



Méthodologie de prédiction de la durée de vie des vêtements selon la qualité des textiles et le comportement des consommateurs - Contribution à la réduction des impacts environnementaux: Contribution à la réduction des impacts environnementaux

Maximilien Schrub

► **To cite this version:**

Maximilien Schrub. Méthodologie de prédiction de la durée de vie des vêtements selon la qualité des textiles et le comportement des consommateurs - Contribution à la réduction des impacts environnementaux: Contribution à la réduction des impacts environnementaux. Génie des procédés. Centrale Lille Institut, 2022. Français. NNT: 2022CLIL0008 . tel-04030486

HAL Id: tel-04030486

<https://theses.hal.science/tel-04030486>

Submitted on 15 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CENTRALE LILLE

THESE

Présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

En

Spécialité : Génie des procédés

Par

Maximilien SCHRUB

DOCTORAT DÉLIVRÉ PAR CENTRALE LILLE

Titre de la thèse :

METHODOLOGIE DE PREDICTION DE LA DUREE DE VIE DES VETEMENTS SELON
LA QUALITE DES TEXTILES ET LE COMPORTEMENT DES CONSOMMATEURS -
CONTRIBUTION A LA REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Soutenue le 22/03/2022 devant le jury d'examen :

Président	<i>Maud, Herbert, Professeur, Université de Lille, IAE Lille</i>
Rapporteur	<i>Dominique Millet, Professeur, Université de Toulon</i>
Rapporteur	<i>Karine Gautier, Maître de conférences, ENSISA</i>
Membre	<i>Marc Zolghadri, Professeur, SupMeca Paris</i>
Membre	<i>Gauthier Bedek, Docteur, Responsable Innovation, Groupe ERAM</i>
Membre	<i>Maryline Lewandowski, Maître de conférences, ENSAIT</i>
Membre	<i>Éric Staniek, Direction DRESS, Région Hauts-de-France</i>
Membre	<i>Erwan AUTRET, Coordinateur de Pôle - Service Ecoconception et recyclage, ADEME</i>
Membre	<i>Isabelle Robert, Maître de conférences, Université de Lille, IAE Lille</i>
Co-directeur de thèse	<i>Sébastien Thomassey, Maître de conférences, ENSAIT</i>
Directeur de thèse	<i>Anne Perwuelz, Professeur, ENSAIT</i>

Thèse préparée dans le Laboratoire GEMTEX
École Doctorale EDSPI



Remerciements

Ces remerciements annoncent pour moi la fin de cette thèse et l'occasion de prendre du recul sur ces travaux amorcés en 2018. Cette thèse est un mélange étonnant, il est autant le fruit d'un travail solitaire que celui de maintes collaborations, échanges et discussions et pour cela je remercie l'ensemble des personnes qui y ont contribué.

Mes premiers remerciements vont à Anne PERWUELZ, Sébastien THOMASSEY et Romain BENKIRANE sans qui ces travaux n'auraient pas pu voir le jour, puisque c'est ensemble que nous avons pensé et créé l'opportunité de cette thèse. Je remercie également la Région Hauts-de-France, en les personnes de Philippe SUISSE et Christelle DEMARTEZ respectivement de la *direction de la recherche, de l'enseignement supérieur et de la santé* et de la *direction de l'environnement*, et bien sûr l'ADEME en la personne d'Erwan AUTRET de la *Coordination du Pôle Conception de produits/services à haute performance environnementale* pour l'accompagnement qu'ils ont pu prodiguer et pour le soutien financier qu'ils ont apporté, rendant ainsi possible cette recherche.

Je tiens à nouveau à remercier Anne PERWUELZ *professeur des universités à l'ENSAIT* et ma directrice de thèse, Sébastien THOMASSEY *maître de conférences HDR à l'ENSAIT* et mon co-directeur de thèse, Maryline LEWANDOVSKI *maître de conférences à l'ENSAIT* et Isabelle Robert *maître de conférences à l'IAE de Lille* qui ont co-encadré ces travaux pour m'avoir accordé leur confiance, m'avoir conseillé, accompagné et fait profiter de leurs expériences tout au long de la mise en œuvre et de la conduite de ce projet ambitieux pour lequel ils m'ont accordé leur confiance. J'ai appris énormément à leurs côtés, autant dans leurs disciplines académiques respectives pour lesquelles j'ai appris à faire le grand écart intellectuel, que du point de vue purement humain. Ce projet a été pour moi un pilier stable qui m'a toujours tenu et ancré malgré les épreuves que j'ai pu traverser pendant cette période. C'est également la concrétisation d'une évolution personnelle et professionnelle faramineuse et pour cela je souhaite vous dire un grand Merci !

Je remercie toutes les personnes ayant participé à la campagne de test au porter que j'ai organisé dans le cadre de ces travaux et sans qui les plus beaux résultats de cette thèse n'auraient pas vu le jour. Je remercie également l'ensemble du personnel des services administratifs de l'ENSAIT et du GEMTEX qui m'ont beaucoup aidé, mais aussi beaucoup appris, notamment lors des Comités Techniques et des Réunions de Laboratoire.

Je souhaite remercier également l'ensemble des industriels et metteurs en marché qui ont contribué de près ou de loin à ces travaux pour les produits gracieusement donnés et les échanges intéressants autour de la qualité des vêtements. Merci pour le temps et la confiance que vous m'avez accordée.

Sur un ton plus personnel, je remercie Vivien BARRAL, mon frère d'une autre mère avec qui j'ai traversé vents et marées depuis la seconde jusqu'à nos doctorats, merci pour tout. Je remercie également le reste des Boyz : Charles LANCERON dont l'humour caustique réveillerait un mort, Louis MARISCHAL pour sa jovialité inaltérable et Quentin « Junior » DEPOERS qui nous a rejoints comme s'il avait été toujours là. Je remercie aussi mon ami Romain HELLO qui en dépit des années et des centaines de kilomètres répond toujours présent. À notre prochain Gueuleton qui tarde toujours trop !

Merci à mes parents pour leur soutien indéfectible et leur amour dans les mauvais comme dans les bons moments, merci à mon frère jumeau dont la rigueur et la capacité de travail resteront une immense source d'inspiration pour moi.

Mes derniers remerciements s'adressent sur un ton plus intime à ma compagne Emilie JEANNE, son soutien permanent, sa confiance et son amour ont grandement participé à la réussite de ces travaux. Je la remercie pour toutes les merveilles qu'elle m'apporte au quotidien.

Merci.

Index des figures

FIGURE 1 : ROUE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE [16].	2
FIGURE 2 : ÉTAPES DE FABRICATION D'UN VETEMENT TEXTILE ET LES PRINCIPAUX PROCÉDES ASSOCIÉS	5
FIGURE 3 : EXTRAIT D'UNE CLASSIFICATION DES FIBRES TEXTILES [27]	6
FIGURE 4 : LES DIFFÉRENTES DURÉES DE VIE [19]	10
FIGURE 5 : SCHEMA DE LA DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DU PRODUIT [42]	12
FIGURE 6 : VUE D'ENSEMBLE DES CAUSES, MÉCANISMES, TYPES ET CONSÉQUENCES DE L'USURE DE L'OUTIL – EXTRAIT DE [43]	13
FIGURE 7 : REPRÉSENTATION DES QUATRE PHASES D'UNE ACV [51]	15
FIGURE 8 : NOMBRE DE PUBLICATIONS AVEC LES MOTS CLÉS <i>LIFE CYCLE ASSESSMENT</i> , <i>TEXTILE</i> ET <i>CLOTHING</i> DEPUIS 2010.	17
FIGURE 9 : RÉPARTITION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE LAVAGE PAR ZONE GÉOGRAPHIQUE [75]	22
FIGURE 10 : SCHEMA GLOBAL DE LA MÉTHODOLOGIE ET DES AXES DE TRAVAIL DE LA THÈSE.	27
FIGURE 11 : LA NOUVELLE CULTURE DE LA MODE. [13]	29
FIGURE 12 : DÉROULEMENT D'UNE ANALYSE DE CONTENU [116]	49
FIGURE 13 : RÉPARTITION DES RÉPONDANTS ET DE LA POPULATION FRANÇAISE PAR ÂGE [111]	55
FIGURE 14 : RÉPARTITION DES RÉPONDANTS ET DE LA POPULATION FRANÇAISE PAR ÂGE APRÈS ÉCHANTILLONNAGE [111].	56
FIGURE 15 : DENDROGRAMME DE LA CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE POUR LA TYPOLOGIE ENVIRONNEMENT.	58
FIGURE 16 : RÉPARTITION DES RÉPONDANTS SELON LES ATTRIBUTS SENSIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE ET ACTION ENVIRONNEMENTALE ET LEUR CLASSE D'APPARTENANCE	59
FIGURE 17 : RÉPARTITION DE L'EFFECTIF DES CLASSES ENVIRONNEMENTALES DE CONSOMMATEURS EN FONCTION DE LEUR SENSIBILITÉ ENVIRONNEMENTALE.	60
FIGURE 18 : RÉPARTITION DE L'EFFECTIF DES CLASSES ENVIRONNEMENTALES EN FONCTION DU NOMBRE D' ACTIONS ENVIRONNEMENTALES POSITIVES EFFECTUÉE AU COURS DES 6 DERNIERS MOIS.	60
FIGURE 19 : DENDROGRAMME DE LA CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE POUR LA TYPOLOGIE ACHAT.	64
FIGURE 20 : RAPPORT DE GAIN D'INFORMATION DE CHAQUE ATTRIBUT DE LA TYPOLOGIE D'ACHAT.	65
FIGURE 21 : RÉPARTITION DE L'EFFECTIF DE CHAQUE CLASSE EN FONCTION DE LA FRÉQUENCE D'ACHAT.	66
FIGURE 22 : RÉPARTITION DE L'EFFECTIF DE CHAQUE CLASSE EN FONCTION DU NOMBRE DE VÊTEMENTS ACHETÉS PAR AN.	66
FIGURE 23 : RÉPARTITION DE L'EFFECTIF DE CHAQUE CLASSE EN FONCTION DU PRIX UNITAIRE.	67
FIGURE 24 : DENDROGRAMME DE LA CLASSIFICATION DES PROFILS D'ENTRETIEN DES CONSOMMATEURS (ENT).	69
FIGURE 25 : RAPPORT DE GAIN D'INFORMATION DE CHAQUE ATTRIBUT DE LA TYPOLOGIE D'ENTRETIEN.	71

FIGURE 26 : DENDROGRAMME DE LA CLASSIFICATION ENTRETIEN (ENT).....	71
FIGURE 27 : REPARTITION DES EFFECTIFS DES CLASSES D'ENTRETIEN EN FONCTION DE L'ATTRIBUT REPASSAGE.....	72
FIGURE 28 : REPARTITION DES EFFECTIFS DES CLASSES D'ENTRETIEN EN FONCTION DE L'ATTRIBUT ADAPTATION LAVAGE.....	72
FIGURE 29 : REPARTITION DES EFFECTIFS DES CLASSES D'ENTRETIEN EN FONCTION DE L'ATTRIBUT CONSEIL ETIQUETTE.....	73
FIGURE 30 : TAUX DE REPARATION DES DIFFERENTS PROFILS ENVIRONNEMENTAUX DES CONSOMMATEURS.....	74
FIGURE 31 : TAUX DE REPARATION DES DIFFERENTS PROFILS D'ACHAT DES CONSOMMATEURS.	75
FIGURE 32 : REPARTITION DES CONSOMMATEURS AU SEIN DES TYPOLOGIES ENVIRONNEMENT, ACHAT ET ENTRETIEN.....	76
FIGURE 33 : COMPARAISON CROISEE DES EFFECTIFS DES TYPOLOGIES ENVIRONNEMENTALE ET D'ACHAT.....	77
FIGURE 34 : TAUX DE REPARATIONS DES DIFFERENTS SOUS-GROUPES ACHAT/ENVIRONNEMENT DE CONSOMMATEURS.....	78
FIGURE 35 : REPARTITION CROISEE DES EFFECTIFS DES CLASSES D'ENTRETIEN ET DES CLASSES ENVIRONNEMENTALES DES CONSOMMATEURS.....	79
FIGURE 36 : POURCENTAGES D'UTILISATION DES PROGRAMMES DE LAVAGE AU SEIN DES PROFILS ENVIRONNEMENTAUX.	80
FIGURE 37 : SCHEMA DE PRINCIPE D'UN MODELE PREDICTION GENERIQUE	96
FIGURE 38 : PHOTOS DE 4 DES 26 REFERENCES DE PULLS ETUDIES.....	100
FIGURE 39: DIFFERENTS STADES DU TRAITEMENT D'IMAGE UTILISE POUR EVALUER LE FACTEUR DE COUVERTURE DES TRICOTS	101
FIGURE 40 : COURBES DE BOULOCHAGE SELF ET NORM DU PULL PZR.	103
FIGURE 41 : PRINCIPE GENERAL DU MODELE DE PREDICTION DES CLASSES DE COMPORTEMENT AU BOULOCHAGE.	107
FIGURE 42 : COURBES DE VIEILLISSEMENT AU BOULOCHAGE SELF.....	108
FIGURE 43 : COURBES DE VIEILLISSEMENT AU BOULOCHAGE NORM	109
FIGURE 44 : INDICE SILHOUETTE DES ITERATIONS DE LA METHODE K-MOYENNE POUR K ENTRE 2 ET 10.....	110
FIGURE 45 : COURBES DE BOULOCHAGE (A,B,C) ET CENTRES DE CLASSE (D) ASSOCIEES SUR LES DONNEES SELF.....	110
FIGURE 46 : COURBES DE BOULOCHAGE (A,B,C) ET CENTRES DE CLASSE (D) ASSOCIEES SUR LES DONNEES NORM	111
FIGURE 47 : MATRICES DE CONFUSION DES PREDICTIONS DES COMPORTEMENTS AU BOULOCHAGE SELF ET NORM.....	115
FIGURE 48 : COURBE DE BOULOCHAGE AU PORTER DES PULLS	119
FIGURE 49 : ILLUSTRATION DE LA METHODE D'ESTIMATION DU NOMBRE DE CYCLES MARTINDALE CORRESPONDANT A UN PORTER..	120
FIGURE 50 : COURBES DE BOULOCHAGES EN LABORATOIRE ET AU PORTER.	120
FIGURE 51 : ERREURS QUADRATIQUES (MSE) DES PULLS EN FONCTION DES VALEURS DE CYCLES/PORTER.....	122
FIGURE 52 : COURBES DE BOULOCHAGE DES PRODUITS PORTES ET DES CLASSES DE BOULOCHAGES EN LABORATOIRE POUR CYCLES/PORTER.	141 123

FIGURE 53 : COMPARAISON DES COTATIONS AU PORTER ET LES COURBES LABORATOIRE APRES OPTIMISATION PAR CLASSE DE COMPORTEMENT.....	124
FIGURE 54 : COURBES DE BOULOCHAGE DES CLASSES FRAGILE, MOYEN ET SOLIDE CAS LABORATOIRE (L) ET PORTER (P).	125
FIGURE 55 : INTERPOLATION DES COURBES DE BOULOCHAGE DES CENTRES DE CLASSE DES CLASSES DE BOULOCHAGE EN LABORATOIRE ET AU PORTER.....	126
FIGURE 56 : COURBES DE BOULOCHAGE DES PRODUITS PORTES	127
FIGURE 57 : SCHEMA DE LA DEMARCHE D'ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE DES PULLS	129
FIGURE 58 : ESTIMATION DES DUREES DE VIE DES PULLS EN FONCTION DE LEUR CLASSE DE COMPORTEMENT ET DU SEUIL DE BOULOCHAGE ACCEPTABLE PAR LE CONSOMMATEUR.....	129
FIGURE 59 : ARBRE DE CONSTRUCTION DES SCENARIOS D'USAGE.	140
FIGURE 60 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN PULL MOYEN PORTE PAR UN CONSOMMATEUR RATIONNEL – INSENSIBLE.	146
FIGURE 61 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX D'UN PULL MOYEN PORTE PAR UN CONSOMMATEUR RATIONNEL – INSENSIBLE AVEC LE DETAIL DES SCENARIOS D'USAGE UTILISES PAR CES CONSOMMATEURS.	147
FIGURE 62 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES SCENARIOS DE PRODUITS ET DE CONSOMMATEURS.....	151
FIGURE 63 : ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CONSOMMATEURS MINIMALISTES - HYPERSENSIBLES POUR DIFFERENTS PORTERS AVANT LAVAGE.....	158
FIGURE 64 : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CONSOMMATEURS MINIMALISTES - HYPERSENSIBLES SUR LES IMPACTS OS ET ERE POUR DIFFERENTS PORTERS AVANT LAVAGE CAS USP.	158
FIGURE 65 : EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CONSOMMATEURS MINIMALISTES - HYPERSENSIBLES FOCUS SUR LES IMPACTS OS ET ERE POUR DIFFERENTS PORTERS AVANT LAVAGE CAS USL.....	159
FIGURE 66 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES SCENARIOS DE CONSOMMATEUR ET CLASSES DE PRODUITS POUR UN PULL PORTE 2 FOIS AVANT LAVAGE.	160
FIGURE 67 : COMPARAISON POUR UN PULL SOLIDE LAVE APRES CHAQUE PORTER ET UN PRODUIT MOYEN PORTER 2 FOIS AVANT CHAQUE ENTRETIEN.	161
FIGURE 68 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR PLUSIEURS VALEURS DE SEUIL DE BOULOCHAGE ACCEPTABLE PAR LE CONSOMMATEUR MINIMALISTE – HYPERSENSIBLE POUR UN PULL MOYEN.	163
FIGURE 69 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POUR PLUSIEURS VALEURS DE SEUIL DE BOULOCHAGE ACCEPTABLE PAR LE CONSOMMATEUR MINIMALISTE – HYPERSENSIBLE POUR CHAQUE CLASSE DE PULLS.	164

FIGURE 70 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DU CONSOMMATEUR MINIMALISTE — HYPERSENSIBLE POUR UN PULL MOYEN AVEC UN SEUIL DE BOULOCHAGE A 1 ET UN PULL SOLIDE AVEC UN SEUIL DE BOULOCHAGE A 3.....	164
FIGURE 71 : SENSIBILITE DES SCENARIOS DE CONSOMMATEUR EN FONCTION DU GAIN DE DUREE DE VIE ISSUE DE LA REPARATION. ..	166
FIGURE 72 : SENSIBILITE DES SCENARIOS DE PRODUIT EN FONCTION DU GAIN DE DUREE DE VIE ISSUE DE LA REPARATION	167

Index des tableaux

TABEAU 1 : DUREES DE VIE PRISES EN COMPTE DANS DES ACV DE T-SHIRTS ET DE JEANS [41].	19
TABEAU 2 : TYPOLOGIES DE CONSOMMATEURS RESPONSABLES ISSUS DE LA LITTERATURE EN SOCIOLOGIE ET EN MARKETING.	39
TABEAU 3 : REPARTITION DES CATEGORIES SOCIOPROFESSIONNELLES DANS LA POPULATION FRANÇAISE EN 2020 [110].	41
TABEAU 4 : PYRAMIDE DES AGES DE LA POPULATION FRANÇAISE EN 2020 [111].	42
TABEAU 5 : POURCENTAGE D'HOMMES ET DE FEMMES PARMIS LES REpondANTS DU SONDAGE ET LA POPULATION FRANÇAISE [117]	54
TABEAU 6 : CORRESPONDANCE ENTRE LES TYPES DE CONSOMMATEURS OBTENUS ICI ET CEUX DE LA LITTERATURE.	62
TABEAU 7 : CARACTERISTIQUES DES CENTRES DE CLASSES OBTENUS SELON CHAQUE ATTRIBUT DE CLASSIFICATION.	70
TABEAU 8 : ANALYSE THEMATIQUE DES ENTRETIENS.	81
TABEAU 9 : PARAMETRES INFLUENÇANT LE BOULOCHAGE DANS LES TRICOTS SELON LA LITTERATURE	91
TABEAU 10 : RESUME DES MODELES DE PREDICTION DU BOULOCHAGE DE LA LITTERATURE	97
TABEAU 11 : SYNTHESE DES CARACTERISTIQUES DES PRODUITS ET DES MESURES EN LABORATOIRE	101
TABEAU 12 : LISTE DES 26 PULLS ET LEURS PRINCIPALES CARACTERISTIQUES	102
TABEAU 13 : PANEL DES PORTEURS	104
TABEAU 14 : TABLEAU DES CLASSES ET DES CARACTERISTIQUES DES PULLS.	112
TABEAU 15 : RESULTATS DES MODELES BAYESIENS DE PREDICTION DU BOULOCHAGE	114
TABEAU 16 : DIFFERENCE DE COTATION DU BOULOCHAGE ENTRE LES ZONES AISSELLE ET VENTRE AU COURS DU PORTER.	118
TABEAU 17 : MATRICE DE CONFUSION DES CLASSES SELF/PORTER ET NORM/PORTER DES PULLS TESTES.	127
TABEAU 18 : DUREES DE VIE ET FLUX DE REFERENCE DES PULLS CONSIDERES.	135
TABEAU 19 : COMPOSITIONS DES PULLS TESTES ET DU PULL MOYEN.	136
TABEAU 20 : SYNTHESE DE L'INVENTAIRE DE LA PHASE DE FABRICATION DU PULL.	138
TABEAU 21 : PROGRAMMES ET TEMPERATURES DE LAVAGE MODELISES.	139
TABEAU 22 : TAUX D'UTILISATION DES MODULES D'ENTRETIEN PAR LES SCENARIOS D'USAGE POUR L'ACV.	141
TABEAU 23 : REPARTITION DES EFFECTIFS DES PROFILS DE CONSOMMATEURS ENTRE LES PROFILS D'ENTRETIEN.	142
TABEAU 24 : DUREES DE VIE DES PRODUITS ET FLUX DE REFERENCE DE L'ACV EN FONCTION DE LA CLASSE DE PRODUIT APRES AJOUT DE LA REPARATION.	143
TABEAU 25 : CATEGORIES D'IMPACTS CONSIDERES PAR LA METHODE DE CALCUL ILCD.	144
TABEAU 26 : TAUX D'UTILISATION DES SCENARIOS D'USAGE PAR LE CONSOMMATEUR RATIONNEL - INSENSIBLE ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIES.	147

