelle,” *Techniques de l’ingénieur*. Techniques de l’ingénieur, pp. 0–17, 2011.
- [156] L. Lebart, A. Morineau, and M. Piron, “Introduction,” in *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Dunod., Paris: Dunod, 1995, pp. 1–10.
- [157] E. Le Coz, “Méthodes et outils de la qualité - Outils classiques,” *Techniques de l’ingénieur*, Techniques de l’ingénieur, pp. 0–18, 2001.
- [158] K. V. Mardia, J. T. Kent, and J. . Bibby, “Principal component analysis,” in *Multivariate Analysis*, Academic P., London: Academic Press. Inc, 1979, p. 518.
- [159] A. Martin, “L’analyse de données,” 2004.
- [160] P. Besse, “Analyse en composantes principales (ACP),” 2016.
- [161] I. T. Jolliffe and B. Morgan, “Principal component analysis and exploratory factor analysis,” *Stat. Methods Med. Res.*, vol. 1, pp. 69–95, 1992.
- [162] M. Harkat, “Détection et localisation de défauts multiples par analyse en composantes principales,” Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2003.
- [163] R. Kolde, S. Laur, P. Adler, and J. Vilo, “Robust rank aggregation for gene list integration and meta-analysis,” *Bioinformatics*, vol. 28, no. 4, pp. 573–580, 2012.
- [164] X. Li, X. Wang, and G. Xiao, “A comparative study of rank aggregation methods for partial

- and top ranked lists in genomic applications,” *Bioinformatics*, vol. 20, no. 1, pp. 178–189, 2019.
- [165] B. Brancotte, “Agrégation de classements avec égalités : algorithmes, guides à l’utilisateur et applications aux données biologiques,” Univervisté Paris Sud - Paris XI, 2015.
- [166] V. Pihur, S. Datta, and S. Datta, “RankAggreg, an R package for weighted rank aggregation,” *BMC Bioinformatics*, vol. 10, no. 62, 2009.
- [167] N. Ailon, “Aggregation of partial rankings , p -ratings and top- m lists,” *Algorithmica*, vol. 57, no. 2, pp. 284–300, 2010.
- [168] J.-L. Menet, A. Combelles, I.-C. Gruescu, and A. Perwuelz, “L’écoconception et ses outils,” 2011. [Online]. Available: http://acvbat.univ-valenciennes.fr/chap02/co/ch02_280_2-1.html. [Accessed: 26-Apr-2019].
- [169] B. Bellini and M. Janin, “Ecoconception : état de l’art des outils disponibles,” *Techniques de l’ingénieur*, p. 32p., 2011.
- [170] ISO, “NF EN ISO 14040 : Management environnemental, analyse du cycle de vie, principes et cadre,” 2006.
- [171] I. Boufateh Ben Arari, “Contribution à l’évaluation de la supply chain pour la filière textile : définition de critères de développement durable,” Université Lille Nord-de-France, 2011.
- [172] B. P. Weidema and M. S. Wesnaes, “Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators,” *J. Clean. Prod.*, vol. 4, no. 3/4, pp. 167–174, 1996.
- [173] R. Frischknecht *et al.*, “The ecoinvent database: overview and methodological framework,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, pp. 1–7, 2004.
- [174] O. Jolliet, M. Saadé, and P. Crettaz, “Analyse de l’impact environnemntal,” in *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, 1st ed., O. Jolliet, M. Saadé, and P. Crettaz, Eds. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2005, pp. 79–106.
- [175] É. Péchenart and A. Roquesalane, “SimaPro : logiciel d’analyse de cycle de vie,” *Techniques de l’ingénieur*, pp. 1–25, 2014.
- [176] Plateforme [avniR], “Les logiciels ACV et bases de données.” [Online]. Available: <https://www.avnir.org/FR/Logiciels-ACV-et-Base-de-donnees-264.html>. [Accessed: 26-Apr-2019].

- [177] B. Mareschal, "PROMETHEE & GAIA Software," 2011. [Online]. Available: <http://www.promethee-gaia.net/>. [Accessed: 12-Jan-2019].
- [178] "Visual PROMETHEE 1.4 Manual," 2013.
- [179] B. Mareschal, "The PROMETHEE-GAIA FAQ: How to choose the right preference function?," 2012. [Online]. Available: http://www.promethee-gaia.net/faq-pro/index.php?action=article&cat_id=003002&id=4. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [180] B. K. Behera and T. E. Madan Mohan, "Objective measurement of pilling by image processing technique," *Int. J. Cloth. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 279–291, 2005.
- [181] T. J. Kang, D. H. Cho, and S. M. Kim, "Objective evaluation of fabric pilling using stereovision," *Text. Res. J.*, vol. 74, no. 11, pp. 1013–1017, 2004.
- [182] B. J. Xin, J. L. Hu, and H. Yan, "Objective evaluation of fabric pilling using image analysis techniques," *Text. Res. J.*, vol. 72, no. 12, pp. 1057–1064, 2002.
- [183] N. Ucar and S. Ertugrul, "Predicting Circular Knitting Machine Parameters for Cotton Plain Fabrics Using Conventional and Neuro-Fuzzy Methods," *Text. Res.*, vol. 72, no. 4, pp. 361–366, 2002.
- [184] H. F. Kaiser, "An index of factorial simplicity," *Psychometrika*, vol. 39, no. 1, pp. 31–36, 1974.
- [185] A. Sadat, E. B. Z. N’Goran, S. Siaka, and B. Parinet, "Intérêt de l’analyse multidimensionnelle pour l’évaluation de la qualité physico-chimique de l’eau d’un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d’Ivoire)," *J. Appl. Biosci.*, vol. 28, pp. 2573–2585, 2011.
- [186] M. Tripathi and S. K. Singal, "Use of Principal Component Analysis for parameter selection for development of a novel Water Quality Index: A case study of river Ganga India," *Ecol. Indic.*, vol. 96, pp. 430–436, 2019.
- [187] C. Mee-sung and S. P. Ashdown, "Effect of Changes in Knit Structure and Density on the Mechanical and," *Text. Res. J.*, vol. 12, pp. 1033–1045, 2000.
- [188] R. Oinuma and H. Takeda, "Spirality in plain-jersey fabrics knitted of three-ply cotton yarns," *J. Text. Mach. Soc. Japan*, vol. 39, no. 2, pp. 65–71, 1988.
- [189] M. D. de Araujo and G. W. Smith, "Spirality of knitted fabrics - Part I: The nature of spirality," *Text. Res. J.*, pp. 247–256, 1989.

- [190] V. K. Kothari, G. Singh, K. Roy, and R. Varshney, "Spirality of cotton plain knitted fabrics with respect to variation in yarn and machine parameters," *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 227–233, 2011.
- [191] H. H. Ramey, R. Lawson, and S. Worley, "Relationship of cotton fiber properties to yarn tenacity," *Text. Res. J.*, no. October, pp. 685–691, 1977.
- [192] "Miele Softtronic - Mode d'emploi lavage linge W3268," M.-Nr. 06 750 610.
- [193] A. Beton *et al.*, "Environmental Improvement Potential of Textiles (IMPRO-Textiles)," 2014.
- [194] N. M. Van Der Velden, M. K. Patel, and J. G. Vogtländer, "LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, pp. 331–356, 2014.
- [195] M. J. Meixell and V. B. Gargeya, "Global supply chain design: A literature review and critique," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 41, no. 6 SPEC. ISS., pp. 531–550, 2005.
- [196] S. Thomassey, "Sales forecasts in clothing industry: The key success factor of the supply chain management," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 128, no. 2, pp. 470–483, 2010.
- [197] E. Labouze, Y. Le Guern, and C. Petiot, "Analyse de cycle de vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton - Rapport final post revue critique," 2007.
- [198] L. Turunen and H. Van Der Werf, "Life cycle analysis of hemp textile yarn: comparison of three hemp fibre processing scenarios and a flax scenario," Rennes, 2006.
- [199] Quantis, Fibres Recherche et Développement, EcoTechnilin, and ADEME, "Analyse de cycle de vie comparative de panneaux de porte biosourcé (PP/fibres de lin et chanvre) et pétrosourcé (ABS)," 2016.
- [200] F. Bert, *Lin fibre : culture et transformation*. Arvalis - Institut du végétal, 2013.
- [201] JRC, *Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods: database and supporting information*, no. June 2014. 2012.
- [202] European Commission, "ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. Background Document - First Edition," *Publ. Off. Eur. Union*, p. 115, 2010.
- [203] "ISO 14044:2006 Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and

guidelines,” 2006.

- [204] L. Benini, L. Mancini, S. Sala, E. Schau, S. Manfredi, and R. Pant, *Normalisation method and data for Environmental Footprints*. 2014.
- [205] T. Hackett, “A comparative life cycle assessment of denim jeans and a cotton T-Shirt: the production of fast fashion essential items from cradle to gate,” University of Kentucky, 2015.
- [206] L. A. W. Ellingsen, B. Singh, and A. H. Stromman, “The size and range effect: Life-cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, no. 054010, 2017.
- [207] ADEME, “Elaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l’ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadin,” 2012.

Annexe 1 : Exemples de questions posées lors de l'enquête consommateur

10 [0008]Après combien de jours d'utilisation lavez-vous les articles suivants ? *

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	1 jour	2 jours	3-4 jours	5-6 jours	15 jours	1 mois	1 saison	Jamais	Je ne sais pas	Non concerné
Tee-shirts	<input type="radio"/>									

11 [0009]Quel mode de lavage utilisez-vous pour les articles suivants ? *

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	En machine, à froid	En machine à 30°C	En machine à 40°C	En machine à 60°C	En machine à 90°C	Au pressing	À la main	Jamais	Je ne sais pas	Non concerné
Tee-shirts	<input type="radio"/>									

13 [0011]Quelle est votre fréquence d'utilisation d'un sèche-linge pour les articles suivants :

Choisissez une réponse appropriée pour chaque saison. *

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

*La réponse était 'Oui' ou 'Ça dépend' à la question '12 [0010]' (Utilisez-vous un sèche-linge ?)

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	Saison chaude				Saison froide			
	<i>Toujours</i>	<i>Souvent</i>	<i>Parfois</i>	<i>Jamais</i>	<i>Toujours</i>	<i>Souvent</i>	<i>Parfois</i>	<i>Jamais</i>
Tee-shirts	<input type="radio"/>							

15 [0014]Repassez-vous les articles suivants ? *

Répondre à cette question seulement si les conditions suivantes sont réunies :

*La réponse était 'Oui' ou 'Ça dépend' à la question '14 [0013]' (Utilisez-vous un fer à repasser ?)

Choisissez la réponse appropriée pour chaque élément :

	Toujours	Souvent	Parfois	Jamais	Pas concerné	Je ne sais pas
Tee-shirts	<input type="radio"/>					

Annexe 2 : Vecteurs préférences des alternatives

Ici sont détaillés les matrices linguistiques émises par les experts lors des comparaisons par paire des alternatives au regard de chaque sous-critères.

1 Préférences des alternatives au regard du sous-critère *Toujours*

Les évaluations linguistiques des experts sont données en Table 45, Table 46 et Table 47. La matrice consensus est donnée en Table 48 et sa version défuzzifiée ainsi que son CR en Table 49.

EXPERT 1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/FPI$	$1/PI$	$1/FPI$	$1/MPI$
A2		<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/MPI$	<i>FPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/PI$	<i>FPI</i>
A4				<i>E</i>	<i>FPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 45 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 1

EXPERT 2	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/FPI$	$1/PI$	$1/FPI$	<i>PI</i>
A2		<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/PI$	<i>TFPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/TFPI$	<i>FPI</i>
A4				<i>E</i>	<i>EPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 46 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 2

EXPERT 3	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/FPI$	$1/PI$	$1/TFPI$	<i>MPI</i>
A2		<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/PI$	<i>TFPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/PI$	<i>FPI</i>
A4				<i>E</i>	<i>EPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 47 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC1 par l'expert 3

CONSENSUS	A1	A2	A3	A4	A5
A1	(1, 1, 1)	(0.4, 0.5, 0.67)	(0.5, 0.67, 1)	(0.33, 0.46, 0.67)	(0.5, 1.14, 2)
A2	(1.5, 2, 2.5)	(1, 1, 1)	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.76, 2)	(1.5, 2.32, 3)
A3	(1, 1.5, 2)	(0.5, 0.67, 1)	(1, 1, 1)	(0.33, 0.56, 1)	(1.5, 2, 2.5)
A4	(1.5, 2.15, 3)	(0.5, 1.31, 2)	(1, 1.78, 3)	(1, 1, 1)	(1.5, 2.62, 3.5)
A5	(0.5, 0.87, 2)	(0.33, 0.43, 0.67)	(0.4, 0.5, 0.67)	(0.29, 0.38, 0.67)	(1, 1, 1)

Table 48 : Combinaison floue des jugements d'experts

	A1	A2	A3	A4	A5	Vecteur propre
A1	1	0.51	0.69	0.48	1.18	0.13
A2	1.96	1	1.5	0.93	2.3	0.27
A3	1.44	0.67	1	0.6	2	0.19
A4	2.1	1.08	1.67	1	2.58	0.29
A5	0.85	0.44	0.5	0.39	1	0.11

$\lambda_{max} = 5.009$

$CI = 0.002$

$CR = 0.002$

Table 49 : Matrice *Consensus* défuzzifiée, CI et CR

2 Préférences des alternatives au regard du sous-critère Souvent

Les évaluations linguistiques des experts sont données en Table 50, Table 51 et Table 52. La matrice consensus est donnée en Table 53 et sa version défuzzifiée ainsi que son CR en Table 54.