TABLEAU 27 : SCENARIOS CORRESPONDANT AUX EXTREMUMS POUR CHAQUE IMPACT ENVIRONNEMENTAL POUR UN PULL MOYEN.	148
TABLEAU 28 : DUREES DE VIE ET FLUX DE REFERENCE DES SCENARIOS.	151
TABLEAU 29 : COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES DIFFERENTS SCENARIOS.	152
TABLEAU 30 : COMPARAISON ENTRE LE POTENTIEL DE GAIN ENTRE DIFFERENTS SCENARIOS CONSOMMATEURS ET PRODUITS	153
TABLEAU 31 : DIFFERENCES DE COTATION MOYENNE DE BOULOCHAGE AVANT ET APRES LE LAVAGE POUR DIFFERENTS NOMBRE DE PORTER.	155
TABLEAU 32 : COMPARAISON DES PARAMETRES ENTRE LES SCENARIOS 1P:L, 2P:L UsP ET 2P:L UsL	157
TABLEAU 33 : DUREES DE VIE DES PULLS SELON DIFFERENTS SEUILS DE BOULOCHAGE ACCEPTABLES PAR LES CONSOMMATEURS.....	162
TABLEAU 34 : DUREES DE VIE SUPPLEMENTAIRE PRODUITE PAR LA REPARATION.....	166

Liste des Annexes

ANNEXE 1 : MODELISATION DU FIL SUR SIMAPRO.....	192
ANNEXE 2 : MODELISATION DU TRICOTAGE.....	192
ANNEXE 3 : MODELISATION DE LA CONFECTION DU PULL.....	193
ANNEXE 4 : MODELISATION DES PROGRAMMES ET TEMPERATURES DE LAVAGE.....	193
ANNEXE 5 : MODELISATION DU SECHE-LINGE D'UNE CAPACITE DE 7 KG.	193
ANNEXE 6 : MODELISATION DU REPASSAGE D'UN PULL.	194
ANNEXE 7 : MODELISATION DE LA LESSIVE NORMEE NF EN ISO 6330.	194
ANNEXE 8 : MODELISATION DE LA PHASE DE DISTRIBUTION DU PULL.	194
ANNEXE 9 : RECAPITULATIF DES PARAMETRES D'ACV DES SCENARI X PORTER AVANT LAVAGE POUR X = 2,5,10 ET POUR CHAQUE TYPE DE PULLS.	195

Liste des équations

ÉQUATION 1 : PERTE D'INERTIE LORS DU REGROUPEMENT DE A ET B.	47
ÉQUATION 2 : EQUATION DE L'ECART QUADRATIQUE MOYEN ENTRE LES COTATIONS AU PORTER ET LES POINTS DE LA COURBE DE BOULOCHAGE EN LABORATOIRE CORRESPONDANT.	121

Table des matières

REMERCIEMENTS	V
INDEX DES FIGURES.....	VII
INDEX DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES ANNEXES	XIII
LISTE DES EQUATIONS	XIII
TABLE DES MATIERES	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : CONTEXTE ET METHODOLOGIE.....	5
I.1 LA FABRICATION D'UN VETEMENT	5
I.1.1 LE VETEMENT, UN PRODUIT COMPLEXE	5
I.1.2 LES MATIERES PREMIERES	5
I.1.3 DES FIBRES AUX FILS	6
I.1.4 DU FIL A L'ETOFFE	8
I.1.5 L'ENNOBLISSEMENT.....	8
I.1.6 LA CONFECTION DES VETEMENTS	9
I.2 LA DUREE DE VIE	10
I.2.1 DEFINITION	10
I.2.2 LA PREDICTION ET LA MESURE D'UNE DUREE DE VIE	11
I.3 L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES VETEMENTS.....	14
I.3.1 DEFINITION ET NORME	14
I.3.2 LES LIMITES DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	16
I.3.3 LA DUREE DE VIE DES VETEMENTS DANS L'ACV	18
I.3.4 LE CONSOMMATEUR DANS L'ACV TEXTILE	21
I.4 METHODOLOGIE GENERALE	24
CHAPITRE II : ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES CONSOMMATEURS.....	28
II.1 ÉTAT DE L'ART, L'AVENEMENT DU CONSOMMATEUR RESPONSABLE	28
II.1.1 LE CONSOMMATEUR RESPONSABLE : UN CONSOMMATEUR DIFFICILE A CERNER.	29
II.1.2 LES MOTIVATIONS ET BARRIERES A CONSOMMER RESPONSABLE.....	31
II.1.3 LE FOSSE ENTRE L'ATTITUDE ET LE COMPORTEMENT ET LA NOTION DE « VALUE-ACTION GAP »	35
II.1.4 LE CONCEPT DE SENSIBILITE ENVIRONNEMENTALE	36
II.1.5 LES DIFFERENTES TYPOLOGIES DE CONSOMMATEURS RESPONSABLES.	37

II.2	METHODES ET OUTILS POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES CONSOMMATEURS	40
II.3	LE SONDAGE	40
II.3.1	ECHANTILLON ET FICHE SIGNALETIQUE	41
II.3.2	CONCEPTION DU SONDAGE	42
II.3.2.1	<i>Axe Environnement.....</i>	<i>43</i>
II.3.2.2	<i>Axe Consommation.....</i>	<i>44</i>
II.3.2.3	<i>Axe Entretien</i>	<i>45</i>
II.3.2.4	<i>Méthode de construction des typologies.....</i>	<i>46</i>
II.3.3	L'APPROCHE QUALITATIVE.....	47
II.3.3.1	<i>Préanalyse.....</i>	<i>49</i>
II.3.3.2	<i>Le codage</i>	<i>50</i>
II.3.3.3	<i>La catégorisation</i>	<i>52</i>
II.3.3.4	<i>Techniques d'analyse.....</i>	<i>52</i>
II.4	PRETRAITEMENT DES RESULTATS DU SONDAGE	54
II.4.1	NETTOYAGE DES DONNEES	54
II.4.2	ÉCHANTILLONNAGE POUR UNE MEILLEURE REPRESENTATIVITE	54
II.5	DEFINITION DES TYPOLOGIES DE CONSOMMATEURS	56
II.5.1	CLASSIFICATION ET FORMATION DES TYPOLOGIES.....	56
II.5.2	EXTRACTIONS DES DIFFERENTES TYPOLOGIES DE CONSOMMATEURS.....	57
II.5.2.1	<i>Typologie Environnementale.....</i>	<i>57</i>
II.5.2.2	<i>Typologie d'achat</i>	<i>63</i>
II.5.2.3	<i>Typologie d'entretien.....</i>	<i>67</i>
II.5.2.4	<i>La réparation : une pratique singulière.</i>	<i>74</i>
II.6	MISE EN RELATION DES TYPOLOGIES DE CONSOMMATEUR IDENTIFIEES	75
II.6.1	MISE EN RELATION PROFILS ACHAT ET ENVIRONNEMENT.....	76
II.6.2	MISE EN RELATION DES PROFILS ENVIRONNEMENT ET ENTRETIEN	78
II.7	ANALYSE DE CONTENU DES ENTRETIENS SEMI-DIRECTIFS.....	80
II.7.1	MISE EN LUMIERE D'UN LIEN FORT ENTRE LES ACHATS ET LA SENSIBILITE ENVIRONNEMENTALE DES CONSOMMATEURS ..	80
II.7.2	MISE EN LUMIERE DE L'ABSENCE D'UN LIEN FORT ENTRE L'ENTRETIEN ET SENSIBILITE ENVIRONNEMENTALE.....	83
II.8	CONCLUSION ET BILAN DU CHAPITRE.....	86
CHAPITRE III : ETUDE DE LA DURABILITE DES PULLS.....		89
III.1	ETAT DE L'ART : LE BOULOCHAGE, CAUSE DE FIN DE VIE DES PULLS	89
III.1.1	DEFINITION	89

III.1.2	LES PARAMETRES QUI INFLUENCENT LE BOULOCHAGE	90
III.1.3	LA MESURE DU BOULOCHAGE	94
III.1.4	LA PREDICTION DU BOULOCHAGE.....	95
III.2	MATERIAUX, METHODES ET OUTILS.....	99
III.2.1	DESCRIPTION DES PULLS ETUDIES.....	100
III.2.2	METHODE DE MESURE DU VIEILLISSEMENT DES PULLS.....	102
III.2.2.1	<i>Etude du boulochage en laboratoire</i>	<i>102</i>
III.2.2.2	<i>Etude du boulochage au porter.....</i>	<i>103</i>
III.2.2.2.a	Les porteurs.....	104
III.2.2.2.b	Déroulé des tests	104
III.2.2.2.c	Les conditions de lavage.....	105
III.2.3	CLASSIFICATION ET PREDICTION DU VIEILLISSEMENT DES PRODUITS	105
III.2.3.1	<i>Classification non-supervisé des comportements au boulochage</i>	<i>105</i>
III.2.3.2	<i>Prédiction du comportement au boulochage par la méthode bayésienne</i>	<i>106</i>
III.3	MISE EN ŒUVRE DE LA METHODOLOGIE DE PREDICTION DU VIEILLISSEMENT AU BOULOCHAGE DES PULLS	108
III.3.1	ANALYSE DES RESULTATS DU BOULOCHAGE EN LABORATOIRE.....	108
III.3.1.1	<i>Classification des comportements de boulochage</i>	<i>109</i>
III.3.1.2	<i>Prédiction du comportement en laboratoire</i>	<i>113</i>
III.3.2	ANALYSE DES RESULTATS DU BOULOCHAGE LORS DES TESTS AU PORTER	116
III.4	ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE PAR COMPARAISON DES TESTS AU PORTER ET LABORATOIRE ...	119
III.4.1	CAS 1 – APPROCHE DIRECTE.....	121
III.4.2	CAS 2 – APPROCHE PAR TYPOLOGIE LABORATOIRE.....	123
III.4.3	CAS 3 – APPROCHE PAR TYPOLOGIE LABORATOIRE ET PORTER	124
III.4.4	EVALUATION DE LA DUREE DE VIE DES PULLS EN FONCTION DU SEUIL DE BOULOCHAGE ACCEPTABLE	128
III.5	BILAN DU CHAPITRE	130
CHAPITRE IV : ANALYSE DU CYCLE DE VIE, CONTRIBUTION DU CONSOMMATEUR ET DU PRODUIT		133
IV.1	OBJECTIFS ET CHOIX DU PRODUIT ETUDIE.....	133
IV.1.1	LOGICIEL D’ACV POUR L’EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DES PRODUITS ET DES PROFILS DE CONSOMMATEURS.	133
IV.1.2	UNITE FONCTIONNELLE, FLUX DE REFERENCE ET FRONTIERES DU SYSTEME.....	134
IV.1.3	INVENTAIRE DES ETAPES DE FABRICATION	135
IV.1.4	MODELISATION D’UN CYCLE D’USAGE DU PULL.....	138
IV.1.4.1	<i>Inventaires de la phase d’usage du cycle de vie.....</i>	<i>138</i>
IV.1.4.2	<i>Scenarios d’usage associés à l’entretien des consommateurs.....</i>	<i>139</i>
IV.1.4.3	<i>Prise en compte de la réparation dans le cycle de vie.....</i>	<i>142</i>

IV.2	ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	143
IV.2.1	CHOIX DES CATEGORIES D'IMPACTS	144
IV.2.2	RESULTATS D'ANALYSES ENVIRONNEMENTALES.....	145
IV.2.2.1	<i>ACV cradle to grave, profil moyen.....</i>	<i>146</i>
IV.2.2.2	<i>Comparaisons des scénarios selon les profils de consommateurs.....</i>	<i>148</i>
IV.2.2.3	<i>Comparaison des scénarios selon la qualité des pulls.....</i>	<i>150</i>
IV.3	ANALYSE DE SENSIBILITES.....	153
IV.3.1	SENSIBILITE AU NOMBRE DE PORTERS AVANT LAVAGE	154
IV.3.1.1	<i>Source de l'usure : le porter ou le lavage.....</i>	<i>154</i>
IV.3.1.2	<i>Description des scénarios.....</i>	<i>156</i>
IV.3.1.3	<i>Analyse des impacts environnementaux</i>	<i>158</i>
IV.3.2	SENSIBILITE AU SEUIL DE BOULOCHAGE ACCEPTE PAR LE CONSOMMATEUR.....	161
IV.3.2.1	<i>Description</i>	<i>162</i>
IV.3.2.2	<i>Analyse des impacts environnementaux</i>	<i>163</i>
IV.3.3	CONCLUSION SUR LES SENSIBILITES.....	165
IV.3.4	AUTRES PARAMETRES SENSIBLES	165
IV.4	BILAN DU CHAPITRE ET CONCLUSION.....	168
	CONCLUSION GENERALE	171
	RÉFÉRENCES	176
	ANNEXES	192
	RESUME.....	196
	ABSTRACT.....	197

Introduction générale

Le vêtement occupe une place particulièrement importante dans notre vie : il est à la fois objet de désir, objet identitaire et utilitaire et essentiel à notre survie et notre confort. En 2017, l'industrie du vêtement employait 300 millions de personnes à travers le monde [1]. La production mondiale de vêtement est en constante augmentation et a doublé entre les années 2000 et 2015 [1]. Cette augmentation est la conséquence de l'enrichissement progressif de la population mondiale et de l'adoption du modèle « fast fashion » par les consommateurs et par la majorité des acteurs de l'industrie textile. Ce modèle s'intègre pleinement dans le « paradigme économique dominant » qui met en avant une croissance économique infinie et promeut l'accumulation matérielle comme base du bien être humain [2]. Ce paradigme entraîne les sociétés occidentales à considérer le changement et le progrès comme des valeurs centrales, alimentant ainsi des systèmes de production et de consommation linéaire reposant sur le séquentiel suivant : extraire-fabriquer-jeter [3]. La quête de ce bien-être matériel par une population toujours plus grandissante pose le problème central auquel le monde fait face : la consommation ne peut pas croître infiniment dans un monde fini [2].

La « fast fashion », incarnation de cette économie linéaire se caractérise par la combinaison d'une production forte, rapide et en grands volumes de vêtements [4]. Le renouvellement rapide des collections à faible coût entraîne une accélération de la consommation par les utilisateurs [5]–[7]. En accord avec ce modèle, l'industrie s'est positionnée en adoptant des techniques de production à faibles coûts et des sources plus économiques de matières premières et de main-d'œuvre [8]–[10]. La globalisation et la fragmentation de la chaîne de valeur de la production textile se sont fortement intensifiées ces 30 dernières années [7], [11]. Cette augmentation de la production avec l'adoption massive de la fast-fashion a fait de l'industrie textile l'une des industries les plus polluantes. En 2015, les émissions de gaz à effet de serre de la production textile représentaient 1,2 milliard de tonnes d'équivalent CO₂. En outre, cette industrie génère de nombreuses externalités négatives environnementales et sociales [1] telles que des rejets chimiques dans les eaux ou des catastrophes humaines comme l'effondrement du Rana Plaza en avril 2013.

De nombreux acteurs de l'industrie s'engagent depuis quelques années dans le développement durable pour faire face aux problématiques sociales et environnementales du secteur. Cette notion de développement durable a été popularisée dans le rapport Bruntland avec la formulation suivante : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » [12]. Parmi les pratiques mises en place par l'industrie, on peut notamment citer le développement de gammes de vêtements écoconçus, la rationalisation des

chaînes d'approvisionnement, l'élaboration de politiques sociales ou l'utilisation de procédés moins polluants. Ces pratiques sont présentes chez de très nombreux acteurs aussi bien de la fast fashion que des acteurs du luxe. Ainsi on peut citer le groupe Kering dont les objectifs pour 2025 répondent aux directives des Nations Unies [13] avec notamment une réduction des émissions de carbone de 50 % et une réduction des impacts environnementaux de 40 %. Des acteurs traditionnels de la fast fashion s'engagent également avec par exemple H&M qui évalue l'impact environnemental de ses articles et qui avec Zara développent des lignes de produits plus responsables [13].

Face aux défis que représentent la maîtrise et la réduction des impacts environnementaux de la filière, le concept d'économie circulaire (EC) a émergé. Ce concept est apparu dans les années 1990 en tant que proposition d'un modèle économique alternatif au modèle linéaire dans les travaux de Pearce et Turner [14], [15]. En France ce concept a été défini par l'ADEME comme 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. » [15]. Ce concept est ensuite développé selon 3 axes reprenant les grandes étapes du cycle de vie des produits : la production, l'utilisation et la fin de vie, eux-mêmes déclinés en 7 piliers (Figure 1).

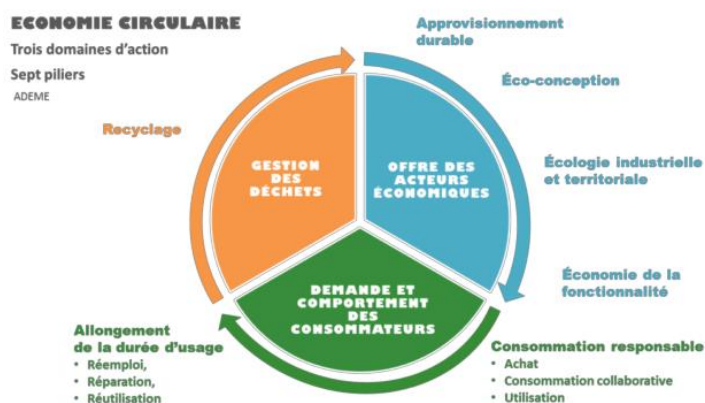


Figure 1 : Roue de l'Économie Circulaire [16].

La mise en œuvre de ce concept dépend de sa capacité à être bénéfique pour toutes les parties prenantes : les industriels, les distributeurs et les consommateurs. À ce propos, McLaren et al. [17] ont montré que le consommateur aurait tendance à changer ses habitudes de consommation pour privilégier les produits à plus longue durée de vie (ce qui correspond à un des piliers de l'EC). De plus, selon un rapport du programme des Nations Unies pour l'Environnement de 2017, les industriels pourraient préserver voire augmenter la valeur économique de leurs produits et réduire leur consommation en ressource en adoptant ce modèle [18].

Les gains environnementaux liés à l'application de ce concept et des stratégies relatives à ses 7 piliers doivent être validés et vérifiés. De nombreux outils existent pour analyser les performances environnementales des produits et services : des outils monocritères qualitatifs tels que la checklist ou monocritères quantitatifs comme le bilan carbone et des outils multicritères quantitatifs comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'ACV est à ce jour le principal outil normé et quantitatif fortement utilisé par les chercheurs et les entreprises de l'industrie textile. C'est un outil de mesure des performances environnementales des produits et des systèmes. Cet outil multicritères et multi-étapes est défini par un cadre méthodologique normé qui permet la modélisation du cycle de vie d'un produit ou d'un système et l'évaluation des impacts environnementaux qui y sont associés.

Un des principaux enjeux de l'ACV des vêtements est le choix de la durée de vie de ces derniers : en effet ce paramètre a une très forte influence sur les résultats des ACV, son allongement est d'ailleurs considéré comme un des leviers de réductions des impacts environnementaux principaux dans les piliers de l'EC [19]. Il s'agit également d'une donnée très recherchée par les entreprises de la mode, qui pour l'instant se fient à un ensemble de tests en laboratoire pour l'approcher. Pour finir la durée de vie des vêtements est un sujet qui provoque un très fort intérêt de la part des consommateurs français et européens dont 92% ont manifesté la volonté d'avoir accès à cette information lors d'un eurobaromètre réalisé en 2012 [20]. À ce contexte, s'ajoutent le développement d'un affichage environnemental pour les vêtements en France [21] et les travaux européens sur les *Product Environmental Footprints Category Rule* (PEF) [22].

Actuellement, la durée de vie des vêtements, bien que sujet d'intérêts manifestes, reste un sujet partiellement défini sans méthode de mesure de sa valeur du fait de la complexité et de la multiplicité des facteurs qui y participent. Or, de sa juste estimation dépendent les conclusions des études environnementales et des ACV ainsi que les informations communiquées aux consommateurs.

L'ambition de cette thèse est de proposer une contribution méthodologique à l'estimation et à la prédiction de la durée de vie des vêtements en prenant en compte les aspects de qualité des vêtements mais également le comportement des consommateurs pour permettre une meilleure mesure de leurs impacts environnementaux dans l'ACV de vêtements.

Ce manuscrit aura pour objectif d'établir cette méthodologie qui sera appliquée à un cas concret : les pulls.

Le Chapitre I présentera le contexte et les notions générales de notre problématique à travers un état de l'art dans lequel nous aborderons la filière de production d'un vêtement dans sa globalité, la notion de durée de vie, et l'analyse de cycle de vie utilisée ici comme outil de mesure d'impact. Cela nous

permettra de préciser nos objectifs sous la forme de deux questions de recherches qui seront explicitées dans ce premier chapitre :

- Comment et avec quels outils élaborer une méthodologie d'estimation et de prédiction de la durée de vie réelle des vêtements ?
- Comment développer une modélisation réaliste de l'usage d'un vêtement prenant en compte la diversité des profils de consommateurs et leurs usages pour enrichir l'ACV des vêtements ?

Les réponses à ces deux questions seront respectivement traitées dans le Chapitre II, consacré à l'étude du comportement des consommateurs, et dans le Chapitre III, dédié à l'étude de la durabilité des pulls.

Le Chapitre IV reprendra les résultats de ces deux études pour les intégrer et étudier leur impact dans l'analyse de cycle de vie des pulls. Cela permettra de mettre en évidence leur influence et l'importance de leur prise en compte dans la mesure des impacts environnementaux.

Chapitre I : Contexte et méthodologie

Les vêtements sont des produits communs, accessibles et utilisés quotidiennement, cependant leur complexité et celle de la filière de production sont souvent ignorées du grand public. Chacune des nombreuses étapes de production d'un vêtement va décider d'une ou plusieurs de ses caractéristiques et ces dernières vont influencer la qualité du vêtement, sa durée de vie et ses impacts environnementaux. Il est donc nécessaire d'avoir une vue d'ensemble de la filière de production des vêtements en préambule de ces travaux.

I.1 La fabrication d'un vêtement

I.1.1 Le vêtement, un produit complexe

La production d'un vêtement peut se diviser en cinq grandes étapes : le choix de la matière première, la production du fil, la fabrication de l'étoffe, sa finition et sa confection en produit fini (Figure 2).