EXPERT 1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/FPI$	<i>MPI</i>	$1/FPI$	<i>MPI</i>
A2		<i>E</i>	<i>FPI</i>	<i>MPI</i>	<i>FPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/FPI$	<i>E</i>
A4				<i>E</i>	<i>FPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 50 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 1

EXPERT 2	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/TFPI$	<i>PI</i>	$1/TFPI$	<i>PI</i>
A2		<i>E</i>	<i>EPI</i>	<i>PI</i>	<i>EPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/TFPI$	<i>MPI</i>
A4				<i>E</i>	<i>TFPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 51 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 2

EXPERT 3	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	$1/FPI$	<i>MPI</i>	$1/PI$	<i>MPI</i>
A2		<i>E</i>	<i>FPI</i>	<i>MPI</i>	<i>FPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/FPI$	$1/MPI$
A4				<i>E</i>	<i>PI</i>
A5					<i>E</i>

Table 52 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC2 par l'expert 3

CONSENSUS	A1	A2	A3	A4	A5
A1	(1, 1, 1)	(0.33, 0.46, 0.67)	(0.5, 1.14, 2)	(0.33, 0.51, 1)	(0.5, 1.14, 2)
A2	(1.5, 2.15, 3)	(1, 1, 1)	(1.5, 2.29, 3.5)	(0.5, 1.14, 2)	(1.5, 2.29, 3.5)
A3	(0.5, 0.87, 2)	(0.29, 0.44, 0.67)	(1, 1, 1)	(0.33, 0.46, 0.67)	(0.5, 1, 2)
A4	(1, 1.96, 3)	(0.5, 0.87, 2)	(1.5, 2.15, 3)	(1, 1, 1)	(1, 1.96, 3)
A5	(0.5, 0.87, 2)	(0.29, 0.44, 0.67)	(0.5, 1, 2)	(0.33, 0.51, 1)	(1, 1, 1)

Table 53 : Combinaison floue des jugements d'experts

	A1	A2	A3	A4	A5	Vecteur propre
A1	1	0.48	1.18	0.56	1.18	0.15
A2	2.10	1	2.36	1.18	2.36	0.31
A3	0.85	0.42	1	0.48	1.08	0.13
A4	1.78	0.85	2.1	1	1.97	0.27
A5	0.85	0.42	0.92	0.51	1	0.13

$$\lambda_{max} = 5.002$$

$$CI = 0.0005$$

$$CR = 0.0004$$

Table 54 : Matrice *Consensus* défuzzifiée, CI et CR

3 Préférences des alternatives au regard du sous-critère *Parfois*

Les évaluations linguistiques des experts sont données en Table 55, Table 56 et Table 57. La matrice consensus est donnée en Table 58 et sa version défuzzifiée ainsi que son CR en Table 59.

EXPERT 1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>E</i>	<i>PI</i>	<i>E</i>	<i>PI</i>
A2		<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/PI$	<i>E</i>
A3			<i>E</i>	$1/PI$	<i>E</i>
A4				<i>E</i>	<i>PI</i>
A5					<i>E</i>

Table 55 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 1

EXPERT 2	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>MPI</i>	<i>PI</i>	$1/PI$	<i>PI</i>
A2		<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/PI$	<i>PI</i>
A3			<i>E</i>	$1/FPI$	$1/MPI$
A4				<i>E</i>	<i>PI</i>
A5					<i>E</i>

Table 56 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 2

EXPERT 3	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>MPI</i>	<i>MPI</i>	$1/MPI$	<i>MPI</i>
A2		<i>E</i>	<i>MPI</i>	$1/MPI$	<i>MPI</i>
A3			<i>E</i>	$1/MPI$	$1/MPI$
A4				<i>E</i>	<i>MPI</i>
A5					<i>E</i>

Table 57 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC3 par l'expert 3

CONSENSUS	A1	A2	A3	A4	A5
A1	(1, 1, 1)	(0.5, 1, 1.5)	(0.5, 1.31, 2)	(0.5, 0.87, 2)	(0.5, 1.31, 2)
A2	(0.67, 1, 2)	(1, 1, 1)	(0.5, 1.31, 2)	(0.5, 0.76, 2)	(0.5, 1.14, 2)
A3	(0.5, 0.76, 2)	(0.5, 0.76, 2)	(1, 1, 1)	(0.4, 0.69, 2)	(0.67, 1, 2)
A4	(0.5, 1.14, 2)	(0.5, 1.31, 2)	(0.5, 1.44, 2.5)	(1, 1, 1)	(0.5, 1.31, 2)
A5	(0.5, 0.76, 2)	(0.5, 0.87, 2)	(0.5, 1, 1.5)	(0.5, 0.76, 2)	(1, 1, 1)

Table 58 : Combinaison floue des jugements d'experts

	A1	A2	A3	A4	A5	<i>Vecteur propre</i>
A1	1	1	1.29	1	1.29	0.22
A2	1	1	1.29	0.93	1.18	0.21
A3	0.78	0.78	1	0.86	1.11	0.18
A4	1	1.08	1.16	1	1.29	0.22
A5	0.78	0.85	0.9	0.78	1	0.17

$\lambda_{max} = 5.004$

$CI = 0.001$

$CR = 0.001$

Table 59 : Matrice *Consensus* défuzzifiée, CI et CR

4 Préférences des alternatives au regard du sous-critère *Jamais*

Les évaluations linguistiques des experts sont données en Table 60, Table 61 et Table 62. La matrice consensus est donnée en Table 63 et sa version défuzzifiée ainsi que son CR en Table 64.

EXPERT 1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>FPI</i>	$1/PI$	<i>FPI</i>	$1/PI$
A2		<i>E</i>	$1/TFPI$	<i>E</i>	$1/TFPI$
A3			<i>E</i>	<i>TFPI</i>	<i>E</i>
A4				<i>E</i>	$1/TFPI$
A5					<i>E</i>

Table 60 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 1

EXPERT 2	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>PI</i>	$1/FPI$	<i>FPI</i>	$1/PI$
A2		<i>E</i>	$1/EPI$	<i>MPI</i>	$1/EPI$
A3			<i>E</i>	<i>EPI</i>	$1/MPI$
A4				<i>E</i>	$1/EPI$
A5					<i>E</i>

Table 61 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 2

EXPERT 3	A1	A2	A3	A4	A5
A1	<i>E</i>	<i>FPI</i>	$1/PI$	<i>FPI</i>	$1/PI$
A2		<i>E</i>	$1/TFPI$	<i>MPI</i>	$1/TFPI$
A3			<i>E</i>	<i>TFPI</i>	$1/MPI$
A4				<i>E</i>	$1/TFPI$
A5					<i>E</i>

Table 62 : Comparaison par paire des alternatives au regard de SC4 par l'expert 3

CONSENSUS	A1	A2	A3	A4	A5
A1	(1, 1, 1)	(1, 1.82, 2.5)	(0.4, 0.61, 1)	(1.5, 2, 2.5)	(0.5, 0.67, 1)
A2	(0.4, 0.55, 1)	(1, 1, 1)	(0.29, 0.38, 0.5)	(0.5, 1, 1.5)	(0.29, 0.38, 0.5)
A3	(1, 1.65, 2.5)	(2, 2.66, 3.5)	(1, 1, 1)	(2, 2.66, 3.5)	(0.67, 1, 2)
A4	(0.4, 0.5, 0.67)	(0.67, 1, 2)	(0.29, 0.38, 0.5)	(1, 1, 1)	(0.29, 0.38, 0.5)
A5	(1, 1.5, 2)	(2, 2.66, 3.5)	(0.5, 1, 1.5)	(2, 2.66, 3.5)	(1, 1, 1)

Table 63 : Combinaison floue des jugements d'experts

	A1	A2	A3	A4	A5	<i>Vecteur propre</i>
A1	1	1.79	0.64	2	0.69	0.20
A2	0.56	1	0.38	1	0.38	0.11
A3	1.57	2.62	1	2.69	1.11	0.30
A4	0.5	1	0.37	1	0.38	0.11
A5	1.44	2.62	0.9	2.62	1	0.28

$$\lambda_{max} = 5.003$$

$$CI = 0.001$$

$$CR = 0.001$$

Table 64 : Matrice *Consensus* défuzzifiée, CI et CR

Annexe 3 : Valeurs des perceptions de l'usure par le consommateur dans les scénarios d'analyse de la robustesse

	Dégradation de la couleur (%)	Déformation (%)	Déchirure des coutures (%)	Apparition de trou(s) (%)	Apparition de bouloches (%)
Sc0 (référence)	15,07	25,92	18,16	27,12	13,73
Sc1	16,29	25,65	18,31	26,60	13,15
Sc2	15,53	24,84	19,22	25,28	15,13
Sc3	14,84	26,14	19,18	28,05	11,79
Sc4	15,12	25,59	18,49	26,91	13,89
Sc5	17,30	23,80	18,35	24,95	15,60
Sc6	15,52	25,25	18,45	26,35	14,43

Annexe 4 : Poids utilisés dans les scénarios d'analyse de la robustesse du score QOC

	Dégradation de la couleur (%)	Déformation (%)	Déchirure des coutures (%)	Apparition de trou(s) (%)	Apparition de bouloches (%)
1 (référence)	15,07	25,92	18,16	27,12	13,73
4	16,58	25,54	17,78	26,74	13,35
5	14,42	28,51	17,51	26,47	13,08
6	14,62	25,47	19,98	26,67	13,28
7	14,39	25,24	17,48	29,83	13,05
8	14,73	25,58	17,82	26,78	15,10
9	13,56	26,30	18,54	27,50	14,11
10	15,72	23,33	18,81	27,77	14,38
11	15,52	26,37	16,34	27,57	14,18
12	15,75	26,60	18,84	24,41	14,41
13	15,41	26,26	18,50	27,46	12,36

Annexe 5 : Matrice *M* des évaluations

	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x4</i>	<i>x5</i>	<i>x6</i>	<i>x7</i>	<i>x8</i>	<i>x9</i>	<i>x10</i>	<i>x11</i>	<i>x12</i>	<i>x13</i>	<i>x14</i>
TS1	100	0	0	0	46,7	707,27	7,29	0	1107	0,55	0,73	216,98	16	-0,177
TS2	100	0	0	0	46,81	801,38	10,94	1	2067	0,27	0,55	172,68	28	0,31
TS3	100	0	0	0	49,6	727,44	5,7	1	1989	0,27	0,5	190,6	28	-0,147
TS4	100	0	0	0	51,77	756,08	7,54	1	2240	0,26	0,49	169,03	32	-0,083
TS5	100	0	0	0	38,99	584,34	8,38	0	1610	0,29	0,55	198,33	26	0,087
TS6	100	0	0	0	53,76	728,06	7,45	1	1824	0,28	0,5	152,1	32	-0,389
TS7	100	0	0	0	49,55	667,2	9,96	0	1470	0,29	0,5	151,33	28	-0,144
TS8	100	0	0	0	51,03	808	9,27	1	1872	0,29	0,6	165,33	28	-0,21
TS9	100	0	0	0	48,65	807,28	7,98	1	2240	0,29	0,62	167,33	28	-0,22
TS10	100	0	0	0	31,36	588,76	10,41	1	1271	0,34	0,67	208,75	22	0,181
TS11	100	0	0	0	35,72	726,08	6,17	1	1584	0,3	0,48	210,05	24	-0,036
TS12	100	0	0	0	51,9	891,28	7,56	1	1739	0,29	0,55	142,17	28	-0,457
TS13	100	0	0	0	49,57	745,82	8,06	1	1739	0,28	0,47	142,75	28	-0,245
TS14	100	0	0	0	52,23	758,26	6,11	0	1134	0,54	0,77	229,75	22	-0,327

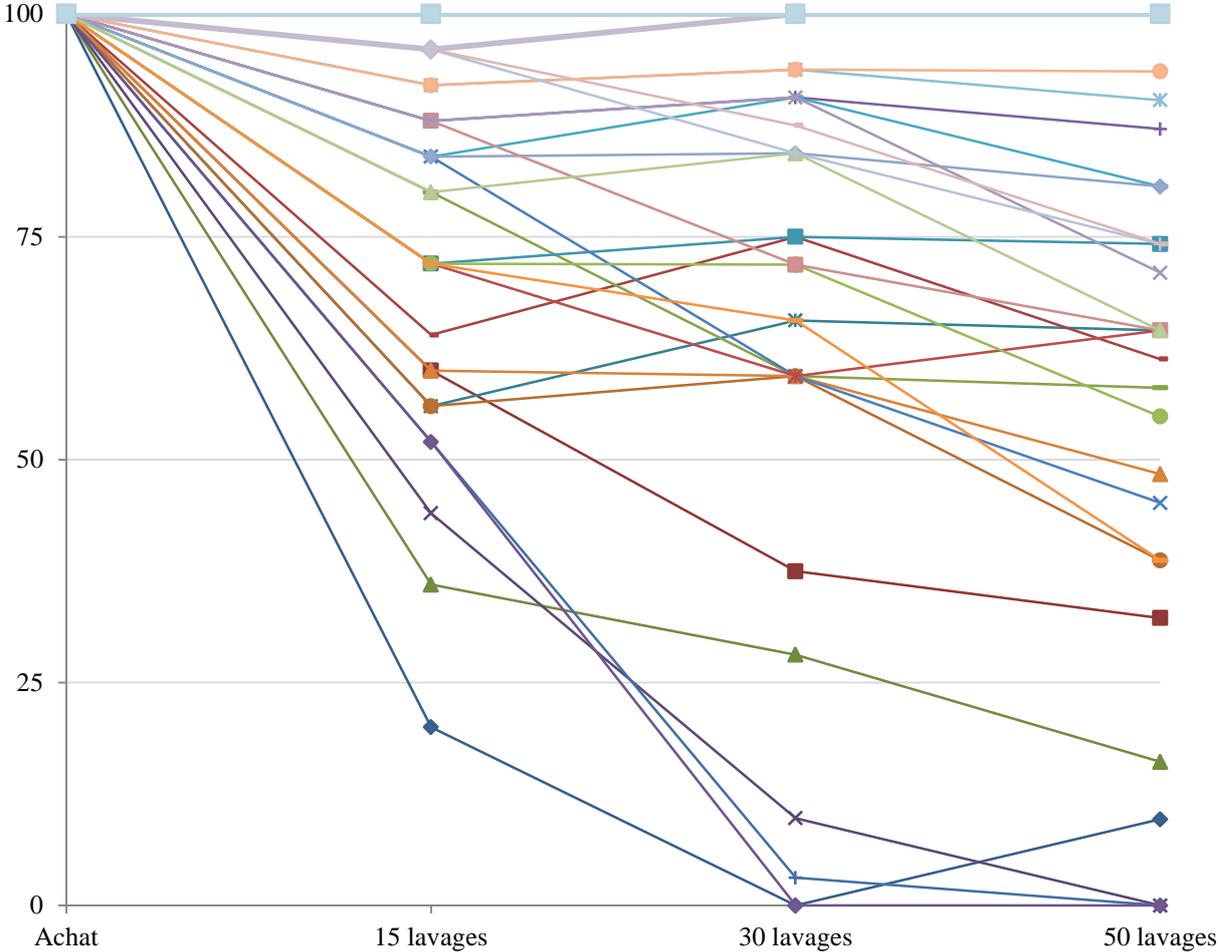
Annexe 5 (suite)