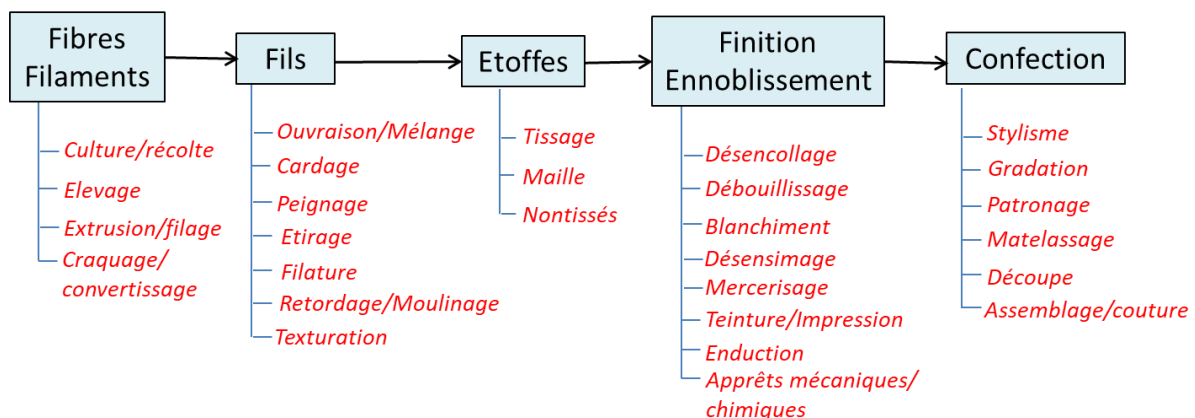


Figure 2 : Étapes de fabrication d'un vêtement textile et les principaux procédés associés

I.1.2 Les matières premières

La première étape de cette chaîne est cruciale puisqu'il s'agit du choix de la matière première qui peut être d'une grande variété et issue de l'agriculture, de l'élevage ou de la pétrochimie. Les matières les plus communément utilisées pour nos vêtements sont le coton et le polyester en termes de quantité [23]. Cependant, plus d'une centaine de fibres différentes sont répertoriées [24] et utilisées dans l'industrie, qu'elles soient issues de la famille des fibres naturelles, artificielles ou synthétiques [25], [26]. La Figure 3 reprend un certain nombre de fibres parmi les plus utilisées sur le marché en les regroupant par famille et par origine.

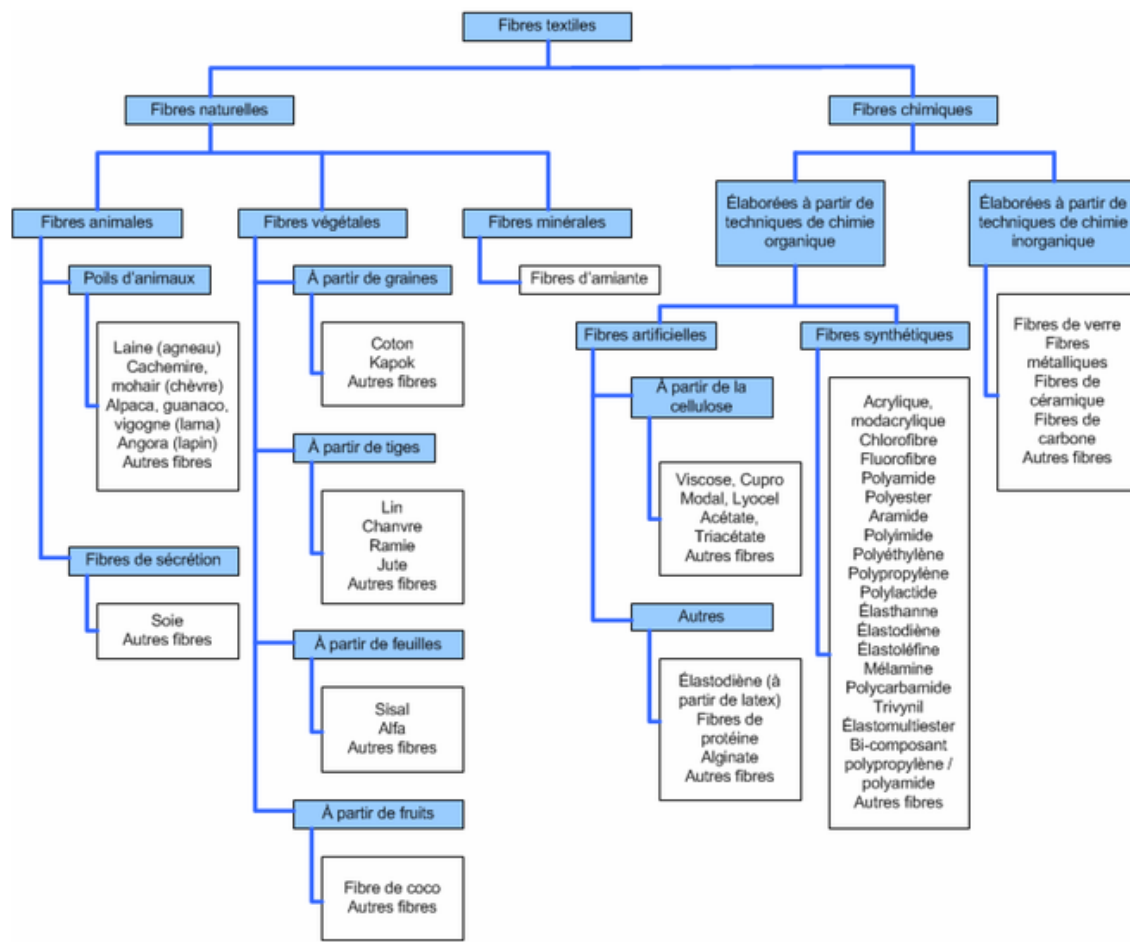


Figure 3 : Extrait d'une classification des fibres textiles [27]

I.1.3 Des fibres aux fils

La technologie choisie pour fabriquer le fil dépend de la nature des fibres sélectionnées précédemment et de certaines de leurs caractéristiques, notamment leur longueur. Dans tous les cas, cette étape consiste à transformer une masse de fibres désordonnées en un long fil régulier [26]. Les fibres peuvent également avoir deux formes : les fibres discontinues, qui produisent des filés de fibres et les filaments qui donnent des fils continus. La chaîne de fabrication et les procédés utilisés sont différents suivant ces deux cas.

Dans le cas des fibres discontinues, les fibres se présentent sous forme de bourre de fibres enchevêtrées. Cette bourre passe par une étape de cardage et éventuellement de peignage, elle est ensuite réduite en ruban puis en mèche qui sera finalement filée [28], [29]. La filature à proprement parler est cette dernière étape du processus de fabrication des fils. Plusieurs technologies sont utilisées en fonction des caractéristiques des fibres et du fil souhaité, dans tous les cas il s'agira d'appliquer une torsion aux fibres afin d'apporter de la cohésion au fil [29], [30] pour former des filés de fibres ou de filaments.

Les filaments sont généralement obtenus par filage. Le filage est l'extrusion de la matière au travers de buses de tailles et de formes différentes (rondes, trilobées, etc.). Chaque orifice de la buse produit un monofilament et l'ensemble produit un multifilament. Il existe trois procédés pour le filage : la voie sèche, la voie humide et la voie fondue [30]. Ces multifilaments peuvent ensuite être texturés par divers procédés tels que la friction, la compression ou le soufflage.

Il faut noter que les fils peuvent être assemblés pour former des fils retors ou guipés ou même des câbles. De plus ils peuvent être assemblés de diverses manières pour créer des fils fantaisie. Les fils fantaisies sont des structures particulières constituées d'un assemblage de plusieurs fils utilisés pour faire des pulls dans la plupart des cas.

Il faut noter qu'au-delà de la distinction entre filé de fibres, mono- et multifilaments, les fils peuvent avoir des structures très variées dont voici une liste non exhaustive :

- Fil monofilament : Fil constitué d'un seul filament avec ou sans torsion.
- Fil multifilament : Fil constitué de plusieurs filaments avec ou sans torsion.
- Filé de fibres : Fil composé de fibres maintenues ensemble par torsion la plupart du temps.
- Fil simple : Fil avec ou sans torsion dont on peut supprimer la torsion en une seule opération de détorsion
- Fil retors : Fil composé de plusieurs fils simples (minimum 2) sensiblement de même longueur, pouvant être rendus parallèles par une seule opération de détorsion.
- Fil câblé : Fil composé de plusieurs fils, dont au moins un retors ou câblé, retordus par une ou plusieurs opérations de torsion.
- Fil assemblé : Fil résultant de la réunion sans torsion notable de plusieurs fils simples, retors ou câblés.
- Fil texturé : Fil textile continu, avec ou sans élasticité, avec ou sans torsion, ayant un aspect gonflant qui résulte d'une ondulation ou d'une frisure du ou des filaments élémentaires.
- Fil guipé ou fil à âme : Fil formé par enroulement régulier en hélice d'un fil, d'une lame ou d'un trait, autour d'un autre fil, d'une lame ou d'un trait, formant une âme.
- Fil fantaisie : Fil qui a été fabriqué pour uniquement pour son apparence et diffère d'un fil classique. Il existe de très nombreux fils fantaisie en fonction de l'effet recherché qui peut être un effet de couleur (fils moulinés, chinés, jaspés, ou jarrés) ou un effet de structure (fils bouclés, flammés, chenillés, crêpés, boudinés, boutonnés, douppionnés, frisés, gansés, granités, perlés, noppés, ondés, ondulés, vrillés, etc.)

Les fils sont qualifiés par leur masse linéique, aussi appelée titrage ou titre exprimé en tex qui est l'unité dans le système international. Le Tex correspond à la masse en gramme pour 1000 mètres de fil. Un second système de mesure est aussi couramment utilisé : le numéro métrique qui lui caractérise la finesse du fil par la longueur en mètres d'un gramme de fil. Dans le premier cas, plus le fil sera fin, plus son titre en tex sera faible, alors que dans le second, plus le fil sera fin plus son numéro métrique sera élevé.

I.1.4 Du fil à l'étoffe

Bien que plusieurs termes soient communément utilisés dans l'industrie, les structures des étoffes textiles pour l'habillement se décomposent en deux catégories : les tissus et les tricots.

Le tissu est un entrecroisement de fils de chaîne et de fils de trame selon un motif appelé armure dont le plus connu est la toile. Cette armure est formée par le passage de la trame par divers moyens (navette, projectile, pince, jet d'eau, jet d'air) entre les fils de chaînes écartés suivant un motif spécifique par un système de lames et de lisses ou par un système Jacquard [28], [31]. La densité des fils de chaîne et de trame, l'armure (selon différents types tels que les toiles, sergés et satins [28]) se fait pendant cette étape et en fonction du produit qu'on souhaite obtenir.

Les tricots sont obtenus par formation d'un ensemble de boucles solidaires appelées mailles et formées à partir des fils. Ils peuvent être de deux types : les tricots trames où les mailles sont réalisées horizontalement et pour lesquels un seul fil peut être utilisé pour toute l'étoffe. Et les tricots chaînes dont les boucles sont réalisées à la verticale en utilisant un fil pour chaque colonne de mailles [32], [33]. Dans les deux cas ces structures sont formées à partir d'un système d'aiguilles dont la sélection forme le motif appelé liage ou contexture. Les contextures les plus courantes sont le jersey et la côte et leurs dérivés. Plusieurs types de métiers à tricoter existent, plus au moins adaptés aux structures et aux produits souhaités (machines rectilignes, circulaires, fully fashion, etc.) [33].

I.1.5 L'ennoblissement

L'ennoblissement désigne les étapes de production qui vont « embellir » ou apporter de nouvelles propriétés aux matériaux. L'ennoblissement est souvent réalisé sur les étoffes, mais il existe des procédés pour chaque grande structure de la chaîne de fabrication : la fibre, le fil, l'étoffe et le produit fini [28]. L'ennoblissement comporte 3 étapes : la préparation, la coloration et l'apprêtage.

La préparation est l'étape pendant laquelle la matière va être nettoyée et préparée et traitée, notamment avant sa teinture. En effet dans les étapes de fabrication qui précède l'ennoblissement, le matériau a souvent été imprégné par des colles, des cires ou des lubrifiants, ou contient des colorants naturels. La préparation consiste à enlever tous les composés qui pourraient parasiter et

compromettre l'étape de production suivante. Les procédés de préparation les plus connus et utilisés sont les suivants : le désencollage, le débouillissage, le blanchiment ou le mercerisage [34].

La teinture est l'opération qui consiste à colorer une matière à l'aide de colorants solubles ou insolubles et de produits auxiliaires [35]. Les colorants sont sélectionnés en fonction de la nature de la matière à teindre et de l'usage du produit [28]. De nombreux procédés existent, ils se différencient essentiellement par la pression, la température et par la circulation de la matière ou du bain [36].

La dernière étape est l'apprêtage. Il permet d'apporter de nouvelles propriétés au matériau [28], [37]. Deux types d'apprêtages se distinguent : l'apprêtage mécanique et l'apprêtage chimique. Le premier agit sur l'aspect de la surface du matériau par action mécanique et le second consiste généralement à appliquer une substance à la surface du matériau. Parmi les apprêts courants, il y a : le grattage, le rasage et l'émerisage pour les mécaniques et pour les chimiques les traitements d'hydrofugation, d'ignifugation, etc. Une dernière possibilité d'apprêtage est l'enduction, opération pendant laquelle la surface du matériau est enduite d'une pâte généralement à base de polymère selon un motif ou de manière unie comme pour les jeans enduits [28].

I.1.6 La confection des vêtements

Cette dernière étape consiste à la découpe des étoffes selon un patron et un plan de découpe précis et à l'assemblage des différentes pièces obtenues entre elles.

La découpe se fait généralement sur des machines de découpe industrielle capable de découper un « matelas » formé par la superposition des étoffes. L'assemblage est généralement effectué par couture à l'aide de diverses machines à coudre en fonction des types de coutures souhaités (machine à point de chaînette, surjeteuse et machine à couture plate) [38]. Après la confection le produit subit des étapes de finitions telles que le repassage, le pressage ou le vaporisage afin de le conditionner et d'être envoyé à l'emballage. Cette étape conclut généralement la phase de fabrication dans le cycle de vie du vêtement.

La chaîne de fabrication que nous venons de développer décide des caractéristiques techniques des vêtements qui sont les paramètres clés de la durée de vie techniques des vêtements. Nous poursuivons ce chapitre par une section explicative sur la notion de durée de vie et sa prédiction dans des domaines autres que l'industrie textile.

I.2 La durée de vie

I.2.1 Définition

La durée de vie n'est pas un nouveau sujet d'étude dans la littérature et a fait l'objet de nombreuses publications. Cependant, cette multiplicité des publications ne conduit pas à l'unification d'une définition ou d'une terminologie harmonisée et consensuelle [19],[39],[40]. En général, la durée de vie qualifie la capacité d'un produit à remplir une certaine fonction au cours du temps et dans des conditions d'utilisation et d'entretien donné. Cependant, les bornes notamment temporelles de cette définition restent à définir.

L'ADEME dans son rapport sur l'allongement de la durée de vie [19] propose un schéma, Figure 4, regroupant les 4 principales terminologies de la durée de vie et les caractérise en fonction des différents éléments qu'elles contiennent :

- durée normative : la durée de fonctionnement moyenne qui est mesurée dans des conditions spécifiques de tests et 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.

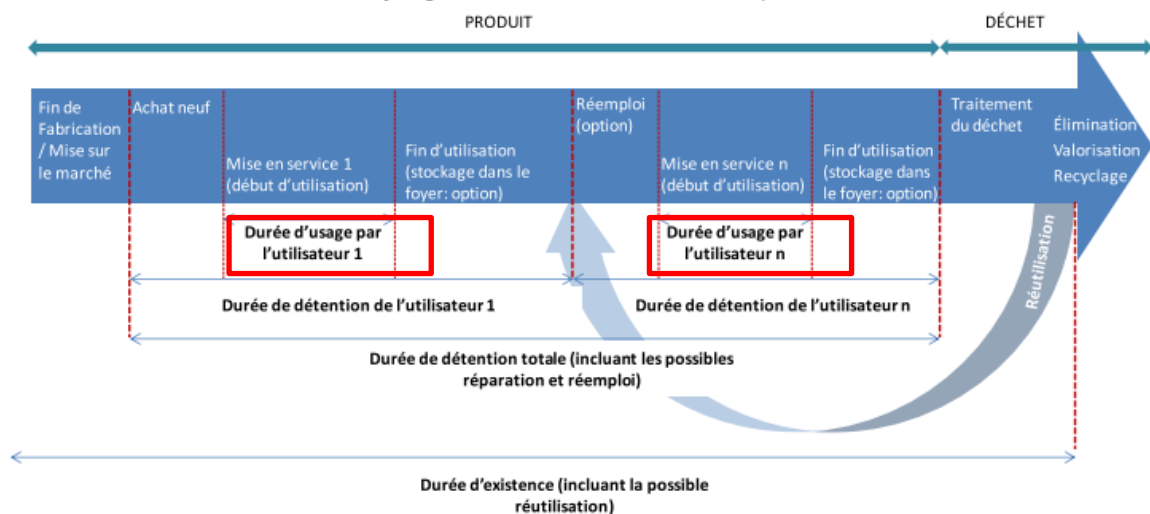


Figure 4 : Les différentes durées de vie [19]

Dans le concept de durée normative, la durée de fonctionnement est mesurée dans des conditions spécifiques de tests et revient à quantifier la durée de vie comme la capacité du produit à résister à

l'usure. Cette définition est similaire à la notion de qualité du produit qui est elle aussi associée à cette capacité de résistance à l'usure, c'est pourquoi ces notions sont souvent entremêlées et notamment dans les travaux relatifs à la durabilité des vêtements. Ce concept de durabilité représente en effet un pont entre la qualité du produit qui en est une caractéristique intrinsèque et sa durée de vie qui en est la manifestation. Les travaux actuels tendent à approcher la durée de vie d'un vêtement par l'angle de la durabilité du produit notamment en proposant l'évaluation et la mesure d'un indice de durabilité construit à partir des résultats de tests qualité réalisés sur le produit tels que le Score Qualité Consommateur défini par le chercheur Romain Benkirane [41].

Dans le cadre de nos travaux et pour en simplifier l'appréhension, nous définissons la durée de vie d'un vêtement comme la somme des durées d'usages par un utilisateur unique du premier porter jusqu'à sa mise au rebut.

I.2.2 La prédiction et la mesure d'une durée de vie

De nombreux travaux ont été conduits pour prédire la durée de vie de matériaux de construction, d'alliages, de pièces mécaniques, d'électroniques, etc. Plusieurs approches de l'estimation de la durée de vie ont été étudiées dans ces domaines. C'est le cas de l'approche stochastique (c'est-à-dire avec un traitement statistique des données et un calcul des probabilités) qui dépend d'un ensemble de données conséquent et des approches plus expérimentales de la durée de vie.

Deux schémas de principe peuvent être extraits de cette littérature et généralisés pour décrire les procédures et les réflexions amenant aux modèles de prédiction. Le premier schéma (Figure 5) [42], décrit l'évolution du produit dans le temps et définit des états de la santé d'un produit quelconque. En fonction de seuils prédéfinis sur une ou plusieurs caractéristiques mesurables du produit, nous pouvons lui attribuer les états suivants :

- S1 : état initial pendant lequel on peut constater de fortes variations de caractéristiques
- S2 et S3 : états correspondant aux variations plus ou moins importantes au cours de la vie du produit
- S4 : état correspondant à la perte de fonctionnalité du produit.

À partir de cet état et des informations sur les caractéristiques du produit et la tendance de leur évolution, nous pouvons prédire la durée de vie utile restante.

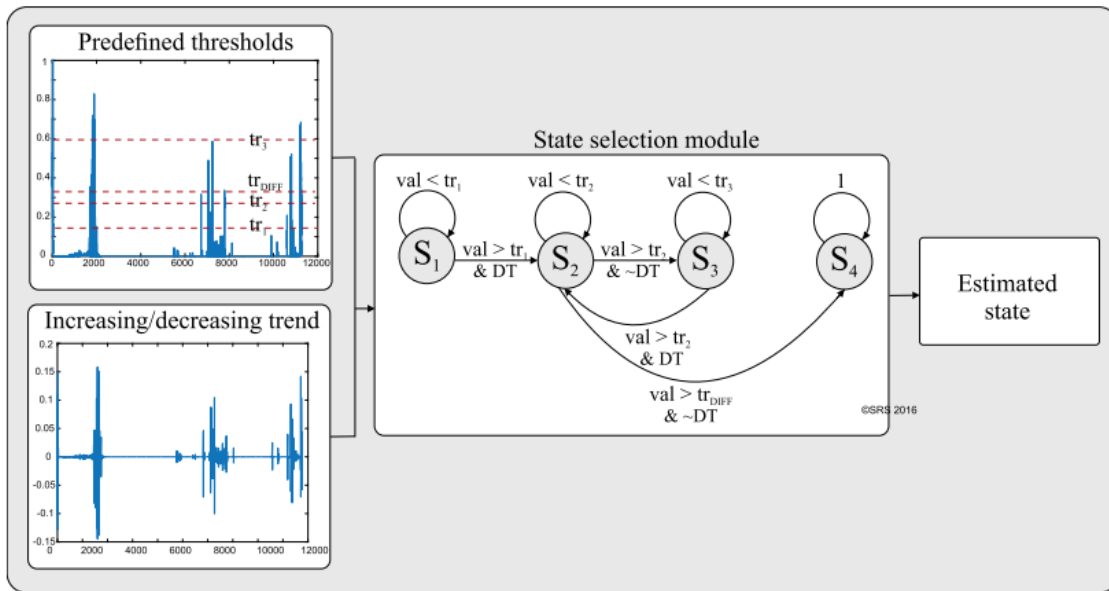


Figure 5 : Schéma de la détermination de l'état du produit [42]

Une autre approche de l'estimation de la durée de vie se centre sur l'étude des défauts du produit. La Figure 6 [43] ci-après nous montre l'étude de l'usure d'un outil de découpe de super alliage à base de nickel. Cette figure identifie clairement quatre éléments essentiels à la prévision de la durée de vie et leurs liens :

- Les causes d'usure : usures « internes » (dépendantes des caractéristiques du produit et de ses constituants) et usures « externes » (issues de l'influence de l'environnement et d'éléments extérieurs au produit)
- Les mécanismes d'usure comme les phénomènes d'abrasion ou d'adhésion.
- Les types de dommages causés par ces mécanismes
- Les conséquences de cette usure, sur la fonctionnalité du produit ou sa perception par l'utilisateur.