	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x4</i>	<i>x5</i>	<i>x6</i>	<i>x7</i>	<i>x8</i>	<i>x9</i>	<i>x10</i>	<i>x11</i>	<i>x12</i>	<i>x13</i>	<i>x14</i>
TS15	100	0	0	0	51	778,78	13,28	1	1755	0,29	0,53	163,98	32	0,299
TS16	100	0	0	0	32,33	645,66	3,9	1	1240	0,32	0,63	195,7	24	-0,323
TS17	100	0	0	0	34,37	673,58	9,63	1	1353	0,34	0,71	206,28	24	0,219
TS18	0	100	0	0	84,27	0	0,3	1	2700	0,24	0,4	114,63	36	0,253
TS19	0	100	0	0	64,81	457,24	5,54	1	2208	0,24	0,49	124,58	32	0,459
TS20	0	100	0	0	45,35	914,48	10,78	1	1672	0,25	0,56	151,18	28	0,222
TS21	0	100	0	0	43,31	791,67	16,83	1	1699	0,26	0,6	136,3	28	0,153
TS22	0	100	0	0	41,27	668,86	22,89	1	1728	0,26	0,68	165,88	28	0,357
TS23	0	100	0	0	43,31	791,67	16,83	1	1699	0,25	0,57	167,78	28	0,429
TS24	0	0	100	0	27	487,43	18,08	1	750	0,4	0,6	204,43	16	0,155
TS25	0	0	100	0	25,69	482,04	1,73	1	810	0,4	0,65	205,18	16	-0,259
TS26	0	0	100	0	24,48	434,78	5,71	1	783	0,42	0,81	210,03	16	-0,269
TS27	80	0	0	20	32,33	645,66	3,9	0	1134	0,29	0,76	201,98	14	-0,226
TS28	60	40	0	0	55,11	830,24	10,83	1	2000	0,27	0,55	156,44	32	0,011
TS29	50	50	0	0	38,99	584,34	8,38	1	1813	0,27	0,65	139,44	26	0,377

Annexe 6 : Classements issus de l'analyse des résultats des enquêtes

Rang	15 lavages	30 lavages	50 lavages
1	TS20	TS23	TS23
2	TS23	TS20	TS20
3	TS21	TS21	TS21
4	TS29	TS19	TS19
5	TS28	TS8	TS3
6	TS19	TS9	TS9
7	TS4	TS4	TS4
8	TS8	TS3	TS8
9	TS14	TS14	TS1
10	TS1	TS29	TS29
11	TS15	TS28	TS28
12	TS3	TS15	TS18
13	TS9	TS17	TS17
14	TS27	TS1	TS14
15	TS17	TS7	TS5
16	TS13	TS27	TS6
17	TS18	TS18	TS11
18	TS2	TS5	TS15
19	TS5	TS6	TS7
20	TS11	TS10	TS13
21	TS7	TS11	TS27
22	TS26	TS13	TS16
23	TS25	TS24	TS24
24	TS6	TS2	TS2
25	TS10	TS22	TS10
26	TS12	TS12	TS22
27	TS24	TS25	TS12
28	TS22	TS16	TS25
29	TS16	TS26	TS26

Annexe 7 : Evolutions des réponses (a) et (b)



Annexe 8 : Inventaire des flux pour les systèmes « lin »

Les données d'inventaire mentionnées ci-dessous sont à la fois issues de données de la littérature [197]–[200] et de données récoltées auprès d'industriels.

Type	Materials/Fuels	Amount	Unit
Culture du lin			
	Passage machines agricoles (préparation du sol)	4	passages
	Graines	106	graines/ha
	Apport de zinc	550	g/ha
	Fertilisant azoté	100	kg/ha
	Fertilisant phosphate	115	kg/ha
	Fertilisant potasse	106	kg/ha
	Traitement fongicide - Prochloraze (semence)	38	g/ha
	Traitement fongicide - Thirame (semence)	44	g/ha
	Traitement fongicide - Flusilazole (plant)	209	g/ha
	Traitement fongicide - Carbendazime (plant)	135	g/ha
	Traitement herbicide - Triallate	770	g/ha
	Traitement herbicide – Linuron	145	g/ha
	Traitement herbicide - Bentazone	1090	g/ha
	Traitement insecticide -	72	g/ha
	Passage machines agricoles (pré récolte et récolte)	4	passages
Teillage			
Entrant			
	Lin roui non battu	4,6	kg
	Consommation d'électricité	0,672	kWh/kg
	Consommation de gaz naturel	0,026	kWh/kg
	Consommation d'eau	0,250	L
	Transport	0,241	kg.km
	Fioul	0,006	L/kg
	Fil de fer	0,005	kg
Sortant			
	Filasse	1	kg

Filasse déclassée	0,09	kg
Etoupes de teillage	0,58	kg
Graines	0,24	kg
Anas	2,20	kg
Sisal	0,02	kg
Cailloux, poussières	0,53	kg

Filature

Peignage du lin teillé

Entrant

Lin teillé	1,93	kg
électricité	0,89	kWh
machine	0,0015	kg

Sortant

Lin peigné	1,23	kg
Etoupes de peignage	0,58	kg
Déchets poussières	0,13	kg

Préparation du lin peigné

Entrant

Lin peigné	1,23	kg
Electricité	1,35	kWh
machine	0,001	kg

Sortant

Mèches de lin	1,17	kg
Déchets poussières	0,06	kg

Lessivage et blanchiment des mèches de lin

Entrant

Mèches de lin	1,17	kg
NaOH	169,71	g
Na ₂ CO ₃	99,49	g
H ₂ O ₂	105,34	g
Agent complexant (EDTA)	5,85	g
Eau	58	kg
electricité	0,22	kWh

	gaz naturel	4,35	kWh
Sortant			
	Mèches blanchies	1,05	kg
	pertes	0,13	kg
	eaux usées	58	kg
Filature au mouillé			
Entrant			
	Mèche blanchie	1,05	kg
	Eau déminéralisée	13,4	kg
	lubrifiant / Mineral oil	53	g
	Machines	0,001	kg
	électricité	2,43	kWh
	gaz naturel	7,33	kWh
Sortant			
	Fil de lin	1	kg
	Pertes	0,05	kg
	eaux usées	13,3	kg
Bobinage du fil			
Entrant			
	Fil	1	kg
	machines	0,0022	kg
	électricité	5,56	kWh
Sortant			
	Fil sur cônes	1	kg
Consommation énergétique totale			
	électricité	6,85	kWh
	gaz naturel	6,26	kWh
Traitement des eaux usées			
Entrant			
	Eaux usées (blanchiment et filature)	71,7	kg
	Transport	2,65	kg.km
	électricité	0,01	kWh
Sortant			

Eaux usées traitées	71,7	kg
COD	6,531	g
NH4+	0,067	g
Nitrite	0,299	g
Nitrate	0,006	g
Sulphates	47,796	g
Chlorides	38,379	g
Cr	0,003	g
Fe	0,027	g
Ni	0,013	g
Pb	0,003	g
Cu	0,003	g
Zn	0,010	g
VOC	0,001	g
CO	0,047	g
CO2, biogenic	0,043	g
CH4	0,153	g

Annexe 9 : Inventaire des flux pour les systèmes « coton »

Les données d'inventaire mentionnées ci-dessous sont issues du rapport *LCA update of cotton fiber and fabric life cycle inventory* [78], disponibles au point 7.4 Annex D, Table 7-3 dans le document original.