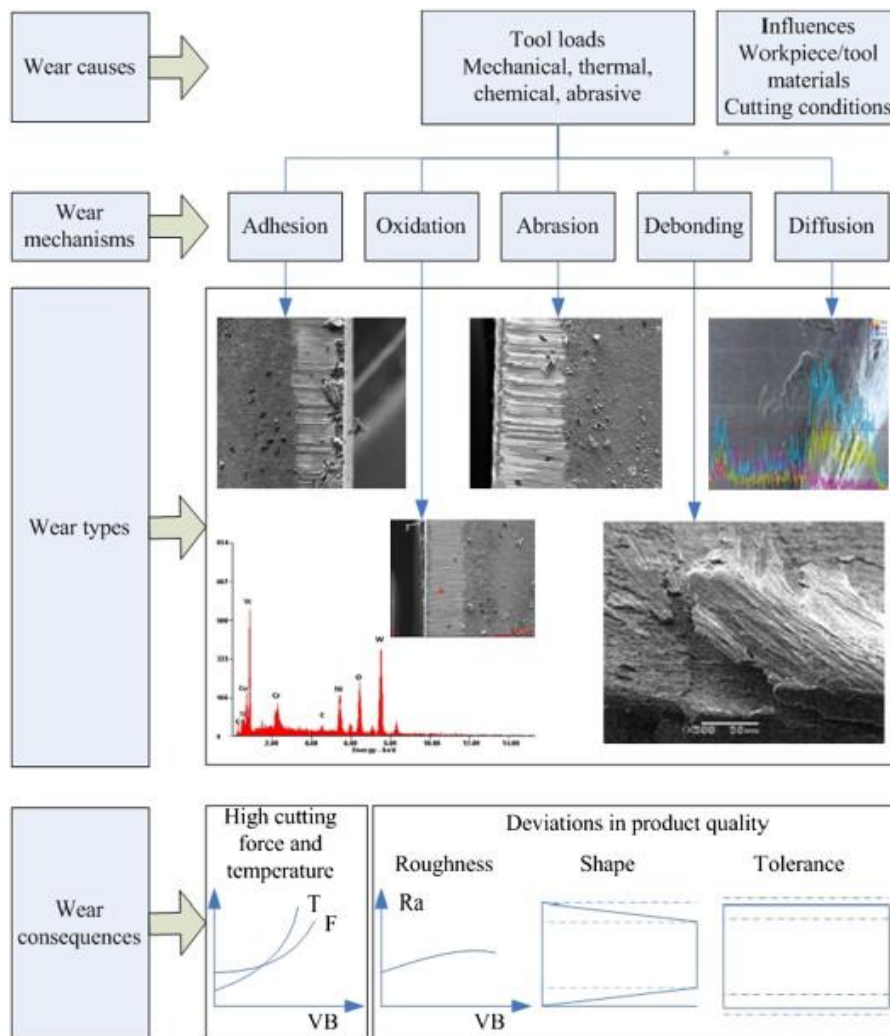


Figure 6 : Vue d'ensemble des causes, mécanismes, types et conséquences de l'usure de l'outil – Extrait de [43]

Ces démarches considèrent des produits et phénomènes pour lesquels les tests en laboratoire sont très proches voir identiques des sollicitations au cours de l'utilisation réelle. Ce n'est pas le cas avec un vêtement. En effet, la variété des phénomènes se produisant lors de son utilisation est difficilement représentable par des tests laboratoires et ce qui rend les travaux de [42], [43] inapplicables dans le cas des vêtements. Lorsque les tests *ex situ*, c'est-à-dire en laboratoire, ne suffisent pas à représenter les phénomènes observables, il peut être pertinent de confronter les résultats de l'étude laboratoire à une série de test *in situ* représentant les conditions réelles d'utilisation du produit comme l'ont montré Yi Peiyun et al. [44].

Pour les vêtements, la mesure du comportement du produit en laboratoire doit être rationalisée par d'autres mesures similaires effectuées pendant l'utilisation normale du produit. Il faut aussi envisager la possibilité de changer les procédures de tests normées afin de s'approcher au mieux des phénomènes réellement en jeu pendant l'utilisation des produits.

Qu'il s'agisse de multiplier les points de mesures pour mettre à jour l'état d'usure du produit, de suivre l'évolution des caractéristiques du produit au cours de son usage ou de quantifier la résistance du produit à l'usure, ces approches consistent à quantifier le vieillissement du produit considéré. Compte tenu de ces éléments, nous considérons l'estimation de la durée de vie des vêtements au travers de l'étude de leur vieillissement. Ce vieillissement est la manifestation de l'interaction entre les qualités techniques du vêtement et les sollicitations multiples qu'il subit au cours de son usage.

La proposition de méthodologie d'estimation et de prédiction de la durée de vie développée dans ce manuscrit a pour objectif de contribuer à la meilleure définition de l'ACV textile dont nous allons rappeler le cadre méthodologique, les enjeux et les limites dans la section suivante.

I.3 L'Analyse de Cycle de vie des vêtements

L'ACV est un cadre méthodologique d'évaluation des performances environnementales des produits et des services. C'est un outil multiétapes et multicritère : l'ACV prend en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie du produit ou du service considéré et évalue les performances environnementales dudit produit ou service selon plusieurs critères environnementaux. Depuis quelques années le champ de l'ACV s'étend également aux performances socio-économiques de son objet.

I.3.1 Définition et norme

Le cadre méthodologique de l'ACV est défini par les normes ISO 14040 et ISO 14044 qui fournissent les lignes directrices à suivre lors de la conduite d'une ACV (Figure 7). Cet outil est généralement utilisé de deux manières :

- L'évaluation a posteriori des performances environnementales de produits et services existants [45]–[48] ;
- L'évaluation a fortiori des performances environnementales de produits, services et modèles économiques futurs [49], [50].

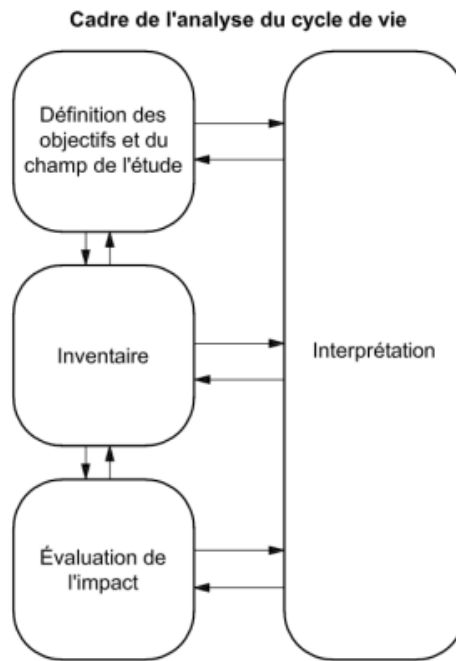


Figure 7 : Représentation des quatre phases d'une ACV [51].

- Etape 1, Définition des objectifs et du champ de l'étude : cette étape a pour objectif d'explicitier les objectifs et application envisagées de l'ACV. Elle permet de poser le problème, les objectifs, le champ de l'étude et les hypothèses utilisées.
 - Elle repose notamment sur la définition d'une unité fonctionnelle qui quantifie la fonction rendue par le système et cadre les comparaisons entre les systèmes qui remplissent cette fonction.
 - La combinaison du système et de l'unité fonctionnelle permet le calcul du flux de référence, paramètre qui correspond à la quantité de produit nécessaire pour répondre à l'unité fonctionnelle.
 - Cette étape se conclue généralement par la détermination des limites des processus à modéliser dans l'étude, par exemple on fixe souvent les éléments comme l'éclairage, le chauffage et la nourriture des ouvriers comme hors des frontières du système étudié.
- Etape 2, Inventaire du cycle de vie (ICV) : Cette étape consiste en la récolte des données nécessaires à la quantification des flux économiques et élémentaires (matières, énergies, etc.) entrant et sortant des différentes étapes du cycle de vie qui seront utilisés pour calculer les impacts environnementaux du système étudié. Cette étape met en jeu un grand nombre de données pouvant provenir à la fois de la littérature ou de mesures sur le terrain.
- Etape 3, Evaluation des impacts environnementaux du cycle de vie : cette étape consiste en l'association des différents flux élémentaires recueillis à des catégories d'impacts

environnementaux intermédiaires (*midpoints*, par exemple l'eutrophisation des eaux douces) qui quantifie une pression sur l'environnement à l'aide de facteur de caractérisation. La transformation des flux élémentaires en impacts est effectuée avec l'aide d'une méthode de calcul. Les impacts *midpoints* peuvent également être recalculés pour évaluer des dommages sur l'environnement (impacts *endpoints* par exemple les dommages sur la santé humaine).

- Etape 4, Interprétation : Cette étape conclue l'ACV en déduisant de l'analyse précédente des conclusions fiables et des recommandations cohérente avec les objectifs fixés à l'étape 1. Par exemple, identifier et recommander un changement technologique sur une étape de production très polluante. Cette étape contient également l'évaluation de la fiabilité de l'étude, la mise en évidence de points névralgiques, l'estimation des incertitudes et la revue critique de l'étude.

I.3.2 Les limites de l'Analyse de Cycle de Vie

Chacune de étapes précédemment évoquées contient une ou plusieurs limites de l'ACV pouvant biaiser les résultats et compromettre les conclusions de l'étude.

La limite la plus couramment évoquée relève de la qualité des données utilisées pendant l'étape d'inventaire de cycle de vie. Ces données sont extraites soit de la littérature soit du terrain et peuvent être évaluées de manière qualitative et quantitative.

La méthode d'évaluation qualitative examine la qualité des données sur une échelle de 1 à 5 (1 étant la meilleure note) selon les paramètres suivants [52] :

- Fiabilité
- Exhaustivité
- Représentativité géographique
- Représentativité temporelle
- Représentativité technologique
- Taille de l'échantillon

La méthode d'évaluation quantitative consiste à calculer la variabilité des paramètres d'entrées/sorties en fonction des incertitudes de mesure et de la variabilité temporelle des données d'entrée. Ces méthodes évaluent souvent de faibles variations induites par exemple par les outils de mesures utilisés.

Ces analyses peuvent être complétées par une analyse de sensibilité, dans ce cas des variations de données (changement d'hypothèse ou changement de technologie par exemple) sont introduites pour évaluer la robustesse des résultats suite à ces variations.

Au fil des années, avec les développements des logiciels d'ACV et la construction de bases de données toujours plus complètes, l'utilisation de l'ACV dans l'étude des sources d'impacts environnementaux de l'industrie du vêtement et leurs réductions a très fortement augmenté. Entre 2010 et 2021, le nombre de publications avec les mots clés *Life Cycle Assessment* et *clothing* (dans la base de données ScienceDirect) a été multiplié par 10 (Figure 8).

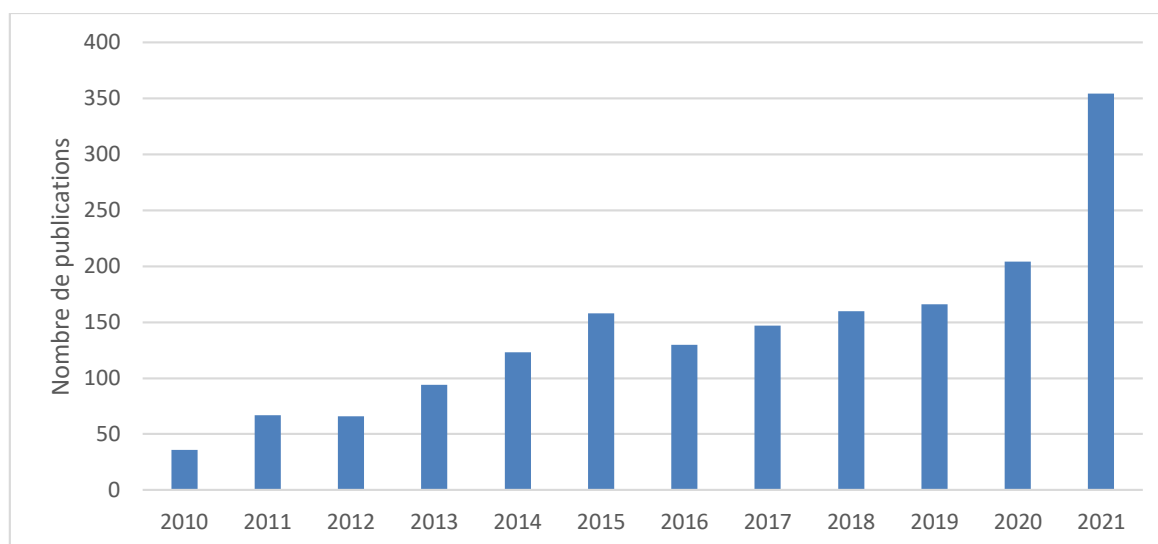


Figure 8 : Nombre de publications avec les mots clés *Life Cycle Assessment*, *Textile* et *Clothing* depuis 2010.

Une grande partie des ACV textiles a pour objectif de mesurer et de comparer les performances environnementales des vêtements afin d'identifier les facteurs produisant les meilleures performances environnementales. Les éléments comparés sont souvent les matières premières qui composent les vêtements ou les différents processus de production, autrement dit, la plupart des ACV textiles sont centrées sur l'étude des phases de production des vêtements.

Toutes ces ACV sont encadrées et exigent d'émettre des hypothèses sur la durée de vie des vêtements étudiés afin de les caractériser et de définir le cadre de l'étude, notamment pour définir le flux de référence de l'étude. Cette hypothèse est d'autant plus importante que la durée de vie est une donnée essentielle dans l'ACV et qu'elle constitue l'un des paramètres les plus déterminants pour les impacts environnementaux des articles textiles [18].

I.3.3 La durée de vie des vêtements dans l'ACV

La durée de vie d'un produit et a fortiori d'un vêtement est une notion particulièrement complexe à définir et à estimer puisqu'elle dépend de facteurs très différents tels que le comportement de l'utilisateur, le produit, sa composition, sa construction, sa capacité à résister à l'usure, etc. Dans la suite de cette section, nous allons illustrer la nécessité d'estimer avec précision la durée de vie des produits textiles dans les ACV d'une étude de la littérature.

Les études d'ACV sont très variées dans la filière textile en raison de la multiplicité des typologies de produits existants et de par la diversité des matières, des procédés utilisés et des durées de vies des articles produits.

Pour illustrer cette diversité des durées de vie, Romain Benkirane a répertorié les durées de vie utilisées dans des études portant sur les t-shirts et les jeans (voir Tableau 1) [22], [41], [61]–[66], [53]–[60]. Dans ces études, la durée de vie est exprimée en nombre d'utilisations, de lavages ou en nombre d'années. On observe que les durées de vie fixées dans ces dernières présentent des écarts conséquents : de 5 à 75 lavages pour les t-shirts et de 23 à 69 lavages pour les jeans.

Tableau 1 : Durées de vie prises en compte dans des ACV de t-shirts et de jeans [41].

Etude	Produit	Nombre d'utilisations	Nombre de lavages
Leffland et al. [68]	T-shirt	(1 an)	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

Dans ces ACV comme dans la plupart des ACV textiles, la durée de vie reste l'objet d'hypothèses très variables posées par les chercheurs tant au niveau des valeurs possibles que de l'unité de son expression. Dans ces publications l'estimation de la durée de vie des vêtements étudiés s'illustre par deux pratiques :

- La durée de vie est une hypothèse de travail posée par le chercheur, sans lien avec la littérature ou justifiée par sa conformité aux avis des experts du secteur consulté pour l'étude [45], [53], [54], [56], [58], [61], [65].
- La durée de vie est également estimée à partir de sondage effectués auprès des consommateurs portant sur des éléments comme le nombre d'usages par semaine, le nombre de vêtements possédés, le nombre de vêtements achetés par an etc. [55], [57], [60], [62], [67], [68]

De plus, les durées de vie sont exprimées dans des unités différentes d'une étude à l'autre : en années, en nombre d'utilisations ou encore en nombre de lavages. Les durées de vie estimées d'une même typologie de vêtements sont également très variables, par exemple entre 5 et 75 lavages pour un T-shirt. Cette variabilité dépend notamment de la diversité des échantillons de consommateurs consultés.

Ces éléments montrent que la quantification (ou l'estimation) de la durée de vie est essentielle pour améliorer la précision des ACV de vêtements et notre compréhension des impacts environnementaux des vêtements et leur possible réduction.

Au-delà de cet intérêt scientifique, la durée de vie est également un grand sujet de préoccupation pour les marques de vêtements. Elles apprécient les durées en fonction de résultats issus des différents tests métrologiques, appréciations qui ne reflètent pas toujours la capacité du produit à résister à l'usure due au porter. Le consommateur est un acteur qui manifeste un attachement particulier à ce paramètre. En effet, dès 2012, 92 % de la population européenne et française sondée lors d'un eurobaromètre [20] estimait que la durée de vie des produits disponibles sur le marché devrait être indiquée.

Peu de recherches académiques portent sur la mesure ou la prédiction de la durée de vie en matière d'ingénierie textile bien qu'il s'agisse d'un sujet de grande importance pour l'étude des performances environnementales des vêtements comme nous l'avons évoqué précédemment. Dans le cadre des travaux précédents menés au laboratoire GEMTEX, le chercheur Romain Benkirane a proposé une méthodologie pour mesurer un score qualité permettant de quantifier la durabilité des vêtements [41]. À partir d'une enquête consommateur, il a déterminé les défauts représentant les causes de fin de vie des T-shirts les plus importantes. De ces différents défauts, il a établi un protocole de mesure des caractéristiques des produits et de leurs résistances aux défauts. Avec les résultats de l'étude consommateur, il déduit également une importance relative des défauts les uns par rapport aux autres et établit une pondération de la perception de l'usure par le consommateur. Les performances des produits examinés au prisme de cette perception par le consommateur lui permettent d'attribuer aux produits un Score Qualité Orienté Consommateur. Cette approche contribue à l'étude de la durabilité des vêtements, cependant elle ne permet pas d'estimer leurs durées de vie. Elle propose un indice représentatif de la capacité d'un vêtement à résister à l'usure. Parallèlement, des chercheurs en sciences humaines se sont également intéressés à la durée de vie des vêtements avec des approches différentes. En sondant directement des populations ou en explorant les armoires des consommateurs, les chercheurs proposent une estimation de la durée de vie de différentes catégories

de vêtements [17], [57], [69]–[72], les estimations obtenues dans ces études sont très variables d’une étude à l’autre tant les durées de vie évoquées par les consommateurs sont radicalement différentes.

La durée de vie des vêtements est donc un sujet qui suscite à la fois un très fort intérêt au sein de la communauté scientifique mais également au sein des entreprises de textile, comme nous le démontrent les débats aujourd’hui occasionnés par l’affichage environnemental. En effet, la durée de vie devient un paramètre primordial dans la modélisation et la mesure des performances environnementales des vêtements. Cependant, peu de recherches ont été menées sur la mesure de la durée de vie d’un point de vue technique et les estimations basées sur des études consommateur obtiennent des résultats très variés. De cette convergence d’intérêts scientifiques et industriels sur le sujet de la durée de vie des vêtements et compte tenu de l’absence de méthodologie de mesure de la durée de vie des vêtements, émerge la première des questions de recherche auxquels ces travaux ont pour objectif de répondre :

- Comment et avec quels outils élaborer une méthodologie d’estimation et de prédiction de la durée de vie réelle des vêtements ?

Lorsqu’on s’intéresse à la durée de vie d’un vêtement, il est difficile d’ignorer l’un de ses principaux acteurs : le consommateur. En effet, c’est ce dernier qui par ses décisions marque la fin de vie d’un vêtement. Son influence sur les impacts environnementaux des vêtements ne s’arrête pas à son influence sur la durée de vie puisqu’il participe par son utilisation et ses pratiques d’entretien à la production des impacts environnementaux de ses vêtements. Dans la prochaine section nous allons nous intéresser à la prise en compte du consommateur dans l’ACV et son influence sur les impacts environnementaux des vêtements.

I.3.4 Le consommateur dans l’ACV textile

Dans les ACV textiles « *Cradle-to-Grave* », c’est-à-dire des ACV où la totalité du cycle de vie est considérée notamment les phases d’usage et la fin de vie, la fabrication du vêtement ne produit qu’une partie des impacts environnementaux de son cycle de vie. Une grande part des impacts environnementaux d’un vêtement est émise pendant la phase d’usage [55], [64], [67], [73]. À titre d’exemples, 70 % des émissions de gaz à effet de serre d’un t-shirt arrivent après son achat selon Steinberger [56] et pour Yasin et al. entre 50 et 80 % de l’énergie utilisée dans le cycle de vie est issue de la phase d’utilisation [74].

Cependant, le consommateur reste une grande source d’incertitude dans l’ACV. Ainsi une partie des décisions prises par le consommateur sont basées sur des phénomènes difficilement quantifiables tels

que les effets de modes, les changements morphologiques, etc. C'est pourquoi dans la plupart des ACV textiles, le consommateur est uniquement défini par ses pratiques d'usage et d'entretien.

De nombreuses études ont été menées pour définir les pratiques des consommateurs durant la phase d'utilisation. Parmi les éléments que les chercheurs ont cherché à évaluer, on peut citer :

- la fréquence de porter
- le nombre de porters avant lavage
- la fréquence de lavage
- le nombre de lavages avant la mise au rebut
- la méthode de lavage
- le programme de lavage utilisé
- la température de lavage utilisée
- les détergents utilisés
- la méthode de séchage
- le repassage

En 2018, la chercheuse Kirsi Laitala a effectué une revue de littérature totalisant près de 60 études sur l'utilisation et l'entretien des vêtements par les consommateurs [75]. Parmi celles-ci, l'étude de The Nielsen Company [69] est l'une des plus complètes sur les fréquences, méthodes de lavage et détergents utilisés avec près de 30 000 répondants répartis entre 61 pays tout autour du globe. Il en ressort une très grande sensibilité géographique et culturelle de ces paramètres (Figure 9)

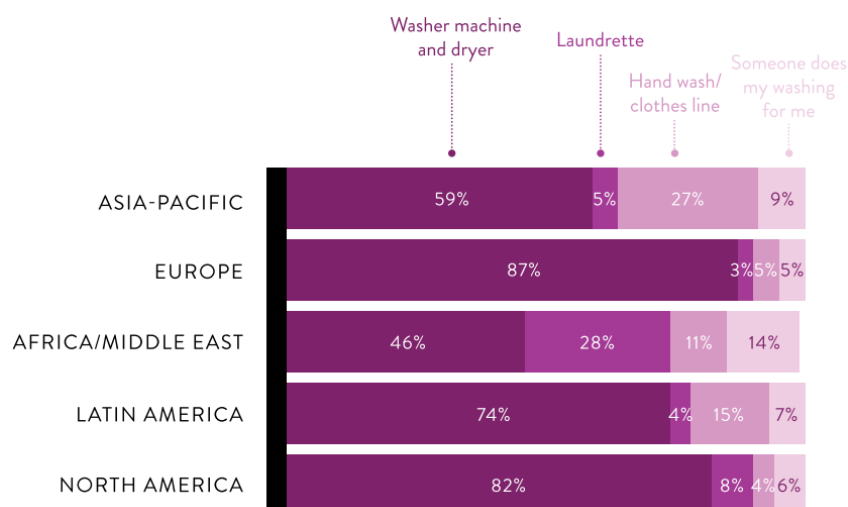


Figure 9 : Répartition des différentes méthodes de lavage par zone géographique [75].

Daystar et al.[76] se sont également intéressés aux habitudes d'entretien des consommateurs dans six pays (Chine, Allemagne, Italie, Japon, Angleterre et États-Unis d'Amérique) au travers d'un sondage

avec plus de 1000 répondants pour chaque pays et portant sur 3 typologies de produits : les t-shirts, les polos et les pantalons. On constate à nouveau une variabilité des différents éléments de la liste précédente en fonction du pays d'origine du consommateur.

Cependant, dans cette étude comme dans les autres [45], [60], [80]–[84], [62], [65], [71], [73], [76]–[79], le consommateur n'est finalement défini que par son lieu de résidence et ses données signalétiques comme son sexe, son âge et sa catégorie socioprofessionnelle. L'objectif de ces études est de mieux définir la phase d'utilisation des vêtements pour l'ACV, mais également d'identifier les sources potentielles d'économie environnementale possibles si les consommateurs changent leurs habitudes d'entretien pour de meilleures pratiques. Or, les consommateurs peuvent avoir des comportements très différents vis-à-vis de l'entretien, pour des raisons économiques ou environnementales comme le montre l'étude de Peterson et al. en 2014 [85]. Dans cette étude, les chercheurs ont réparti les consommateurs en 3 groupes définis en fonction de l'activisme environnemental qu'ils manifestaient: « green consumers », « less-green consumers » et « non-green consumers ». Ils ont noté une plus grande tendance des « green consumers », qui représentent 18 % de l'échantillon à avoir de bonnes pratiques d'entretien telles que l'augmentation du nombre de porters avant lavage, la baisse de la température de lavage ou la limitation des lavages à petit chargement.

Ces typologies de consommateurs en fonction de leurs pratiques vertueuses en matière d'usage montrent l'importance de différencier les consommateurs dans l'ACV. Ces profils de consommateurs ne sont actuellement pas utilisés dans les ACV textiles faute de données et de méthodologie pour les circonscrire. Il est cependant nécessaire d'intégrer ce type d'étude consommateurs dans la construction des scénarios et des phases de l'ACV afin de quantifier les différences d'impacts entre les différents types de consommateurs.

Le consommateur, par ses choix et ses pratiques, apparaît comme l'un des acteurs générant de nombreuses externalités environnementales négatives. Il est néanmoins appréhendé comme une entité monolithique dans la plupart des ACV textiles, ACV qui ne prennent pas en compte leur diversité et leurs usages. L'identification et l'étude des typologies de consommateurs responsables et de leurs pratiques d'entretien permettraient d'identifier des tendances de fonds chez les consommateurs en matière de perception environnementale et d'entretien. Elles permettraient également la modélisation et la quantification de leurs impacts environnementaux, l'identification des pratiques les plus vertueuses ou encore l'identification des typologies de consommateur à sensibiliser pour réduire les impacts environnementaux des vêtements.

Ces différents éléments font émerger la seconde question de recherche à laquelle ces travaux ont pour objectif de répondre :

- Comment développer une modélisation réaliste de l'usage d'un vêtement prenant en compte la diversité des profils de consommateurs et leurs usages pour enrichir l'ACV des vêtements ?

I.4 Méthodologie générale

Notre revue de littérature nous a permis d'identifier deux faiblesses dans la mise en œuvre des ACV textiles :

- Des durées de vie très variables pour une même typologie de produit, souvent estimée par des études basées sur la perception consommateur qui n'intègrent pas la diversité des consommateurs et la variété des caractéristiques des produits en lui-même.
- Une phase d'usage du vêtement par le consommateur basée sur des agrégats de population sans autres informations que leurs pratiques de lavage qui ne reflètent pas la diversité des attitudes et comportement des consommateurs.

Nous proposons de suivre une méthodologie composée de trois axes afin de répondre aux différentes questions soulevées par notre problématique :

- Axe 1 : Identification, quantification et modélisation des profils de consommateurs et de leurs usages.
- Axe 2 : Étude et prédiction du vieillissement et de la durée de vie des vêtements en laboratoire et au porter, cas concret : les pulls.
- Axe 3 : Analyse du Cycle de Vie d'un pull : comparaison des contributions aux impacts environnementaux du profil du consommateur et de la durée de vie.

Ces axes de travail et les stratégies pour les aborder sont détaillés ci-après. Leur articulation est schématisée sur la Figure 10.

Axe 1 : Identification, quantification et modélisation des profils de consommateurs et de leurs usages.

Cet axe de travail se concentre sur la question complexe de la définition des usages des vêtements par les consommateurs, notamment au sein de l'ACV. Le modèle classique de représentation de l'usage des vêtements consiste en une réduction de l'usage à une moyenne des pratiques d'entretien définies par sondage et pour une population et une géographie donnée ou alors définies par les étiquettes d'entretien. Cette représentation de l'usage est cependant insuffisante, en effet un vêtement peut être soumis à une diversité d'usage par une diversité de consommateurs. Ces différents usages

contribuent de deux manières aux impacts environnementaux des vêtements. Ils y contribuent directement par leurs impacts propres et indirectement par la modification de l'usure à laquelle le vêtement est soumis pendant son cycle de vie.

En premier lieu se pose la question de l'identification et de la quantification des profils de consommateurs. Nous remarquons d'après notre revue de littérature que les consommateurs peuvent être distingués en fonction de leurs pratiques d'achat et de leur sensibilité environnementale. Nous observons également qu'ils peuvent être différenciés par leurs différentes pratiques d'usage. C'est pourquoi nous avons réalisé une étude consommateur réunissant ces aspects afin d'en faire émerger des typologies de consommateurs. Nous examinons ensuite les liens entre les différentes typologies de consommateurs afin de mettre en perspective les attitudes des consommateurs et leurs pratiques d'usage. Ce premier axe de travail correspond au deuxième chapitre de ce manuscrit dans lequel nous précisons au travers d'une revue de littérature plus exhaustive la construction et la mise en œuvre de notre méthodologie pour définir le consommateur, ses attitudes et ses pratiques.

Nous utiliserons également ces résultats lors de la modélisation des phases d'usage de ces différents profils de consommateurs dans les scénarios d'ACV que nous étudierons dans l'axe 3.

Axe 2 : Étude et prédiction du vieillissement et de la durée de vie des vêtements en laboratoire et au porter, cas concret : les pulls.

Ce deuxième axe de travail est concentré autour de l'étude du vêtement, de son vieillissement et de sa durée de vie. En nous basant sur les principaux défauts d'un produit déclenchant sa fin de vie, nous établissons une procédure de tests en laboratoire pour caractériser le vêtement et mesurer son vieillissement selon les défauts susmentionnés. Nous utilisons les résultats de cette procédure pour déterminer les différentes typologies de vieillissement que le produit peut présenter. Nous construisons ensuite un modèle de prédiction du vieillissement du vêtement en fonction de ses caractéristiques techniques. Pour finir, nous confrontons le vieillissement observé en laboratoire à un vieillissement réel observé au travers d'une campagne de tests au porter réalisé sur les mêmes vêtements. Cette dernière étape nous permet d'établir une correspondance entre le vieillissement au laboratoire et le vieillissement au porter, correspondance qui nous permet, en considérant un niveau d'usure maximale acceptable par le consommateur, d'estimer la durée de vie du vêtement.

La conception et la mise en œuvre de notre méthodologie ont été réalisées à partir de l'étude d'un ensemble de pulls gracieusement fournis par les entreprises Camaïeu, Cyrillus et le groupe ERAM qui ont manifesté un vif intérêt pour notre démarche dès les premières phases de ses travaux de thèse.

De nombreuses marques ont également manifesté un intérêt certain pour ces travaux, particulièrement sur cette étude du vieillissement et de la durée de vie des vêtements.

Cet axe de travail constitue notre troisième chapitre dans lequel nous détaillerons de manière plus exhaustive les éléments méthodologiques et les outils utilisés pour obtenir nos résultats. Ces résultats seront utilisés dans le cadre de notre troisième axe de travail pour construire différents scénarios d'ACV.

Axe 3 : Analyse du Cycle de Vie d'un pull : comparaison des contributions aux impacts environnementaux du profil du consommateur et de la durée de vie.

Dans ce troisième axe de travail, nous contextualisons différents résultats obtenus lors de la mise en œuvre des deux premiers axes au travers de différents scénarios d'ACV d'un pull. La durée de vie est déjà identifiée dans la littérature comme l'un des paramètres les plus influents sur les impacts environnementaux des vêtements et l'usage est également identifié comme une phase fondamentale dans la production des impacts environnementaux des vêtements. Nos travaux n'ont pas pour vocation de réaffirmer ses points, mais d'illustrer les apports d'une meilleure définition de ces éléments par nos méthodologies dans l'étude des impacts environnementaux des vêtements. L'objectif de cet axe de travail est de définir et d'affiner l'utilisation de ces paramètres essentiels à l'ACV et d'en quantifier les influences.

Nos travaux s'inscrivent dans une démarche transdisciplinaire au travers des savoirs, outils et méthodes nécessaire à la formulation des réponses à nos questions de recherche et à nos axes de travaux. Ses savoirs sont spécifiques à des domaines scientifiques bien distincts tels que l'ingénierie textile, la sociologie ou l'analyse de données. Par souci de clarté nous introduirons ses éléments et leurs bibliographies en première partie des chapitres dans lesquels ils seront mobilisés.

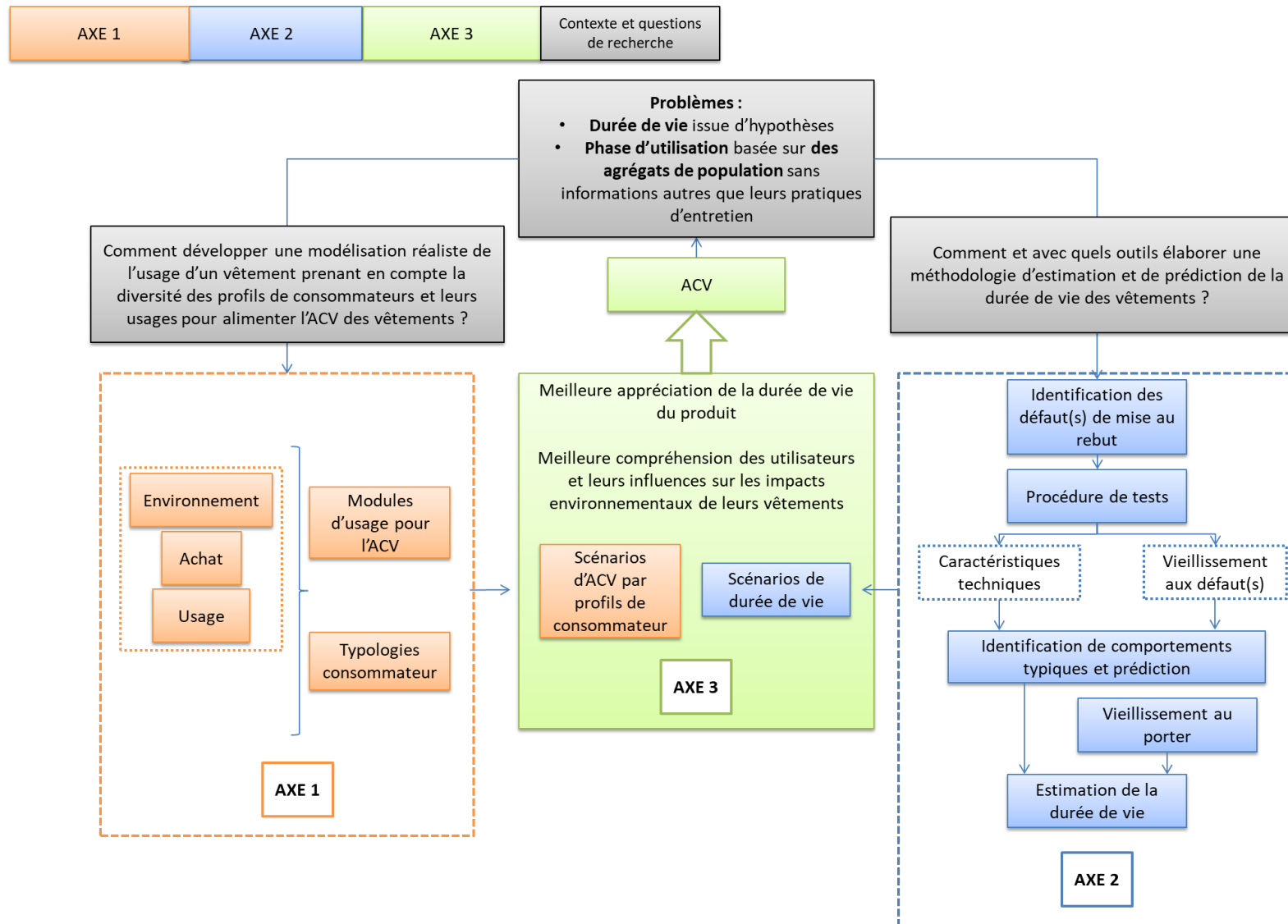


Figure 10 : Schéma global de la méthodologie et des axes de travail de la thèse.

Chapitre II : Étude du comportement des consommateurs

II.1 État de l'art, l'avènement du consommateur responsable

Dans le premier chapitre, nous avons constaté que des consommateurs avec des profils différents avaient des habitudes et des pratiques d'entretien différentes qui pouvaient s'expliquer par leur sensibilité à l'environnement [85]. Dans cette étude, les consommateurs étaient répartis en groupes selon leur degré d'activisme environnemental et les auteurs ont mis en lumière des pratiques distinctives selon les groupes de consommateurs. Ces typologies d'attitudes et de comportements des consommateurs en fonction de leur rapport à l'environnement sont un sujet très récurrent en sociologie de la consommation et en marketing. Dans le cadre de cette thèse, il nous a semblé particulièrement opportun de mobiliser ces recherches et ces connaissances pour mieux appréhender les profils de consommateurs et enrichir les résultats issus des ACV.

Avec l'émergence de la slow-fashion et de la mode durable, une partie de la littérature s'est intéressée à définir les consommateurs qui adoptaient des pratiques plus vertueuses vis-à-vis de l'environnement dans leurs choix vestimentaires. Zeynep Ozdamar Ertekin et ses co-auteurs dans une étude de 2020 sur les transformations institutionnelles liées à la logique du développement durable dans la mode ont mis en valeur une nouvelle culture de la mode, déterminée par trois logiques distinctes : la logique du commerce, artistique et de soutenabilité. Comme la notion de développement durable et ses trois piliers, cette nouvelle culture de la mode est modelée par les interactions entre les logiques. [13] (Figure 11). Cette étude, bien que centrée sur les institutions de la mode et non spécifiquement sur les consommateurs, est particulièrement riche car elle met en exergue un potentiel changement de paradigme dans l'industrie de la mode, issu du « dialogue » entre cette industrie et ses consommateurs [86], [87]. Cette étude fait suite aux travaux précédents de l'auteur sur les mutations du secteur de la mode en réponse aux changements des attentes des consommateurs et à leur rapport à la mode et aux vêtements [88]. Dans cette dernière, elle décrit la genèse du concept de « Slow Fashion Movement ». Ce mouvement né en opposition à la Fast Fashion, met l'accent sur une conscientisation de la part des acteurs de la mode de leurs impacts sociaux et environnementaux en se focalisant plus précisément sur une réduction de la production, une importance plus grande portée à la qualité et une plus grande attention au bien-être des travailleurs et à l'environnement. Zeynep Ozdamar Ertekin décrit comment ce mouvement s'est construit à partir des réactions des acteurs de l'industrie et des consommateurs face aux catastrophes sociales et environnementales liées à la mode depuis les années 80.



Figure 11 : La nouvelle culture de la mode. [13]

Afin de mieux appréhender les attitudes et comportements des consommateurs issus de cette prise de conscience des externalités négatives générées par le secteur de mode, nous allons dans un premier temps faire une brève synthèse de la littérature portant plus spécifiquement sur les consommateurs dits « responsables ».

II.1.1 Le consommateur responsable : un consommateur difficile à cerner.

Il n'existe pas à ce jour de définition consensuelle du consommateur responsable tant dans le domaine du marketing qu'au niveau de la sociologie de consommation. Cela s'explique par la très grande diversité des pratiques associées à la consommation durable mais aussi par les différentes motivations et sens donné par le consommateur à la consommation responsable.

Les premières études associées au consommateur responsable remontent aux années 1970, notamment avec les travaux de Webster [89]. L'auteur évoquait la notion de « Socially Conscious Consumer » et tentait sa caractérisation en termes psychologiques, socio-économiques et démographiques. Ce consommateur y était défini comme un « consommateur qui prend en compte les conséquences publiques de sa consommation privée ou qui tente d'utiliser son pouvoir d'achat pour amener des changements sociétaux. » À l'époque, cette catégorie de consommateur représentait une niche discrète de consommateurs en avance sur la conscientisation de l'influence qu'il pouvait avoir sur le monde par le biais de leur consommation. Déjà à l'époque, le chercheur concluait sur la difficulté d'établir un modèle et un cadre théorique pour comprendre le comportement de ces

consommateurs. Les mêmes difficultés de définition se posent lorsque les chercheurs définissent la consommation responsable. Dans ses travaux, Nil Toulouse Ozcäglar a recensé plusieurs définitions de l'achat responsable[90] :

- « un achat de produits et de services perçus comme ayant un impact positif (ou moins mauvais) sur l'environnement physique ou sur la société ou l'utilisation du pouvoir d'achat pour exprimer ses préoccupations sociales ou environnementales » ;
- un achat tenant compte du degré de responsabilité sociale des entreprises ;
- un achat qui s'inscrit dans l'économie solidaire.

Elle note que ces définitions rattachent la consommation responsable à une particularisation de l'acte d'achat, or il est clair que l'achat est loin d'être le seul levier auquel le consommateur a accès pour s'inscrire dans une démarche de développement durable. On peut citer par exemple le boycott, la pratique du minimalisme, le rejet des publicités, la recherche de circuits locaux ou éthique, etc... L'auteur propose une définition centrée sur les modalités d'action des consommateurs : la consommation responsable est « l'ensemble des actes volontaires situés dans la sphère de la consommation, réalisés suite à la prise de conscience de conséquences jugées négatives de la consommation sur le monde extérieur ». Ces modalités d'action des consommateurs responsables s'inscrivent dans trois stratégies de rapport au marché : la cohésion, le retrait et la mobilisation [90] :

- *la stratégie de cohésion avec le marché* : Le consommateur se fie au marché en dirigeant ses achats vers les offres qui lui apparaissent en adéquation avec ses préoccupations sociales ou environnementale. Cette stratégie est fondée sur la perception que le consommateur a de pouvoir influencer le marché par ses achats.
- *la stratégie de retrait du marché* : Le consommateur supprime sa consommation ou la réduit par divers biais afin de réduire les externalités négatives de celle-ci. Cette stratégie semble être perçue comme une stratégie marginale d'autant plus que les adeptes de cette stratégie ne constituent pas un groupe homogène tant dans leurs profils que dans les actions qu'ils entreprennent.
- *la stratégie de mobilisation sur le marché* : Le consommateur s'efforce de transformer le système de consommation par des actions extérieures à ce dernier comme le boycott, la pétition ou la réappropriation de l'espace publicitaire.

En outre, il semble également pertinent de mettre en lumière la signification symbolique de la consommation responsable, pouvant être décomposée en qu'acte libératoire, politique ou encore moral :

- la consommation responsable comme acte libératoire est celle d'un consommateur qui contrôle et maîtrise sa propre consommation, qui se voit autonome. Il utilise sa propre consommation pour se libérer et avoir une éthique de vie.
- la consommation responsable comme acte politique : les consommateurs voient dans la consommation un instrument de transformation sociale et dans leur propre consommation une forme d'engagement politique indispensable pour générer cette transformation.
- la consommation comme acte moral : la consommation responsable incarne le « bien », se conformer à certaines valeurs (être solidaire, être à l'écoute de son prochain, ne pas faire de mal) et aux messages associés à la consommation responsable.

La diversité des pratiques et du sens attribué à la consommation responsable conduit à s'interroger sur la variété des profils de consommateurs qu'il nous semble pertinent de rattacher à l'ACV. Intégrer la disparité des profils de consommateurs tant au niveau de leur sensibilité, de leur mode d'achat que de leur mode d'utilisation permettrait d'une part d'affiner les résultats des ACV et d'autre part de mieux appréhender les différents impacts environnementaux issus de ces pratiques différenciées. Toutefois, avant d'exposer ces différents profils issus de la littérature, nous allons analyser les motivations et les barrières à l'essor de cette consommation responsable.

II.1.2 Les motivations et barrières à consommer responsable

Jusque dans les années 90, le consommateur responsable était présenté comme un consommateur motivé par les valeurs d'altruisme et de service envers la société. Mais depuis les années 2000, de nombreuses études ont montré que les consommateurs responsables sont aussi motivés par leur construction identitaire et la pérennisation de cette identité en tant qu'individu libre des dictats de la mode et de la consommation de masse. Le bien être qu'ils tirent de la valeur morale liée à leur type de consommation, et ce même pour des individus pro-environnement, est également très important [4] — [8]. En outre, de nombreuses pratiques « responsables » du point de vue environnemental le sont également du point de vue économique pour les consommateurs. Nous pouvons, par exemple, citer le fait de laver à des températures plus basses ou de ne pas utiliser de sèche-linge [92]. Cela complexifie l'étude des motivations réelles des consommateurs responsables ou des barrières qui empêchent les consommateurs d'adopter des pratiques responsables.

De très nombreuses études ont été conduites pour déterminer ce qui motive les consommateurs à agir de manière responsable depuis les années 60-70 dans des domaines variés comme les sciences de l'éducation, la psychologie environnementale, la psychologie comportementale, le marketing, la sociologie, les sciences du comportement. Malgré toutes ces recherches et les nombreux modèles

théoriques issus de ces études, il n'y a pas à ce jour de réponse définitive. Cependant les chercheurs ont identifié les principaux facteurs de motivation du comportement responsable et ses barrières.

Nil Toulouse Ozcäglar dans ses travaux sur le sens que les consommateurs responsables donnent à leurs actes identifie quatre actions communes entreprises par les consommateurs [90] :

- fuir le mal-être : leur comportement est motivé par le fait d'affirmer leur différence avec une société dont les valeurs sont trop éloignées des leurs.
- retrouver le soi « authentique » : Les consommateurs se sentent aliénés par la consommation de masse, ils recherchent une affirmation de leur identité et leurs actions sont un moteur dans ce processus d'individuation à la recherche de leur « authenticité »
- éviter l'isolement : ce point peut paraître paradoxal : leurs comportements vertueux s'inscrivent à la fois en opposition à la dynamique sociale dominante ce qui peut causer un sentiment d'isolement par rapport aux autres. Mais ce sentiment est compensé par le sentiment d'appartenance à un groupe distinct et respectueux : celui des autres consommateurs responsables qui agissent comme eux.
- contrôler sa vie : les consommateurs ont le sentiment d'être pilotés par des pratiques de marketing et souhaitent reconquérir un certain contrôle sur leur vie et leurs décisions et donner plus de sens à leurs actions

On retrouve des résultats similaires dans les travaux de Lundblad & Davies sur les valeurs et les motivations qui soutiennent la consommation responsable [93] :

- l'expression du soi
- l'estime de soi
- la responsabilité personnelle
- la protection de la planète
- le sentiment d'accomplissement
- la justice sociale

Jacobs et al. ainsi que Legere & Kang [94], [95] rapportent que chez certains consommateurs, notamment les plus engagés et radicaux, ces motivations constituent également une part importante de leur construction identitaire et du processus d'individuation.