Type	Flow	Magnitude	Unit
Knit Yarn Production			
Inputs			
	Cotton fiber	1690	kg
	Diesel	0.0931	kg
	Electricity	15500	MJ
	Electricity from natural gas	8070	MJ
Outputs			
	Yarn	1330	kg
	Comber noils	333	kg
	Short fiber	110	kg
	Inorganic waste to landfill	0.252	kg
	Plant bark and contaminants to recycling	2.52	kg
	Fiber waste to recycling	11.4	kg
	Fiber waste to landfill	0.0631	kg
	Organic waste to recycling	1.26	kg
Knitting			
Inputs			
	Yarn	1330	kg
	Electricity	1250	MJ
	Lubricant	2.31	kg
	Thermal energy from natural gas	1820	MJ
Outputs			
	Greige fabric	1310	kg
	Inorganic waste to landfill	0.0226	kg
	Waste lubricant for disposal	0.0603	kg
	Lint fly to recycling	0.452	kg

Yarn waste to recycling	3.22	kg
Fabric waste to recycling	2.1	kg
Waste fiber to incineration	13.3	kg

Knit Preparation

Inputs		
Greige fabric	1310	kg
Acetic acid	3.3	kg
Calcium silicate	10.4	kg
Electricity	776	MJ
Enzymes	2.03	kg
Hydrogen peroxide (50%)	40.1	kg
Sodium hydroxide (100%; caustic soda)	35.2	kg
Sodium sulphate	0.0862	kg
Surfactants (tensides)	13.6	kg
Thermal energy from LPG	547	MJ
Thermal energy from natural gas	2470	MJ
Water (desalinated; deionised)	72600	kg
Outputs		
Prepared fabric	1290	kg
Recycled process water	21000	kg
Water to wastewater treatment	27100	kg
Water vapour	24500	kg
Adsorbable organic halogen compounds (AOX) [Analytical measures to fresh water]	0.00905	kg
Ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	0.00478	kg
Arsenic [Heavy metals to fresh water]	0.00157	kg
Biological oxygen demand (BOD) [Analytical measures to fresh water]	0.934	kg
Cadmium [Heavy metals to fresh water]	0.0157	kg
Chemical oxygen demand (COD) [Analytical measures to fresh water]	4.98	kg
Chlorine (dissolved) [Inorganic emissions to fresh water]	0.00787	kg
Chromium [Heavy metals to fresh water]	0.0171	kg
Chromium (+VI) [Heavy metals to fresh water]	0.000787	kg
Copper [Heavy metals to fresh water]	0.0246	kg

Cyanide [Inorganic emissions to fresh water]	0.00157	kg
Fluorine [Inorganic emissions to fresh water]	0.0157	kg
Iron [Heavy metals to fresh water]	0.0236	kg
Lead [Heavy metals to fresh water]	0.000787	kg
Manganese [Heavy metals to fresh water]	0.0157	kg
Mercury [Heavy metals to fresh water]	0.0000787	kg
Nickel [Heavy metals to fresh water]	0.0239	kg
Nitrate [Inorganic emissions to fresh water]	0.0787	kg
Nitrogen (as total N) [Inorganic emissions to fresh water]	0.62	kg
Oil (unspecified) [Hydrocarbons to fresh water]	0.141	kg
Phenol (hydroxy benzene) [Hydrocarbons to fresh water]	0.00787	kg
Phosphorus [Inorganic emissions to fresh water]	0.0657	kg
Selenium [Heavy metals to fresh water]	0.000393	kg
Solids (dissolved) [Analytical measures to fresh water]	16	kg
Solids (suspended) [Particles to fresh water]	1.03	kg
Sulphide [Inorganic emissions to fresh water]	0.0157	kg
Total organic bounded carbon [Analytical measures to fresh water]	0.324	kg
Vanadium [Heavy metals to fresh water]	0.00157	kg
Zinc [Heavy metals to fresh water]	0.0402	kg

Batch Dyeing

Inputs		
Prepared fabric	1290	kg
Acetic acid	7.16	kg
Disperse dye	0.207	kg
Dispersing agent	0.207	kg
Electricity	1560	MJ
Enzymes	12.3	kg
Reactive dye	166	kg
Sequestering agent	0.0518	kg
Soda (sodium carbonate)	92.8	kg
Sodium chloride (rock salt)	642	kg
Sodium dithionite	6.21	kg

Sodium hydroxide (100%; caustic soda)	68.5	kg
Sodium sulphate	21.4	kg
Softener	48.8	kg
Surfactants (tensides)	6.1	kg
Thermal energy from LPG	1370	MJ
Thermal energy from Nat Gas	7630	MJ
Water (desalinated; deionised)	129000	kg
Water (tap water)	8480	kg
Outputs		
Dyed fabric	1190	kg
Fabric waste to recycling	6.45	kg
Fabric waste to landfill	1.33	kg
Recycled process water	34400	kg
Water to wastewater treatment	55800	kg
Nitrogen oxides	0.0271	kg
Sulphur dioxide	0.138	kg
Water vapour	38400	kg
Adsorbable organic halogen compounds (AOX) [Analytical measures to fresh water]	0.0111	kg
Ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	0.0115	kg
Arsenic [Heavy metals to fresh water]	0.00302	kg
Biological oxygen demand (BOD) [Analytical measures to fresh water]	1.92	kg
Cadmium [Heavy metals to fresh water]	0.0302	kg
Chemical oxygen demand (COD) [Analytical measures to fresh water]	9.19	kg
Chlorine (dissolved) [Inorganic emissions to fresh water]	0.0151	kg
Chromium [Heavy metals to fresh water]	0.0318	kg
Chromium (+VI) [Heavy metals to fresh water]	0.00151	kg
Copper [Heavy metals to fresh water]	0.0464	kg
Cyanide [Inorganic emissions to fresh water]	0.00302	kg
Fluorine [Inorganic emissions to fresh water]	0.0302	kg
Iron [Heavy metals to fresh water]	0.0452	kg
Lead [Heavy metals to fresh water]	0.00151	kg
Manganese [Heavy metals to fresh water]	0.0302	kg