La liste la plus exhaustive des différents facteurs de motivations identifiés dans la littérature en sociologie et en marketing est résumée dans les travaux de Kollmuss & Agyeman [96]. Dans cette

étude, les chercheurs ont comparé les modèles de comportement responsable les plus influents de la littérature. De ces travaux on peut tirer la liste de suivante :

- la connaissance des problématiques : la personne est familière des problématiques environnementales et/ou sociales ;
- la connaissance des stratégies à appliquer : la personne sait comment agir pour réduire ses impacts sur l'environnement. Certains modèles font uniquement référence à la connaissance des enjeux environnementaux et son influence sur les attitudes et valeurs des consommateurs plutôt que sur leurs actions ;
- le lieu de maîtrise : la tendance que les individus ont à considérer que les événements qui les affectent sont le résultat de leurs actions (lieu de maîtrise interne) ou, au contraire, qu'ils sont le fait de facteurs externes sur lesquels ils n'ont que peu d'influence (lieu de maîtrise externe) ;
- la sensibilité environnementale : les consommateurs avec une forte sensibilité environnementale ont tendance à plus effectuer des actions positives sur l'environnement. Cependant la relation entre sensibilité environnementale et passage à l'action est généralement faible ;
- l'engagement verbal : la communication de la volonté d'agir par le consommateur donne également une indication de la volonté de celui-ci de s'engager dans un comportement pro-environnemental.
- le sens de la responsabilité individuelle : les personnes avec un plus grand sens de la responsabilité personnelle ont plus de chance d'engager des pratiques pro-environnementales ;
- les possibilités d'actions : ce sont les facteurs extérieurs tels que les infrastructures ou les possibilités économiques qui poussent ou freinent les consommateurs dans leurs démarches environnementales ;
- les incitations comportementales : ce sont des facteurs plus internes, qui renforcent les comportements écologiques (la désirabilité sociale, le gain de qualité de vie, les économies financières...) ;
- la perception des retours : une personne doit recevoir un signal positif pour continuer son engagement et ses bonnes pratiques environnementales. Ces retours peuvent être intrinsèques aux actions entreprises (la satisfaction de faire une bonne action) ou extrinsèques (faire des actions socialement désirables ou en tirer un gain économique)

Les chercheurs concluent qu'un modèle prenant en compte tous ces facteurs n'est sans doute pas exploitable. Toutefois cela permet d'avoir une vue d'ensembles des facteurs possibles à prendre en compte lorsqu'on étudie le comportement des consommateurs responsables.

Jusqu'ici la thématique abordée est celle des facteurs de motivations du comportement responsable, mais d'autres facteurs influencent négativement les comportements et se révèlent être de véritables entraves et barrières à ces comportements plus vertueux. Ces barrières sont déjà présentes implicitement dans la formulation de certains facteurs de motivations, mais il paraît important de bien distinguer ce qui constitue un facteur de motivation d'une barrière du comportement responsable.

- le manque de connaissance : le manque de connaissance et de compréhension des impacts de la production, de l'utilisation et de la fin de vie des vêtements constitue une grande barrière pour les consommateurs. De plus, depuis quelques années de très nombreux labels et certifications fleurissent et abreuvent les consommateurs d'information. Cela provoque une confusion chez les consommateurs qui préfèrent ne pas agir faute d'avoir des informations claires et cohérentes [6], [11] – [15] ;
- l'hygiénisme : parmi les actions positives que le consommateur responsable peut entreprendre, il y a par exemple l'augmentation du nombre de porters de ses vêtements avant le lavage, ou l'utilisation de produits d'entretien alternatifs. Ces actions se heurtent à la peur des odeurs et de la saleté et au marketing de la propreté [92], [98].
- L'évitement de sacrifices personnels : les consommateurs ont tendance à éviter les comportements qui demandent un investissement ou un effort ou l'abandon de pratiques qu'ils apprécient[93] ;
- le manque de ressources : nombreuses sont les actions entreprises par les consommateurs responsables qui nécessitent plus de temps et d'argent que la consommation classique caractérisée par son faible coût et sa forte accessibilité ce qui constitue un frein non négligeable à l'adoption de ces comportements [10], [88], [98], [99] ;
- La pression sociale : le paradigme socio-économique dominant influence le comportement et les décisions du consommateur, autant par les actions des acteurs institutionnels que par la pression des pairs. [93], [98], [99]

Outre le recensement de ces facteurs de motivations et barrières, les recherches citées précédemment mentionnent un phénomène bien connu des sciences comportementales: l'écart entre l'attitude et les comportements, souvent dénommé « *value action gap* ».

II.1.3 Le fossé entre l'attitude et le comportement et la notion de « *value-action gap* »

Comme le mentionnent Fischer et al. dans leurs travaux, bien que les consommateurs puissent identifier, cerner un « bon » comportement du point de vue environnemental, ils n'agissent pas nécessairement en conséquence [92]. Ce phénomène est mentionné dans la quasi-totalité des publications précédemment citées [4] — [8], [10], [12], [14]. Ainsi ces travaux relatent une forte dissonance entre les attitudes positives témoignant d'une sensibilité au développement durable et les comportements d'achat, phénomène dénommé « attitude-behaviour gap » ou « value-action gap » [100], [101].

Une piste non négligeable expliquant cette dissonance est le phénomène de désirabilité sociale que peut avoir une « bonne » attitude environnementale [102]. Les consommateurs auraient donc tendance à surestimer leur sensibilité aux problématiques environnementales. Un autre phénomène explicatif est la notion de crédit moral : certains consommateurs considèrent en effet que les actions bénéfiques qu'ils mènent dans un secteur donné de leur vie les absous en quelque sorte de la culpabilité qu'ils pourraient ressentir en ne faisant pas d'autres « bonnes » actions dans d'autres secteurs de leur vie. Ce phénomène peut également être inconscient : le consommateur entreprend des actions responsables dans d'autres domaines de sa vie et ne questionne pas ses autres pratiques.

Les travaux d'Angélique Rodhain mettent l'accent sur la notion de « value-action gap » à partir de l'étude des mécanismes de défenses des consommateurs [103]. Elle mobilise la théorie de la neutralisation, théorie qui permet de mieux comprendre la dissonance entre leurs attitudes et leurs actions à partir de quatre techniques :

- le déni de responsabilité : le consommateur rejette la faute sur le marché ou sur d'autres acteurs. Par exemple le consommateur critique le manque d'information sur les produits, le manque de lieu de distribution, le prix trop élevé etc... ;
- le déni de préjudice (ou de bénéfice) : le consommateur considère que son action n'a pas d'effet ;
- condamner les juges : le consommateur attaque les acteurs de la cause qu'il est censé soutenir pour défendre son inaction ;
- une autre priorité : le consommateur justifie son inaction par la considération d'une autre cause jugée plus importante à ses yeux.

La littérature fait donc la distinction entre une donnée attitudinale et notamment la « sensibilité environnementale » et une donnée comportementale. Comment cette donnée attitudinale est-elle définie dans la littérature ?

II.1.4 Le concept de sensibilité environnementale

La sensibilité environnementale est un paramètre utilisé par les chercheurs pour qualifier la tendance du consommateur à se sentir concerné par les problématiques environnementales. Quelle que soit la forme qu'elle prend, elle est toujours évaluée dans la littérature comme une mesure d'accord ou de sensibilité du consommateur à un ou plusieurs des facteurs de motivations mentionnés dans les parties ci-dessus. Cette notion est centrale dans chacun des articles du corpus de littérature cité tout au long de cette partie. En effet ce concept initialement appelé « Préoccupation Pour l'Environnement » est présent dès les travaux de Webster et al. de 1975 [89]. A la fin des années 1990, Le chercheur Jean-Luc Giannelloni a réalisé une synthèse de la littérature sur ce paramètre et les diverses manières de l'évaluer. Dans ces travaux on retrouve les notions évoquées précédemment (facteurs de motivations, barrières, écart attitude/comportement, etc.). Considérant la diversité des modèles et des paramètres utilisés pour évaluer la Perception Pour l'Environnement (PPE) des consommateurs, Giannelloni conclut qu'une évaluation pertinente doit prendre en compte les aspects cognitifs et conatifs de la préoccupation pour l'environnement pour mesurer à la fois l'attitude du consommateur à l'égard de l'environnement, ses actions et l'éventuel écart entre les deux. McDonald et al. [97] vont également dans ce sens en comparant deux corpus de littérature dans lesquels les consommateurs responsables sont évalués suivant une construction attitudinale ou une construction comportementale. Il apparaît que chacune de ces constructions est insuffisante par elle-même pour décrire les comportements des consommateurs responsables. Une approche à la fois attitudinale et comportementale serait plus appropriée.

Une telle approche peut se retrouver dans les travaux du chercheur Imed Zaiem [104]. Dans ces travaux ce paramètre est appelé « *sensibilité écologique* » et est mesuré par 10 items représentant le degré d'émotion attaché aux questions environnementales par le consommateur. Les items prennent la forme d'affirmations avec lesquelles le répondant doit attribuer son degré d'accord selon une échelle de Likert à 5 points (5-tout à fait d'accord, 4-plutôt d'accord, 3-sans opinion, 2-plutôt pas d'accord, 1-pas du tout d'accord.) [104]. Ci-après quelques exemples des affirmations utilisées dans les travaux :

- les sentiments qu'il éprouve face à la dégradation et à la raréfaction des ressources naturelles ;
- l'importance qu'il accorde à la pollution, à ses dangers sur la vie des êtres vivants et sa réaction face à ces problèmes ;

- son degré de conscience et l'attention qu'il accorde aux produits écologiques ;
- les sentiments qu'il éprouve envers un comportement spécifique et les bienfaits que peut avoir ce comportement sur l'environnement.

Cette évaluation de la sensibilité écologique est complétée par une évaluation des comportements écologiques pratiqués par le répondant pour prendre en compte l'existence du « value-action gap ». Ce paramètre est évalué selon 8 items et de façon identique à la notion de sensibilité écologique. Les affirmations concernent par exemple le tri des déchets ou la participation à des manifestations écologiques, etc. À partir de ces critères attitudinaux et comportementaux, plusieurs chercheurs ont dressé des typologies de consommateurs responsables. Il nous semble particulièrement intéressant de mobiliser ces typologies dans notre thèse afin d'une part de caractériser différents profils de consommateurs et d'autre part de modéliser leurs actions et comportements au sein de scénarios d'ACV.

II.1.5 Les différentes typologies de consommateurs responsables.

L'objectif des recherches sur les consommateurs responsables, outre les définitions et pratiques et attitudes s'y rattachant, est de définir et de déterminer les critères permettant de segmenter ou de dresser des typologies de consommateurs selon leur appétence pour une consommation responsable.

McDonald et al. [97] constatent qu'une partie de la revue de littérature considère les consommateurs de manière binaire : par exemple les consommateurs « verts » qui manifestent des intérêts et des actions responsables et les consommateurs « gris » dont les intérêts et actions ne sont pas responsables ou encore les consommateurs qui recyclent et les autres. Ces approches sont insuffisantes, car elles considèrent chacun des deux groupes comme un ensemble homogène de consommateurs similaires, or ce n'est clairement pas le cas considérant l'existence d'une population qualifiée par son écart attitude/environnement [97]. Il existe plusieurs manières de former des groupes au sein d'une population donnée. Les groupes peuvent être formés par « segmentation », lorsque les différents groupes sont formés en fonction de caractéristiques objectives et mesurables comme le sexe, le revenu, la profession ou le niveau d'éducation. Les groupes obtenus par segmentation se distinguent de ce que la sociologie appelle une typologie. Au sein d'une typologie, les individus sont caractérisés par des éléments plus subjectifs tels que leurs systèmes de valeurs, leurs comportements ou leurs intentions. Cette distinction est importante à mentionner, car dans une typologie les différents groupes sont conceptuellement plus complexes. Les typologies peuvent être déterminées par traitement statistique sur l'ensemble des données d'une population ou par des méthodes plus qualitatives [97].

Nous avons réuni quatre études définissant des typologies de consommateurs responsables et avons synthétisé les descriptions des classes obtenues et les éléments utilisés pour les définir (Tableau 1). L'examen de la construction et du contenu de ces différentes typologies nous permet de définir une structure et des éléments communs à la définition d'une typologie du consommateur responsable. Chacune de ses typologies a pour objectif d'identifier différents types de consommateurs en fonction de leur rapport à l'environnement, celui-ci est défini au travers de diverses questions et données sociologiques (en italique dans le Tableau 2). Ces données sont assimilables au concept de sensibilité environnementale évoquée dans la section II.1.4 précédente. Les typologies issues des travaux de McDonald et al., et de McNeill & Moore [10], [97] se concentrent uniquement sur ces aspects, tandis que les autres chercheurs évoqués ci-dessus ont complété leurs approches par un questionnement de la prise en compte de l'environnement dans l'acte d'achat voire même dans leur usage Onel et al. [105]. Cette structure permet d'obtenir une estimation de la sensibilité environnementale du consommateur et d'estimer la présence plus ou moins importante du « value-action gap » dans son comportement.

Tableau 2 : Typologies de consommateurs responsables issus de la littérature en sociologie et en marketing.

ARTICLE	GROUPES	DESCRIPTIONS	ATTRIBUTS ET THEMES DES ENTRETIENS
MCDONALD ET AL. [97]	Translators	Conscients des problématiques environnementales, mais plus ou moins « responsables » dans tous les aspects de leur vie	Conception du développement durable Orientation de leur recherche d'information
	Exceptors	La prise en compte de l'environnement est centrale dans leur vie et motive de très nombreuses actions dans tous les domaines de leur vie.	Traitement des informations relatives au développement durable Sources d'informations considérées comme fiables Formats des informations consultées
	Selectors	Ils sont caractérisés par une attitude et une pratique responsable forte, mais circonscrite à un ou à peu d'aspects de leur vie.	Échelle du niveau de recherche Accords avec les informations collectées Motivations Éléments moteurs de l'action
KOSZEWSKAE T AL. [106]	Ecologically and socially sensitive	Seul groupe qui considère fréquemment l'environnement et le social dans leur prise de décision.	Questionnaire centré autour des critères de choix lors de l'achat d'un article.
	Ecological conservative	Similaires dans l'utilisation des critères environnementaux et sociaux, mais différents dans leurs autres critères de choix des produits (qualité, prix, etc.)	
	Fashionistas		
	Slow fashionistas		
	Neutral minimalist Thrifty	Peu de considération pour l'environnement ou le social, focus sur la minimisation du coût	
MCNEILL & MOORE [10]	Self	Neutre ou pas favorable au développement durable, plus concerné par les enjeux économiques	Le souci de soi L'importance de la mode dans la vie L'inquiétude vis-à-vis des questions environnementales et sociales La perception de barrières à la consommation responsable Les motivations à changer
	Social	Plusieurs pratiques ou comportements responsables, mais perçoit des freins à leur expansion	
	Sacrificial	Les plus actifs et sensibles à l'environnement, mais conflit entre leur désir d'être « fashion » et leur éthique personnelle	
ONEL ET AL. [105]	Consommateur Holistique	Consommateurs très engagés pour lesquels la consommation durable est un style de vie plutôt qu'un but en soi.	Données socio-économiques, sociodémographiques et psychosociologiques Influences sociales Peurs et inquiétudes, Croyances, attitudes, besoins et barrières perçues
	Consommateur transitionnel	Sensible à l'environnement, mais pas dans tous les aspects de leur vie ce qui se traduit par des comportements moins responsables	Conscientisation Objectifs divers (vie, émotionnel, etc.) Attitude envers les produits, caractéristiques émotionnelles Environnement
	Consommateur restreint	Ne se sentent concerné que par une unique cause (bien-être animal, sujets sociétaux, etc.)	Engagements personnels, Contexte des actions ; Caractéristiques d'acquisition et utilisation des produits.

Afin de déterminer les différents groupes de consommateurs présents sur le marché et au vu de la littérature précédemment développée, nous étudierons le consommateur selon deux paramètres : sa sensibilité environnementale et ses pratiques d'achat de vêtements. Nous souhaitons également intégrer la diversité des usages possibles des vêtements par le consommateur, pour cela nous ajoutons un troisième paramètre : les pratiques d'entretien des vêtements par le consommateur.

II.2 Méthodes et outils pour l'étude du comportement des consommateurs

L'une des problématiques de cette thèse est de proposer une méthodologie pour modéliser l'usage d'un vêtement et donc l'impact environnemental en prenant en compte la diversité des profils de consommateurs. L'influence du consommateur sur ses vêtements est multiple et ne se résume pas uniquement à ses pratiques d'entretien comme c'est le cas dans de nombreuses ACV [23] — [28] où la diversité des consommateurs est réduite à un usage moyen, définis par un programme et une température de lavage moyenne calculée sur une population très large.

Le rapport au vêtement du consommateur est incarné par ses choix vestimentaires qui reflètent la valeur qu'il accorde à ces biens, cependant est-ce que cette valeur attribuée au vêtement se reflète dans les comportements d'entretien ? Dans quelle mesure la sensibilité environnementale du consommateur vue précédemment se manifeste-t-elle dans les comportements d'achat et d'entretien ? Ces différentes pratiques réduisent-elles les impacts du cycle de vie de leur vêtement ?

La collecte de données sur les consommateurs peut prendre de nombreuses formes, suivant la méthodologie de recherche choisie : quantitatives ou qualitatives. Comme mentionné précédemment, l'outil principal utilisé dans ces travaux est un sondage permettant la collecte de données quantitatives pour l'établissement d'une typologie de consommateur. Les outils qualitatifs sont néanmoins intéressants puisqu'ils apportent un autre point de vue sur les questions étudiées. Pour résumer, les outils quantitatifs ont pour principal objectif de mesurer, suivre et chiffrer une donnée alors que les études qualitatives ont davantage pour objectif d'explorer, comprendre ou approfondir un sujet. Dans notre cas nous avons également opté pour une méthode qualitative afin d'approfondir les comportements d'usage des consommateurs et tenter de mieux appréhender le lien entre les pratiques d'achats et d'usage et la sensibilité environnementale du consommateur.

II.3 Le sondage

Le sondage est un outil de collecte de données quantitatif. Il s'agit de prélever un échantillon de population et de le soumettre à un questionnaire à des fins d'analyse. Un sondage est défini par plusieurs éléments :

- ses objectifs ;

- son contenu, autrement dit le questionnaire ;
- ses sujets, l'échantillon de population que représentent ses répondants ;
- le médium par lequel le sondage est transmis et conduit.

II.3.1 Echantillon et fiche signalétique

Les informations générales collectées sur les répondants lors du sondage sont le nombre de personnes dans le foyer du répondant, l'âge, le sexe et la catégorie socioprofessionnelle du répondant. Ces informations sont principalement utilisées pour rationaliser l'échantillon afin qu'il soit plus représentatif de la population française avant le traitement des données. Il nous permet également de mettre en lumière des différences d'attitudes selon les critères sociodémographiques des informants.

La population ciblée par le sondage est la population française et plus précisément les personnes chargées de l'entretien des vêtements au sein de leur foyer. L'échantillon est construit selon la méthode des quotas, méthode d'échantillonnage qui consiste à s'assurer de la représentativité d'un échantillon de population en lui appliquant une structure similaire à celle de la population visée.

Lors du traitement des résultats, l'ensemble des réponses obtenues ont fait l'objet d'un tri par la méthode des quotas afin de constituer un échantillon de travail qui reflètera dans la mesure du possible la population française en termes d'âge et de catégorie socioprofessionnelle (CSP) et qui sera uniquement constitué des personnes s'occupant de l'entretien au sein de leur foyer.

D'après les derniers relevés de l'INSEE [110] la population française selon la catégorie socioprofessionnelle est la suivante :

Tableau 3 : Répartition des catégories socioprofessionnelles dans la population française en 2020 [110].

Catégorie Socioprofessionnelle	%
Agriculteurs exploitants	0,7
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	3,5
Cadres et professions intellectuelles supérieures	10,6
Professions intermédiaires	13,7
Employés	14,2
Ouvriers	10,9
Inactifs ayant déjà travaillé	33,4
Personnes n'ayant jamais travaillé (dont étudiants 7.9 %)	12,7

De même la pyramide des âges [111] est la suivante :

Tableau 4 : Pyramide des âges de la population française en 2020 [111].

Âge	%
Moins de 18 ans	23
18 à 20 ans	2
21 à 29 ans	10
30 à 39 ans	12
40 à 49 ans	13
50 à 59 ans	13
60 à 69 ans	12
70 à 79 ans	9
80 ans et plus	6

Le choix a été fait d'utiliser internet comme source de recueil des données. Cette méthode a l'avantage de favoriser une audience plus large et un accès plus rapide. Cependant cette méthode ne permet pas de contrôler les conditions dans lesquelles le sondage est effectué, il n'est donc pas exclu que les réponses soient influencées par le lieu (domicile ou lieu de travail), l'heure, l'état émotionnel du répondant, sa disponibilité et son degré d'attention. Afin de limiter dans une certaine mesure ces facteurs extérieurs, le sondage a été créé pour être relativement rapide à compléter (entre 10 et 15 minutes). Le sondage a été conçu et diffusé par le biais de la plateforme SurveyMonkey. Il s'agit d'un logiciel en ligne de sondage auquel le laboratoire est abonné. Il a été distribué sur les réseaux sociaux et via une chaîne de courriels en commençant par les proches collègues et les membres de leurs familles.

II.3.2 Conception du sondage

Comme indiqué précédemment, nous avons défini 3 axes sur lesquels sera construite notre typologie de consommateur:

- l'achat : quelles sont les pratiques d'achat de vêtements de consommateurs ? À quelle fréquence ? Selon quel budget ? En quelle quantité ?
- la sensibilité environnementale : Le répondant se sent-il concerné par les problématiques environnementales ? Dans quelle mesure cela est-il moteur d'actions particulières ou d'un changement de comportement ?
- l'entretien : Comment le répondant entretient-il ses vêtements ?

L'objectif de ce sondage est d'extraire une ou plusieurs typologies de consommateurs à partir de l'ensemble des réponses obtenues par le biais du sondage.

II.3.2.1 Axe Environnement

Cette première section du sondage a pour objectif de qualifier la sensibilité du consommateur aux problématiques environnementales. Cela permettra de mettre cette sensibilité en perspective de ses pratiques d'achat et d'entretien.