Mercury [Heavy metals to fresh water]	0.000151	kg
Nickel [Heavy metals to fresh water]	0.0456	kg
Nitrate [Inorganic emissions to fresh water]	0.151	kg
Nitrogen (as total N) [Inorganic emissions to fresh water]	1.03	kg
Oil (unspecified) [Hydrocarbons to fresh water]	0.483	kg
Phenol (hydroxy benzene) [Hydrocarbons to fresh water]	0.0151	kg
Phosphorus [Inorganic emissions to fresh water]	0.108	kg
Selenium [Heavy metals to fresh water]	0.000754	kg
Solids (dissolved) [Analytical measures to fresh water]	50.2	kg
Solids (suspended) [Particles to fresh water]	1.83	kg
Sulphide [Inorganic emissions to fresh water]	0.0302	kg
Total organic bounded carbon [Analytical measures to fresh water]	0.399	kg
Vanadium [Heavy metals to fresh water]	0.00302	kg
Zinc [Heavy metals to fresh water]	0.0763	kg

Knit Finishing

Inputs		
Dyed fabric	1190	kg
Acetic acid	0.367	kg
Antimicrobial	0.376	kg
Diesel	0.145	kg
Electricity	1780	MJ
Softener	130	kg
Soil repellent	3.14	kg
Thermal energy from hard coal	2250	MJ
Thermal energy from heavy fuel oil	0.903	MJ
Thermal energy from LPG	3020	MJ
Thermal energy from natural gas	13000	MJ
Water (desalinated; deionised)	19300	kg
Steam	682	kg
Water resist	30.8	kg
Wrinkle resist	4.04	kg
Outputs		

Knit fabric	1180	kg
Fabric waste to recycling	6.15	kg
Recycled process water	1190	kg
Water to wastewater treatment	12000	kg
Water vapour	6170	kg
Adsorbable organic halogen compounds (AOX) [Analytical measures to fresh water]	0.000524	kg
Ammonia [Inorganic emissions to fresh water]	0.00136	kg
Arsenic [Heavy metals to fresh water]	0.00189	kg
Biological oxygen demand (BOD) [Analytical measures to fresh water]	0.281	kg
Cadmium [Heavy metals to fresh water]	0.0189	kg
Chemical oxygen demand (COD) [Analytical measures to fresh water]	1.83	kg
Chlorine (dissolved) [Inorganic emissions to fresh water]	0.00945	kg
Chromium [Heavy metals to fresh water]	0.019	kg
Chromium (+VI) [Heavy metals to fresh water]	0.000945	kg
Copper [Heavy metals to fresh water]	0.0284	kg
Cyanide [Inorganic emissions to fresh water]	0.00189	kg
Fluorine [Inorganic emissions to fresh water]	0.0189	kg
Iron [Heavy metals to fresh water]	0.0283	kg
Lead [Heavy metals to fresh water]	0.000945	kg
Manganese [Heavy metals to fresh water]	0.0189	kg
Mercury [Heavy metals to fresh water]	0.0000945	kg
Nickel [Heavy metals to fresh water]	0.0283	kg
Nitrate [Inorganic emissions to fresh water]	0.0945	kg
Nitrogen (as total N) [Inorganic emissions to fresh water]	0.485	kg
Oil (unspecified) [Hydrocarbons to fresh water]	0.119	kg
Phenol (hydroxy benzene) [Hydrocarbons to fresh water]	0.00945	kg
Phosphorus [Inorganic emissions to fresh water]	0.0488	kg
Selenium [Heavy metals to fresh water]	0.000473	kg
Solids (dissolved) [Analytical measures to fresh water]	1.68	kg
Solids (suspended) [Particles to fresh water]	1.03	kg
Sulphide [Inorganic emissions to fresh water]	0.0189	kg

Total organic bounded carbon [Analytical measures to fresh water]	0.0188	kg
Vanadium [Heavy metals to fresh water]	0.00189	kg
Zinc [Heavy metals to fresh water]	0.0474	kg

Compaction

Inputs		
Knit fabric	1180	kg
Electricity	219	MJ
Thermal energy	1.12	MJ
Thermal energy from heavy fuel oil	667	MJ
Thermal energy from natural gas	779	MJ
Outputs		
Knit fabric	1180	kg
Steam	32.2	kg
Fabric waste to recycling	5.21	kg

Cut-and-sew Unit Process Data

Inputs		
Electricity	375	MJ
Polyester resin (unsaturated; UP)	0.939	kg
Outputs		
Cotton garment	1000	kg
Waste (unspecified)	176	kg

Use Phase Unit Process Data

Inputs		
Cotton garment	1000	kg
Detergent	373	kg
Electricity	20000	MJ
Thermal energy	574	MJ
Water (tap water)	316000	kg
Outputs		
Cotton garment	1000	kg
Water to wastewater treatment	158000	kg
Water vapour	158000	kg

End of Life

Inputs

Cotton garment	1000	kg
----------------	------	----

Outputs

Incineration of textiles	457	kg
--------------------------	-----	----

Landfill of textiles	468	kg
----------------------	-----	----

Litter/Wild Landfill of textiles	75	kg
----------------------------------	----	----

Annexe 10 : Inventaire des flux pour les systèmes « polyester »

Les données d'inventaire mentionnées ci-dessous sont issues du rapport *Environmental assessment of Swedish fashion consumption: Five garments – sustainable futures*[74], disponibles en Appendix 2 dans le document original.

Type	Materials/Fuels	Amount	Unit
A2.1.3 Polyester fibre production, per kg			
A2.1.3.1 Polyester fibre production, per kg			
	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, at plant/RER S	1	kg
	Melt spinning of PES to fibers	1	kg
A2.1.3.2 Melt spinning of PES fibres, per kg			
	Lubricating oil, at plant/RER S	0.01	kg
	Manganese, at regional storage/RER S	0.0001	kg
	Cobalt, at plant/GLO S	0.0001/2	kg
	Antimony, at refinery/CN S	0.0001/2	kg
	Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H ₂ O, at plant/RER S	0.0001	kg
	Electricity mix modelled according to A2.1.1	4.9	kWh
Emissions to air			
	Terephthalate, dimethyl	0.0001	kg
A2.1.6 Yarn spinning, per kg			
A2.1.6.4 Yarn spinning from filament fibres, per kg			
	Lubricating oil, at plant/RER S	0.0305	kg
	Electricity mix	2.08	kWh
	Compressed air, average generation, >30kW, 6 bar gauge, at compressor/RER S	25	m ³
	Waste incineration of textile fraction of industrial waste	0.005	kg
A2.1.7 Knitting to fabric, per kg			
A2.1.7.1 Knitting to fabric, 250 dtex, per kg			
	Paraffin, at plant/RER S	0.01	kg
	Lubricating oil, at plant/RER S	0.1	kg
	Electricity mix modelled according to A2.1.1	2.854	kWh
	Disposal, textiles, soiled, 25% water, to municipal incineration/CH S	0.015	kg
A2.1.7.2 Knitting to fabric for T-shirt, in GaBi, per kg Inputs			

Spinned cotton	1.0152	kg
RER: lubricating oil, at plant	0.1	kg
RER: ethoxylated alcohols (AE7), petrochemical, at plant	0.004	kg
RER: paraffin, at plant	0.01	kg
Electricity mix modelled according to A2.1.1	1.044	MJ
Outputs		
Knitted cotton fabric	1	kg
Waste to treatment (CH: disposal, textiles, soiled, 25% water, to municipal incineration)	0.0152	kg

A2.1.10 Wet treatment, dyeing and printing, per kg

A2.1.10.1 Bleaching of fabric for T-shirt, per kg

Water, river	6*10/1000	m ³
Materials/fuels		
Lubricant, average	0.004*10*2	kg
Detergent/Wetting agent, average	0.002*10*2	kg
Acid (formic acid), average	0.001*10	kg
Peroxide stabilizer, average	0.0002*10	kg
Base (alkali) (NaOH), average	0.0025*10	kg
Bleach (H ₂ O ₂), average	0.007*10	kg
Optical brightener, average	0.06	kg
Acid (sulphuric acid), average	0.001*10*2	kg
Softener, average	0.03	kg
Electricity mix	0.0933*0.8	kWh
Heat, light fuel oil, at boiler 10kW, non modulating/CHS	123/350	kWh
Air emissions		
Air emissions from 1 kg Lubricant, average	0.08	kg
Air emissions from 1 kg Detergent/Wetting agent, average	0.04	kg
Air emissions from 1 kg Acid (formic acid), average	0.01	kg
Air emissions from 1 kg Peroxide stabilizer, average	0.002	kg
Air emissions from 1 kg Bleach (H ₂ O ₂), average	0.07	kg
Air emissions from 1 kg Acid (sulfuric acid), average	0.02	kg
Water emissions		

Water emissions from 1 kg Lubricant, average	0.08	kg
Water emissions from 1 kg Detergent, average	0.04	kg
Water emissions from 1 kg Acid (formic acid), average	0.01	kg
Water emissions from 1 kg Peroxide stabilizer, average	0.002	kg
Water emissions from 1 kg Base (NaOH), average	0.025	kg
Water emissions from 1 kg Bleach (H ₂ O ₂), average	0.07	kg
Water emissions from 1 kg Optical brightener, average	0.06	kg
Water emissions from 1 kg Acid (sulfuric acid), average	0.02	kg
Water emissions from 1 kg Softener, average	0.03	kg
COD, Chemical Oxygen Demand	0.0002	kg
Waste to treatment		
Disposal, sludge from pulp and paper production, 25% water, to sanitary landfill/CH EcoInvent System	0.5	kg
A2.1.10.2 Drying of cotton fabric in stenter frame, per kg		
Bleached cotton	1	kg
Electricity mix	5.04	MJ
Outputs		
Dried cotton fabric	1	kg
A2.1.10.5 Dyeing PES tricot black in jet dyeing machine		
Water. river	7 * 0.005	m ³
Materials/fuels		
Ultravon EL	0.001*5	kg
Invatex CS	0.001*5	kg
Soda. powder. at plant/RER S	(0.001+0 .002)*5	kg
Breviol PAM-N Univadine DP	0.001*5	kg
Univadine DP	0.001*5	kg
Ammonium sulphate. as N. at regional storehouse/RER S	0.001*5	kg
Cibatex AR	0.002*5	kg
Terasil Black WS-N	0.05*5	kg
Acetic acid. 98% in H ₂ O. at plant/RER S	0.001*2* 5	kg
Sodium hydroxide. 50% in H ₂ O. production mix. at plant/RER S	0.005*5	kg
Sodium dithionite. anhydrous. at plant/RER S	0.005*5	kg
Cibapon OS	0.002*5	kg

	Sapamine FPG	0.03*5	kg
Electricity/ heat			
	Electricity. medium voltage. production CENTREL. at grid/CENTREL EcoInvent System	0.0933*0.8+1.4	kWh
	Heat. light fuel oil. at boiler 10kW condensing. non-modulating/CH EcoInvent System	123/350	kWh
Emissions to air			
	Remazol black B	16.5/100 00	kg
	Acetic acid	0.01/100 00	kg
Emissions to water			
	Isobutyl acrylate	$0.001*1.25*5*0.3*0.01$	kg
	Formaldehyde	$0.001*1.25*5*0.0025*0.01$	kg
	Alcohol ethoxylate	$(0.001*2.25+0.002)*5*0.3*0.01$	kg
	Glyphosate	$0.001*5*0.9*0.01$	kg
	Sodium. ion	$(0.003+0.005)/2*5*0.01$	kg
	Carbonate	$0.003/2*5*0.01$	kg
	Diethylene glycol monomethyl ether	$0.001*5*0.9*0.01$	kg
	Ammonium. ion	$0.001/2*5*0.01$	kg
	Sulfate	$0.001/2*5*0.01$	kg
	Alkylbenzenesulfonic acid. sodium salt c10- c13	$0.002*5*0.9*0.01$	kg
	Remazol black B	$0.25*0.1*0.01$	kg
	Acetic acid	$0.002*5*0.3*0.01$	kg
	Sodium hydroxide	$0.005*5*0.01$	kg
	Sulfite	$0.005/2*5*0.01$	kg
	Fatty acids as C	$0.15*0.25*5*0.3*0.01$	kg
	N.n'- dimethylacetamide	$0.15*0.25*5*0.3*0.01$	kg
Waste to treatment			
	Disposal. sludge from pulp and paper production. 25% water. to sanitary landfill/CH EcoInvent System	$(0.006*3+0.003*2+0.015+0.0228)*0.99$	kg
A2.1.10.6 Pretreatment in jet machine of PES weave before printing			
	Water, river	6*10/1000	m3
Materials/ uels			

Breviol PAM-N	0.001*5	kg
Ultravon EL	0.001*5	kg
Invatex CS	0.001*5	kg
Ultravon PRE	0.001*5	kg
Electricity/ heat		
Electricity, medium voltage, production CENTREL, at grid/CENTREL EcoInvent System	0.0933*0,8	kWh
Heat, light fuel oil, at boiler 10kW condensing, non-modulating/CH EcoInvent System	123/350	kWh
Emissions to water		
Isobutyl acrylate	$0.005*1.25*0.3*0.01$	kg
Alcohol ethoxylate	$0.005*0.75*0.3*0.01$	kg
Glyphosate	$0.005*0.9*0.01$	kg
COD, Chemical Oxygen Demand	0.0002	kg
Formaldehyde	$0.005*1.25*0.0025*0.01$	kg
Waste to treatment		
Disposal, sludge from pulp and paper production, 25% water, to sanitary landfill/CH EcoInvent System	$(0.006*3+0.003*2+0.015+0.0228)*0.99$	kg

A2.1.10.13 Drying and fixation of synthetics in stenter frame

Electricity mix	1.25	kWh
-----------------	------	-----

A2.1.11 Product assembly, per kg

A2.1.11.1 T-shirt product assembly, per kg product

Dried cotton fabric	1.176	kg
Water	10.35	kg
Confectioning template	0.05	kg
Cardboard box and trims	0.06	kg
Plastic bag	0.02	kg
Electricity	2.628+0.05	kWh
Heating	3.6	MJ
Material to threads	0.0035	kg
Production of threads	0.003	kg
Output		
Textile waste	0.176	kg
T-shirt	1	kg

A2.3.2 Residential washing

A2.3.2.1 Inventory for the washing of 1 kg garment in 40 degrees

Garment	1	kg
Water	6.2	kg
Detergent	0.013	kg
Electricity	0.225	kWh
Outputs		
Garment	1	kg
Washing water	6.2	kg