Cette partie est constituée de 5 items, dont 4 représentent une auto-évaluation par le répondant de sa sensibilité à l'environnement. Ces 4 premiers items prennent la forme d'affirmations auxquelles le répondant devra attribuer son degré d'accord selon une échelle de Likert à 5 points (5-tout à fait d'accord, 4-plutôt d'accord, 3-sans opinion, 2-plutôt pas d'accord, 1-pas du tout d'accord.) Ces 4 items sont inspirés de l'échelle de conscience environnementale proposée par Schwepker & Cornwell en 1991 [112] dont voici les 3 affirmations :

- quand j'achète des produits, je fais attention à la manière dont mon utilisation affectera l'environnement et les autres consommateurs ;
- je recycle mes déchets dès que possible ;
- dès que cela est possible, j'achète des produits que je considère comme sains d'un point de vue environnemental.

Dans notre questionnaire, les 4 affirmations utilisées sont les suivantes :

- en général, si j'ai le choix j'achète des produits dont l'emballage est recyclable ;
- je donnerai volontiers l'équivalent du don moyen français (en moyenne 68 € en France), à une fondation ou une association qui aide à l'amélioration de l'environnement ;
- j'ai tendance à acheter des produits respectueux pour l'environnement ;
- j'accepte de payer un peu plus cher un produit vert/écologique.

Dans ces premiers items le répondant autoévalue son accord avec les affirmations, mais rien n'indique si ces intentions sont effectivement traduites en actes. En effet la littérature est très claire sur l'existence d'un fossé entre l'attitude et l'action, phénomène déjà évoqué précédemment à la section Le fossé entre l'attitude et le comportement et la notion de « *value-action gap* » en section II.1.3 du chapitre [4] — [8], [10], [12], [14]. Le dernier item de la section du sondage a pour objectif de prendre en compte ce fossé attitude/comportement. Cependant, les comportements relatés par les répondants sont déclaratifs et n'ont pas été vérifiés dans les faits sur les lieux de vente, au sein du domicile des répondants, ou sur les sites internet. Nous avons toujours un risque de désirabilité sociale.

Ce cinquième item est une liste d'actions concrètes jugées « vertueuses » du point de vue social ou environnemental, le répondant cochera les actions qu'il aura effectuées au cours des 6 derniers mois.

La liste des dites actions est la suivante :

- achat d'un vêtement doté d'un label environnemental (écolabel européen, label bio,...) ;
- réparation ou transformation d'un de vos vêtements ;
- don de vêtements (famille, amis, associations, points de collecte...) ;
- revente de vêtements (vide-dressing, etc.) ;
- location de vêtements (en tant que loueur ou locataire) ;
- achat de vêtements made in France ;
- réduction volontaire de mes achats de vêtements (hors raisons économiques).

II.3.2.2 Axe Consommation

La deuxième section du sondage concerne les habitudes de consommation des répondants. Dans cette partie il est demandé aux répondants de définir sa fréquence d'achat de vêtements, le budget annuel qui y est alloué et de fournir une estimation du nombre total d'articles que cela représente par an. Les deux premiers items sont des questions à choix multiples tandis que l'estimation du nombre d'articles achetés par an s'effectue à l'aide d'une glissière. Les différentes fréquences d'achats sont les suivantes :

- 1 fois par semaine
- 1 à 2 fois par mois.
- une fois par trimestre
- une fois par semestre
- une fois par an
- au-delà d'un an

Les budgets proposés étaient les suivants :

- < 100 €
- 101 – 200 €
- 201 – 400 €
- 401 – 600 €
- 601 – 800 €
- 801 – 2000 €
- + de 2000 €

Le répondant doit également préciser les circuits de distribution qu'il utilise habituellement ainsi qu'estimer la gamme des produits qu'il consomme, par le biais de questions à choix multiples. Pour la gamme des vêtements, les répondants ont le choix entre plusieurs options : entrée, moyenne et haut de gamme. Les circuits de distribution d'achat proposés étaient les suivants :

- en grandes surfaces ;
- en magasins de prêt-à-porter ;
- par internet ou par mobile (produits neufs) ;
- dans des magasins d'usine (ou outlets) ;
- en magasins de seconde main/friperies/vintage shops ;
- vide-dressing (brocantes, vide-grenier, sites type Vinted, Leboncoin, etc.).

Cette section contient également des questions plus spécifiques à certains types de produits. Par exemple la fréquence d'achat de pulls, le budget maximal utilisé ou encore une estimation de la durée de vie des pulls d'après l'expérience du répondant (en mois et/ou en années).

II.3.2.3 Axe Entretien

Dans cette dernière section du questionnaire, nous nous sommes intéressés aux habitudes et pratiques d'entretien des répondants. Cette section commence par une question d'éligibilité : « Vous occupez-vous de l'entretien des vêtements au sein de votre foyer ? ». Cette question est une question de contrôle qui permettra de faire le tri entre les répondants lors du traitement des données.

Les items de cette section sont séparés en deux catégories :

- les items relatifs au lavage : température, programme de lavage, vitesse d'essorage, méthode de séchage, etc.
- les items relatifs au soin du vêtement : le tri du linge, le suivi des étiquettes de lavage, etc.

Ces différents items permettent de qualifier le consommateur selon les critères suivants :

- les programmes de lavage utilisés et l'estimation de leur fréquence d'utilisation respective ;
- les températures de lavage utilisées pour chaque programme de lavage ;
- le type de lessive utilisé ;
- le tri du linge ;
- l'adaptation des programmes de lavage en fonction du contenu du lavage ;
- le suivi des consignes de lavages présents sur les étiquettes ;
- la vitesse d'essorage habituellement utilisée ;

- la méthode privilégiée pour le séchage du linge ;
- le repassage des vêtements, ainsi que la puissance utilisée et le temps moyen du repassage ;
- le degré de réparation envisageable.

Ces trois axes et les réponses aux questions qui les composent sont les fondements desquels nous avons extrait les typologies de consommateurs utilisées dans la suite de ces travaux. La section suivante développe la méthode utilisée pour effectuer cette extraction.

II.3.2.4 Méthode de construction des typologies

Les données du sondage ont été traitées statistiquement afin d'en extraire des typologies de consommateur selon les 3 axes cités plus tôt. Construire une typologie consiste à segmenter un ensemble de données selon des groupes homogènes en fonction de leurs caractéristiques, en analyse de données ce procédé est appelé classification non supervisée.

Il existe de nombreuses méthodes de classification non supervisée plus ou moins adaptées en fonction de la taille et de la typologie de l'ensemble des données à étudier. Dans notre cas nous avons un ensemble de données composé de répondants du sondage caractérisés par un nombre important d'attributs quantitatifs et catégoriels (nominaux et ordinaux). Nous souhaitons classer ses individus pour chacun des 3 axes chacun défini par un ensemble d'attributs particuliers et sans connaissance préalable du nombre de classes. Les attributs considérés dans cette étude ne sont pas homogènes et sont très variés dans leurs formes et leurs types. De plus, les données que nous souhaitons traiter sont issues d'un sondage réalisé en auto-évaluation par les répondants, la présence de points aberrants au sein des données est donc probable.

La classification hiérarchique est particulièrement adaptée pour traiter des types d'attributs variés et également, par sa représentation sous forme d'arbre hiérarchique appelé dendrogramme, pour déterminer un nombre de classes non connu à priori et identifier et écarter les potentiels points aberrants [34], [35]. La classification hiérarchique peut être descendante et la méthode ascendante.

- Méthode Descendante : l'algorithme s'initialise avec un seul cluster contenant tous les individus et sépare le ou les clusters à chaque itération en fonction du paramètre qui sépare le plus les individus.
- Méthode Ascendante : l'algorithme s'initialise avec un cluster par individu et fusionne les clusters en fonction du paramètre sur lequel ils sont les plus similaires.

Dans ces deux méthodes, l'algorithme produira une relation d'ordre entre les paramètres en fonction du degré de similarité des individus sur ces paramètres. Le critère utilisé pour qualifier la similarité des

éléments est une distance, ici c'est la distance euclidienne qui est utilisé. Pour notre application, la méthode de regroupement de Ward [113] a été choisie car elle permet de minimiser la perte d'inertie interclasse (Équation 1) à chaque itération et permet ainsi une interprétation plus aisée du dendrogramme.

Équation 1 : Perte d'inertie lors du regroupement de A et B.

$$e(A, B) = \frac{n_A \cdot n_B}{(n_A + n_B)} \times d(g_A, g_B)^2$$

Où g_A est le centre de classe de A, et g_B celui de B et où n_A est le nombre d'individus du groupe A et n_B le nombre d'individus du groupe B et $d(g_A, g_B)$ la distance entre les deux centres de classe.

Cette méthode de classification nous permet d'obtenir des typologies de consommateur et correspond à une étude quantitative du consommateur, elle nous permet d'étudier le consommateur au travers d'un ensemble de données précis et définis. Toutefois, comme nous l'avons précisé, l'approche quantitative vise à valider des hypothèses déjà définies et à mesurer des attitudes, comportements intentions identifiées préalablement. Le cadre de l'étude quantitative limite les possibilités d'apports de connaissance supplémentaires de la part du consommateur puisque ses réponses doivent respecter le format prévu par l'étude. Dans la prochaine section nous présentons plus en détail la méthodologie d'une étude qualitative.

II.3.3 L'approche qualitative

L'approche qualitative, non prévue dans notre méthodologie initialement, nous a semblé judicieuse à mobiliser pour mieux expliciter certaines données issues de l'étude quantitative. En effet, explorer le comportement du consommateur dans ses pratiques d'usage et d'entretien des vêtements selon ses modalités et ses types d'achat mais également selon sa sensibilité environnementale et ses actions usuelles en matière de développement durable nous ont permis d'affiner la typologie d'entretien. Nous n'avions pas d'éléments de littérature préalable sur cette typologie contrairement à la typologie environnementale et la typologie d'achat. En réalisant des entretiens approfondis avec les consommateurs, nous souhaitons appréhender le lien entre les pratiques d'entretien et le rapport du consommateur à l'environnement.

L'approche qualitative a été réalisée sur la base d'entretiens semi-directifs. Ce type d'entretien est souvent utilisé pour obtenir des informations détaillées sur un sujet général, mais en suivant des éléments précis. Le thème de l'échange est fixé par l'enquêteur qui dispose d'une grille d'entretien qui liste les thèmes ou les aspects du thème principal qui seront abordés au cours de l'entretien. Avec cette méthode l'enquêteur réalise des entretiens individuels ou collectifs durant lesquels la parole est

majoritairement laissée à la personne interrogée afin qu'elle ait l'opportunité d'exposer son point de vue, le chercheur doit intervenir avec parcimonie afin de ne pas influencer l'échange tout en s'assurant que tous les éléments de la grille d'entretien aient été abordés [114].

Nous avons réalisé une série de 11 entretiens semi-directifs. Ces entretiens d'une durée de 20 à 45 minutes suivent les thématiques du sondage avec un focus plus important sur les pratiques d'entretien des personnes. La cible de ces entretiens est la même que le groupe de répondant principal du sondage, à savoir les femmes entre 18 et 50 ans (un seul homme a participé aux entretiens). Nous avons privilégié les femmes étant donné que ce sont elles qui sont majoritairement concernées par l'entretien des vêtements au sein de foyer français [115]. Un total de 11 entretiens ont été menés en face à face quand cela était possible ou par visioconférence pour des questions d'éloignement géographique et de consignes sanitaires en raison de la COVID-19.

Concernant l'analyse de données qualitatives, nous nous sommes référés aux chapitres de l'ouvrage de Laurence Bardin intitulé « L'analyse de contenu » [116], qui décrit la genèse de l'analyse de contenu du point de vue historique. Elle en propose ensuite une définition itérative au travers de diverses réflexions sur ses domaines d'application, ses principes, ses sujets, ses objets et ses contenus, dont voici l'itération finale :

« Un ensemble de techniques d'analyse des communications visant, par des procédures systématiques et objectives de description du contenu des messages, à obtenir des indicateurs (quantitatifs ou non) permettant l'inférence de connaissances relatives aux conditions de production/réception (variables inférées) de ces messages. »

Dans le cas d'un entretien semi-directif il s'agira, à l'aide d'un ensemble de techniques complémentaires, d'explicitier et de systématiser le contenu de l'entretien et son expression au travers d'indices quantifiables ou non, dans le but d'effectuer des déductions logiques et justifiées concernant les personnes interrogées.

DÉROULEMENT D'UNE ANALYSE

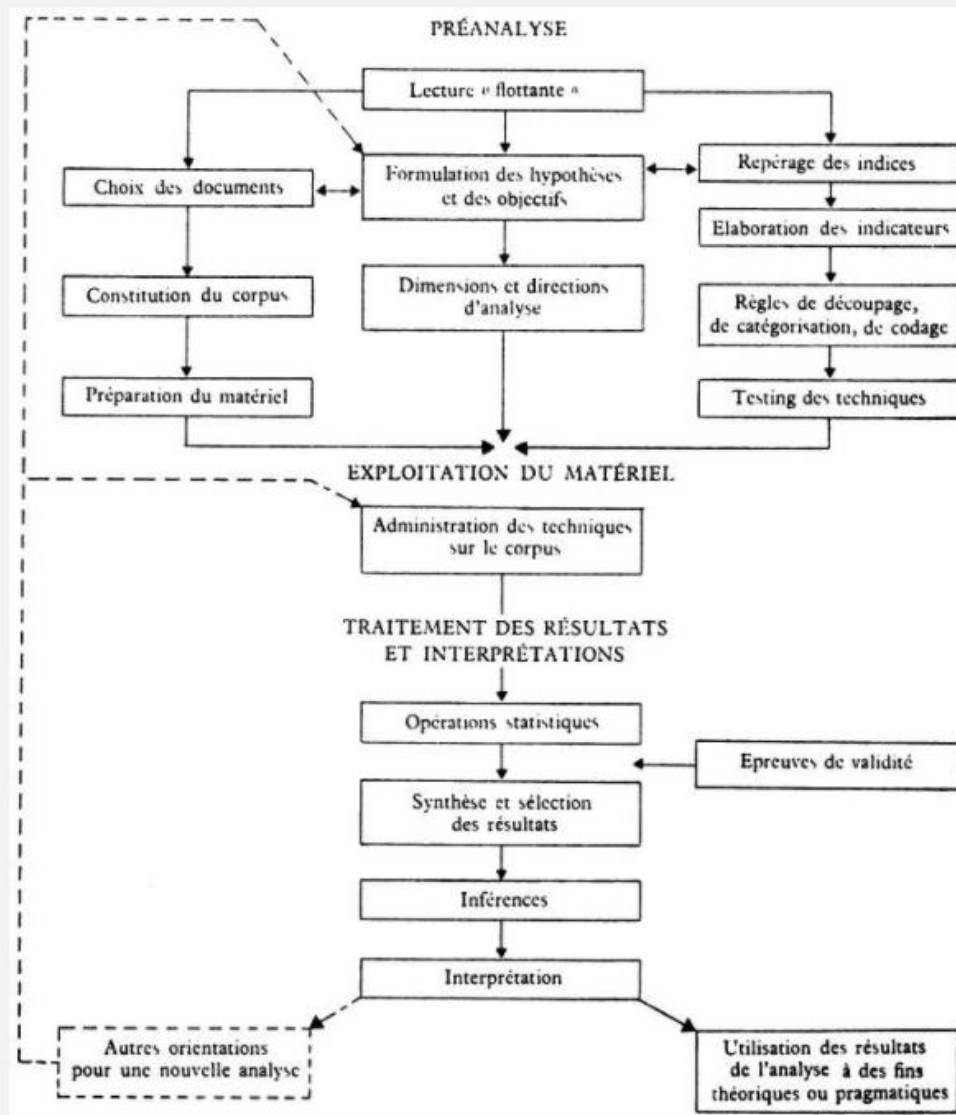


Figure 12 : Déroulement d'une analyse de contenu [116].

II.3.3.1 Préanalyse

La *préanalyse* est une phase préliminaire à l'analyse de contenu dont l'objectif est d'organiser l'analyse selon trois axes : le *choix des documents*, la *formulation des hypothèses et des objectifs* et le *repérage et l'élaboration des d'indicateurs*.

Cette phase préliminaire commence par une lecture « flottante » du corpus étudié qui permet petit à petit de faire émerger des hypothèses à partir du contenu du corpus et d'identifier les techniques d'analyse appropriées en fonction du contenu du corpus.

Le *choix des documents* est une étape préliminaire importante de l'analyse de contenu, cependant nous ne définirons pas plus cette étape puisque dans notre cas notre corpus documentaire est uniquement composé des entretiens que nous avons-nous-même conduit.

La formulation des hypothèses et des objectifs :

Les *hypothèses et les objectifs* ne sont pas forcément le résultat d'une préanalyse, les hypothèses et les objectifs de l'analyse peuvent être issus de connaissances préalables sur le sujet de recherche comme une théorie ou une question définie lors d'une autre étude. Il n'est pas obligatoire d'avoir un corpus d'hypothèse pour conduire une analyse de contenu. Il existe plusieurs techniques inductives et déductives pour faire émerger les hypothèses à partir du contenu (on parle également de plan horizontal) et des conditions de production (on parle aussi de plan vertical) des textes du corpus (situation socioéconomique, médium de communication, psychologie individuelle, etc.)

Le repérage et l'élaboration des indicateurs :

Si on considère le texte comme une manifestation d'un certain nombre d'indices, qui peuvent contribuer à l'objectif ou à infirmer ou confirmer une hypothèse, le travail préparatoire sert à choisir des indicateurs adéquats représentatifs de ces indices, en fonction des hypothèses si elles sont définies, et à les organiser systématiquement. Par exemple relever des temps de silence ou d'hésitation comme indicateurs de l'état émotionnel du locuteur ou de sa réflexion sur un sujet donné.

Enfin, la préanalyse contient aussi une étape non négligeable : la préparation du matériel. Un cas très courant est la retranscription sous forme écrite d'entretiens enregistrés, ou la traduction d'entretiens dactylographiés. Cette étape peut également faire partie d'une première lecture « flottante » effectuée au même moment que la préparation.

II.3.3.2 Le codage

L'étape de codage consiste à transformer par des opérations de découpage, d'agrégation et de dénombrement selon des règles précises les données brutes des textes pour obtenir une représentation du contenu ou de son expression pouvant servir d'indices pour l'analyste.

L'organisation du codage se déroule généralement en 2 étapes pour une analyse quantitative et catégorielle du corpus :

- **Le découpage** : le choix de l'unité d'enregistrement, segment de contenu considéré comme unité de base pour la catégorisation et le comptage. On parle également d'unité de signification, de taille et de forme diverse on distingue habituellement deux découpages se

faisant au niveau sémantique, par thème, ou au niveau linguistique, par mot, proposition ou phrase etc. Le thème est généralement choisi comme unité d'enregistrement pour des études de motivations, d'attitudes, de croyances et pour les diverses formes d'entretiens. L'unité d'enregistrement est accompagnée par une unité de contexte qui l'englobe et fournit une information supplémentaire sur celle-ci, par exemple un ressenti par rapport à un thème, par exemple la phrase pour le mot ou le paragraphe pour le thème.

- **Les règles d'énumération**, le texte codé en unité d'enregistrement permettent d'énumérer les unités d'enregistrement et d'en qualifier l'utilisation par le locuteur
 - *La présence ou l'absence* d'une ou plusieurs unités d'enregistrement peut être significative
 - *La fréquence* est la mesure la plus généralement utilisée, elle part du postulat que plus une unité d'enregistrement est utilisée plus elle est importante pour le locuteur. Si on considère l'apparition d'une unité d'enregistrement plus importante que d'autres (soit a priori à partir des hypothèses, soit a posteriori, après un premier traitement) on peut également y affecter une pondération, on parle alors de *fréquence pondérée*. La pondération peut également être effectuée à partir de *l'intensité* ou de *la direction* de l'unité d'enregistrement ou de contexte.
 - *L'intensité* : il s'agit d'une variation sémantique ou formelle au sein de l'unité d'enregistrement, par exemple le degré d'injonction « nous pourrions », « nous devrions », « nous devons ».
 - *La direction* associée à l'unité d'enregistrement est indiquée par des éléments constitutifs d'un pôle directionnel comme un degré d'accord, un critère esthétique ou un critère de taille. On indique la direction suivant qu'elle soit positive, négative, neutre ou ambivalente.
 - *La cooccurrence* est la présence simultanée de deux ou plus unités d'enregistrement au sein d'une même unité de contexte. Aussi appelée mesure de contingence, il s'agit de s'intéresser à la distribution et l'association des unités d'enregistrement avec pour postulat que l'association incluse dans l'unité de contexte reflète l'association des unités d'enregistrement dans l'esprit du locuteur. La cooccurrence peut indiquer une association simple, c'est-à-dire une présence simultanée, une équivalence entre les unités ou un caractère substitutif entre elles, une opposition ou une exclusion.

Le codage décrit ici permet l'analyse quantitative des occurrences d'unités d'enregistrement au sein du corpus notamment par l'emploi des fréquences d'apparition, mais aussi une analyse qualitative par

la prise en compte du contexte, de l'intensité, de la direction et des cooccurrences associées aux unités d'enregistrement.

II.3.3.3 La catégorisation

La catégorisation consiste à classer les éléments d'un ensemble par différenciation puis regroupement par analogie, d'après des critères préétablis. Elle s'effectue en deux étapes : l'inventaire, où on identifie les différents éléments et la classification où les éléments sont attribués à chaque catégorie. La catégorie est un rassemblement d'éléments, dans le cas de l'analyse de contenu c'est un rassemblement d'unités d'enregistrement, sous un titre générique et en fonction des caractéristiques communes des éléments. Le critère de catégorisation peut être sémantique (thème lié à un sentiment par exemple), syntaxique (verbes et adjectifs), lexical ou expressif (comme les instances de bégaiement, l'utilisation de l'argot, etc.)

La catégorisation suit la même logique que la classification en analyse de données évoquée à la section 2.3, et peut être supervisée ou non supervisée. Les catégories sont donc soumises aux mêmes critères que les classes dans l'analyse de données, dans une bonne catégorisation les catégories sont :

- Mutuellement exclusive
- Homogènes
- Pertinente par rapport aux questions de l'analyse
- Objective et fidèle, cet aspect est spécifique à la catégorisation qui est effectuée par un humain et donc sujet à ses biais et a priori.
- Productive

II.3.3.4 Techniques d'analyse

Historiquement, l'**analyse catégorielle** est la première technique d'analyse utilisée et est encore l'une des techniques les plus utilisées dans l'analyse de contenu. Elle est simplement constituée de l'application d'une catégorisation (évoquée au II.3.3.3), souvent une catégorisation thématique et est privilégiée, car elle est rapide et efficace pour traiter des discours directs et simples.

- **Analyse de l'évaluation** : cette analyse a pour but de mesurer les attitudes d'un locuteur au regard d'objets sur lesquels il s'exprime. Cette analyse est semblable à l'analyse thématique, mais va au-delà en définissant la charge évaluative attachée à l'unité d'enregistrement.
- **Analyse de l'énonciation** : cette technique d'analyse s'appuie sur la conception de la communication en tant que processus plutôt qu'en tant que donnée et sur l'attention portée à la structure et aux éléments formels du discours.

- **Analyse proportionnelle du discours** : il s'agit d'une variante de l'analyse thématique et de l'analyse catégorielle. Elle se base sur le repérage d'objets thématiques appelés *référents-noyaux* (RN) que l'on peut définir comme des pôles sémantiques qui structurent l'ensemble du discours, ils sont généralement des substantifs ou des pronoms. L'objectif est de mettre en valeur par cette analyse l'expression des enjeux et des actions entre les RN du discours.
- **Analyse de l'expression** : cette analyse se focalise sur les modalités de l'expression du discours pour alimenter les inférences sur le locuteur. L'intérêt principal est porté sur des indicateurs lexicaux, comme la richesse du vocabulaire (calculé à partir du ratio entre le nombre de mots différents et le nombre de mots total du discours) et des indicateurs phrastiques (longueur et structure moyenne de la phrase ou encore ouverture/fermeture des phrases)
- **Analyse des relations** : aussi appelée **analyse de contingence**, il s'agit dans cette analyse d'étudier les cooccurrences au sein du texte. Cette analyse est également une variante de l'analyse catégorielle. Elle suit les étapes suivantes : choix des unités d'enregistrement, choix des unités de contexte, codage, calcul des occurrences et représentation et interprétation des résultats. Les trois premières étapes ont été abordées précédemment. Le calcul des occurrences correspond à une cartographie du texte par des représentations matricielles successives en commençant par une matrice dont les lignes sont les différentes unités de contexte et les colonnes sont les différentes unités d'enregistrement, la matrice est ensuite remplie en fonction de la présence ou de l'absence de chaque unité d'enregistrement au sein des unités de contexte. Les résultats sont ensuite représentés sous la forme d'un tableau de contingence. Cette analyse relève mécaniquement les cooccurrences au sein du discours sans y associer un sens particulier, la coprésence peut être volontaire pour marquer l'exclusion d'un autre élément, elle peut être due à des liens grammaticaux entre les termes ou due à la logique de l'énonciation, ou encore refléter des associations d'idées latentes et inconscientes chez le locuteur. Cette analyse est particulièrement utilisée pour mettre en évidence des stéréotypes, des représentations sociales ou des idéologies.

Par souci de simplicité de mise en œuvre, nous réaliserons une analyse thématique des entretiens avec pour unité d'enregistrement la phrase et comme unité de contexte le paragraphe.

Nous avons entrepris notre série d'entretiens semi-directifs pour approfondir nos connaissances et mettre en évidence, d'une part, les liens éventuels entre les comportements d'achats durables et la sensibilité environnementale et, d'autre part, entre la sensibilité environnementale des consommateurs et leurs pratiques d'entretien.

II.4 Prétraitement des résultats du sondage

Le sondage conçu et distribué via la plateforme SurveyMonkey a été complété par 450 répondants. La première étape de traitement des données consiste à « nettoyer » les réponses obtenues en enlevant les instances qui pourraient venir parasiter l'analyse des données. Ainsi, les répondants avec des réponses aberrantes ou incomplètes ne sont pas considérés dans la suite du traitement. Nous éliminons les individus qui ne remplissent pas les conditions recherchées en examinant leurs réponses à une ou plusieurs questions de contrôle.

II.4.1 Nettoyage des données

Dans un premier temps, nous avons exclu les répondants dont le taux de complétion était insuffisant. Il s'agit des répondants n'ayant par exemple pas rempli leur fiche signalétique ou encore les répondants ayant au moins une section du sondage sans réponse ou alors avec un très faible nombre de réponses par rapport aux nombres d'items de la section. À la suite de ce tri, l'effectif total est passé de 450 répondants à 391 répondants.

Lors de la conception du sondage, nous avons ajouté un item de contrôle afin de savoir si le répondant s'occupait effectivement de l'entretien des vêtements au sein de son foyer. L'entretien étant un des points centraux étudiés ici cela permet de ne garder que les réponses des répondants les plus concernés et donc supposé plus fiables dans le jugement de leurs pratiques. À la suite de ce tri, l'effectif total a été réduit à 352 répondants.

II.4.2 Échantillonnage pour une meilleure représentativité

Comme mentionné dans le chapitre précédent, les typologies qui seront extraites des données doivent être représentatives de la population française. On peut examiner la représentativité de l'effectif selon trois axes : le sexe, l'âge et la catégorie socioprofessionnelle des répondants.

- Répartition en fonction du sexe des répondants :

Tableau 5 : Pourcentage d'hommes et de femmes parmi les répondants du sondage et la population française [117]

Sondage		Personne déclarant s'occuper de l'entretien du linge au sein du foyer en France (étude IPSOS/Ariel de 2018 [115])	
Homme	Femme	Homme	Femme
25.3 %	74.7 %	21 %	83 %

Compte tenu de ces données, nous avons choisi de ne pas modifier l'échantillon de travail en fonction du sexe des répondants.

- Répartition en fonction de l'âge des répondants :

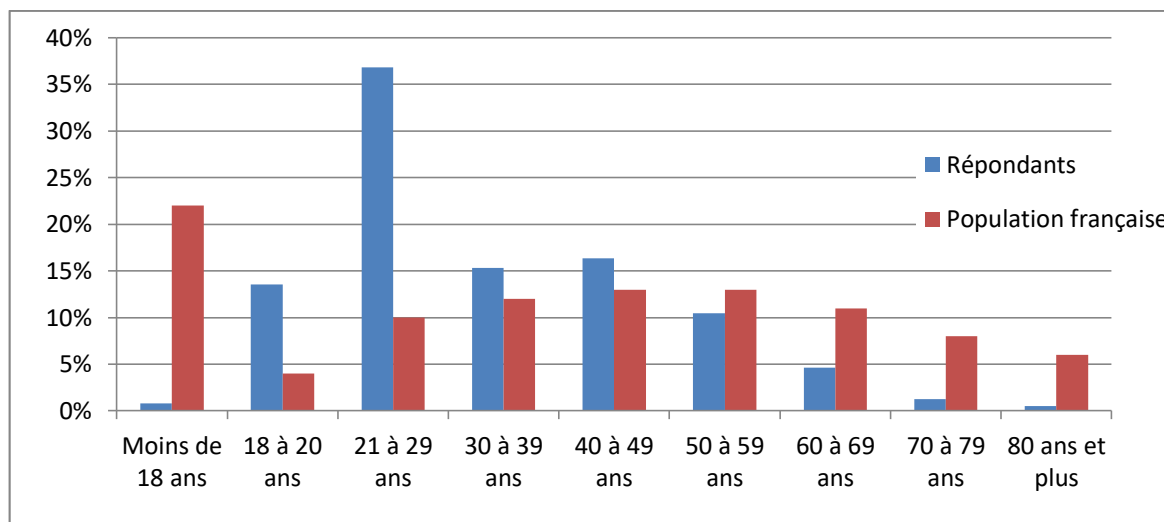


Figure 13 : Répartition des répondants et de la population française par âge [111].

Le schéma de distribution du sondage est sans doute la raison de l'apparent manque de représentativité de l'échantillon de population sondée par rapport à la population française. En dépit de nos efforts, le sondage a surtout été administré auprès d'un public jeune, le laboratoire étant rattaché à une école d'ingénieurs. De plus il a circulé sur les réseaux sociaux et professionnels ainsi que par mail au sein du laboratoire. Cette distribution particulière explique la surreprésentation des 21-29 ans et le très faible nombre de répondants de plus de 70 ans et de moins de 18 ans. De plus, il est possible que certains des répondants appartenant à ces catégories d'âge aient été exclus de l'échantillon lors de l'étape de tri mentionnée plus haut dans la section II.4.1.

Les catégories seniors ont été difficilement joignables par les médias utilisés pour administrer le questionnaire. Nous avons choisi de conserver les données déjà acquises et de ne pas modifier l'échantillon de travail pour en augmenter la représentativité sur ces catégories.

Afin d'obtenir un échantillon de population plus représentatif, nous avons réduit le nombre de répondants de la catégorie « 21 à 29 ans ». Pour cela nous avons sélectionné aléatoirement un nombre de répondants au sein de la catégorie surreprésentée pour former notre échantillon de travail. Nous avons conservé les autres catégories d'âge sans modification. Nous avons répété cette opération à plusieurs reprises. Ceci nous a permis d'effectuer le traitement de données sur plusieurs échantillons et d'examiner la sensibilité de typologies obtenues à la composition de l'échantillon. L'effectif de l'échantillon est finalement de 304 répondants :

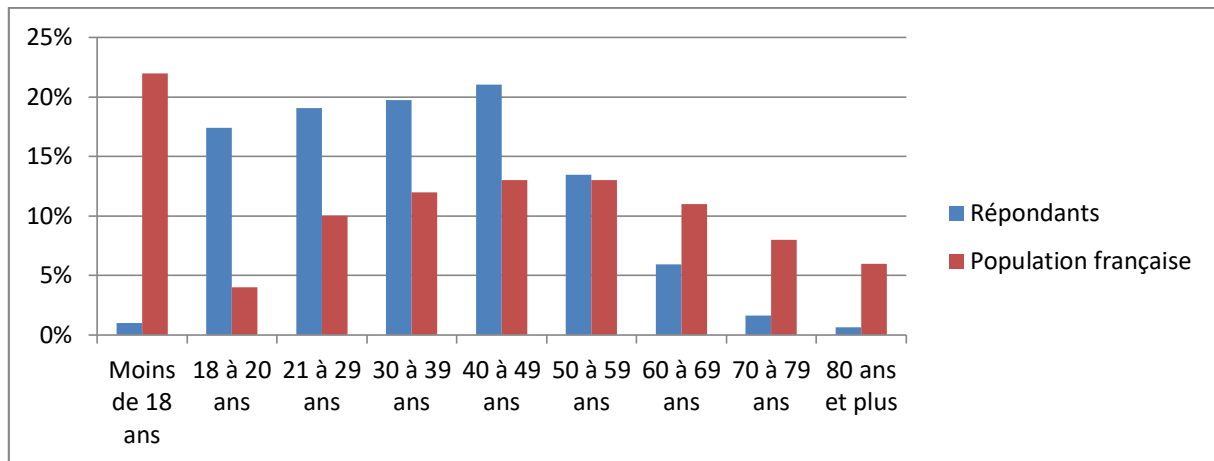


Figure 14 : Répartition des répondants et de la population française par âge après échantillonnage [111].

Pour conclure, l'échantillon de population sondée que nous allons utiliser dans la suite de ces travaux a un effectif total de 304 personnes et est composé de 73 % de femmes et de 27 % d'hommes. L'échantillon a été rapproché de la population en termes d'âge, mais toujours avec une surreprésentation des 19-49 ans et une sous-représentation des 60 ans et plus.

Cet échantillon constitue la population de laquelle nous allons extraire des typologies de consommateur suivant les trois axes du questionnaire qui leur a été soumis. Dans les parties suivantes, nous allons décrire comment nous avons défini les typologies et quels sont les liens qui existent entre elles.

II.5 Définition des typologies de consommateurs

II.5.1 Classification et formation des typologies

Élaborer une typologie consiste à distinguer au sein d'un ensemble d'unités (individus, groupes d'individus, phénomènes sociaux, etc.) des groupes que l'on peut considérer comme homogènes sur certains critères. Dans notre cas nous cherchons à élaborer des typologies d'attitudes et de comportements chez les consommateurs selon les 3 axes de notre sondage : Environnement, Achat, Entretien.

Nous avons réalisé une classification ascendante hiérarchique selon la distance de Ward comme indiqué en section II.3.2.4 pour chaque axe. Nous avons ensuite examiné l'influence de chacun des attributs dans la classification en évaluant le rapport de gain d'information de la classification. Cet indice, couramment utilisé pour la sélection d'attributs [118], permet d'écarter les attributs qui n'ont pas d'influence significative sur la construction des classes. La classification finale est obtenue uniquement avec les attributs sélectionnés par cet indice.

Ces opérations ont été réalisées avec l'aide du logiciel libre d'analyse et de visualisation de données appelé Orange. Nous avons choisi ce logiciel pour son ergonomie et sa facilité d'accès. Les sous parties ci-après détaillent ce processus et les typologies de consommateurs qui résultent de ces classifications.

II.5.2 Extractions des différentes typologies de consommateurs

II.5.2.1 Typologie Environnementale

Dans cette sous-partie nous souhaitons faire émerger une typologie qui décrit les profils environnementaux typiques des consommateurs. Pour cela nous considérons les items du questionnaire associés à l'attitude et au comportement environnemental des consommateurs (cf section 2.2.2) pour former les attributs à considérer dans la classification :

- **Sensibilité Environnementale** : les 4 premiers items de la section Environnement du questionnaire ont pour but de qualifier la sensibilité environnementale du répondant. Chacun de ses items est une affirmation telle que « J'ai tendance à acheter des produits respectueux pour l'environnement » avec laquelle le répondant autoévalue son accord selon une échelle de Likert entre 1 et 5 (de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord ».) Nous définissons l'attribut Sensibilité Environnementale comme la moyenne des notes attribuées à chacune de ses affirmations. Une sensibilité environnementale basse indiquera un consommateur peu concerné par les problématiques environnementales, alors qu'une sensibilité environnementale proche de 5 indique que le répondant se sent très concerné par les enjeux environnementaux.
- **Action Environnementale** : le dernier item qui compose la section Environnement du questionnaire qualifie l'action du consommateur. Cet item permet de juger si la sensibilité environnementale du consommateur s'incarne dans un plus grand nombre d'actions environnementales. Le répondant devra cocher parmi une liste d'actions environnementales positives celles qu'il a entreprises au cours des 6 derniers mois. Nous définissons l'attribut Action Environnementale comme le nombre des actions environnementales entreprises par le répondant au cours des 6 derniers mois.

Nous utilisons ces deux attributs pour effectuer la classification hiérarchique et identifier les différentes classes de notre Typologie Environnement. Nous obtenons le dendrogramme suivant :

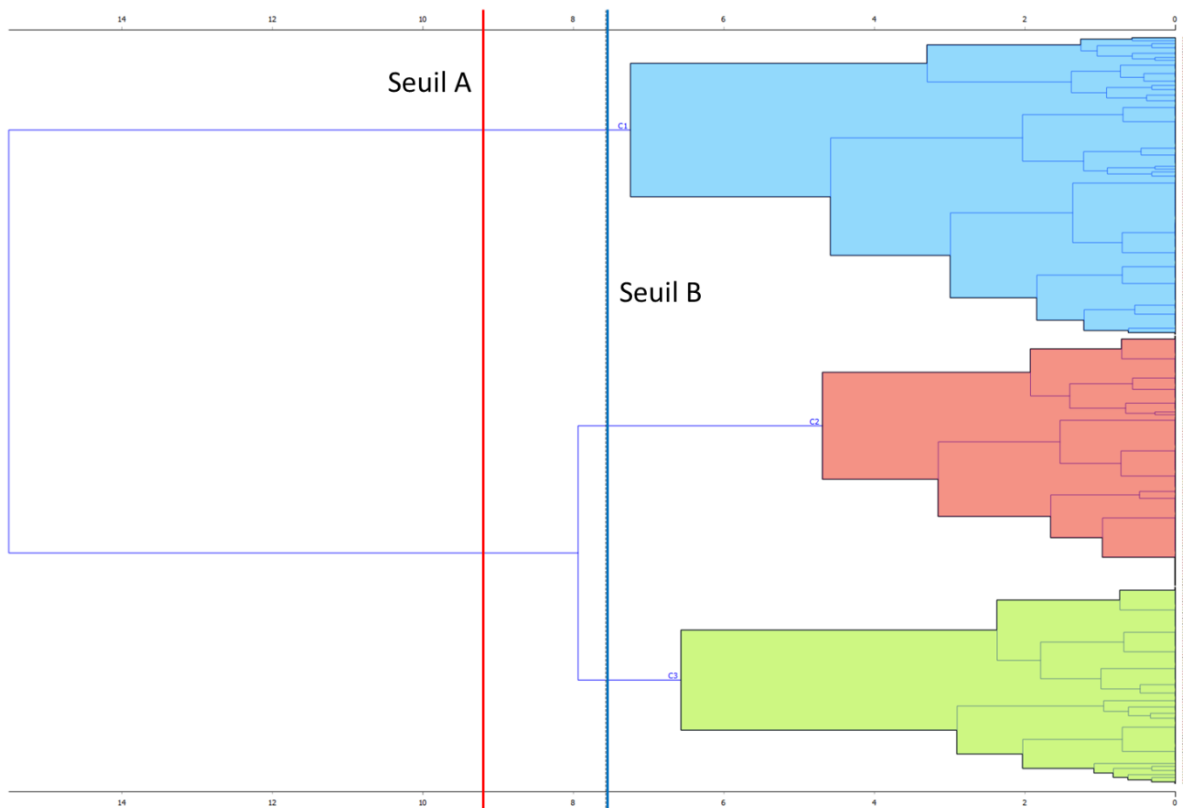


Figure 15 : Dendrogramme de la classification hiérarchique pour la typologie Environnement.

Sur un dendrogramme, les individus représentent les feuilles de l'arbre (à l'extrémité droite) reliées entre elles par des branches et des nœuds. Un nœud représente l'agrégation de deux groupes (ou individus) et la longueur des branches représente la perte d'inertie interclasse générée par l'agrégation des deux groupes. Ainsi il est considéré que le nombre optimal de classes est obtenu en coupant le dendrogramme au niveau des branches les plus longues (afin d'éviter une grande perte d'inertie interclasse).

En suivant la logique de l'analyse de données nous devrions choisir le seuil A obtenant ainsi deux classes bien distinctes : une classe C1 (en bleu) et une classe regroupant C2 (en rouge) et C3 (en vert). Compte tenu de notre connaissance du consommateur et notamment notre connaissance du phénomène de fossé entre l'attitude et l'action (*value action gap*) évoquée précédemment aux sections II.1.3 et II.1.5 nous choisissons un seuil différent, le seuil B. Ce seuil nous permet d'illustrer la présence du *value action gap* chez les consommateurs sondés, en effet les classes C2 et C3 sont proches parce qu'elles représentent des consommateurs similaires sur la donnée attitudinale (l'attribut Sensibilité Environnementale) mais différents sur la donnée comportementale (l'attribut Action Environnementale). Cette coupure nous permet d'obtenir les trois classes de consommateurs suivantes : Insensibles (C1), Eveillés (C2) et Hypersensibles (C3).

Les figures ci-après détaillent la répartition de l'effectif de chaque classe en fonction des attributs environnementaux. Le premier graphique (Figure 16) est une représentation en deux dimensions de la classification obtenue. Nous avons séparé les points en amas afin de visualiser l'effectif de répondants pour chaque des coordonnées. Les graphiques suivants détaillent numériquement la répartition des individus au sein des classes en fonction de la valeur qui leur est associé pour chaque attribut : sensibilité environnementale (Figure 17) et Action environnementale (Figure 18).

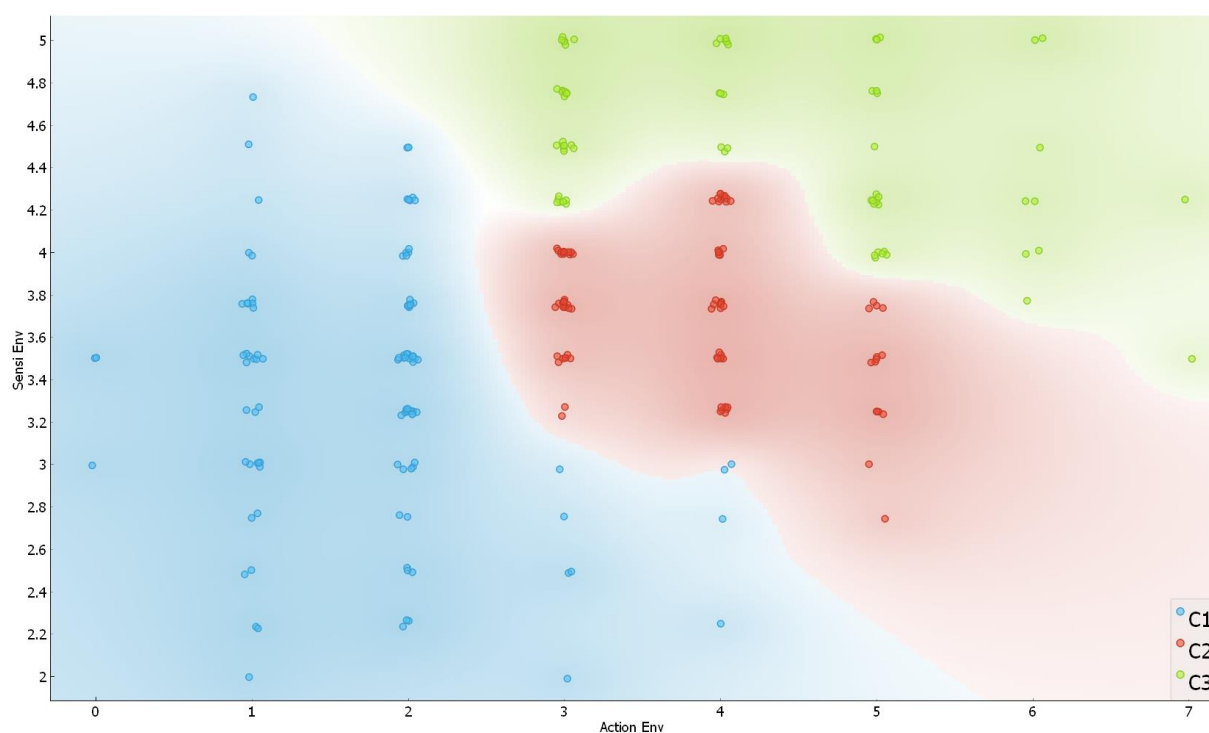


Figure 16 : Répartition des répondants selon les attributs Sensibilité Environnementale et Action Environnementale et leur classe d'appartenance

À partir des Figure 17 et Figure 18, nous pouvons déduire les typologies suivantes :

- **Insensibles** (C1 en bleu) : les répondants déclarent une faible sensibilité aux questions environnementales (environ 3 sur 5) et entreprennent peu d'actions « vertueuses » (environ 2 ou moins sur 5.)
- **Éveillés** (C2 en rouge) : les répondants déclarent une forte sensibilité aux questions environnementales (environ 4,5 sur 5) et un nombre moyen d'actions « vertueuses » réalisées régulièrement (entre 4 et 5.)
- **Hypersensibles** (C3 en vert) : les répondants qui déclarent une sensibilité forte (environ 4,5 sur 5) et un nombre important d'actions « vertueuses » réalisées régulièrement (6 ou plus.)

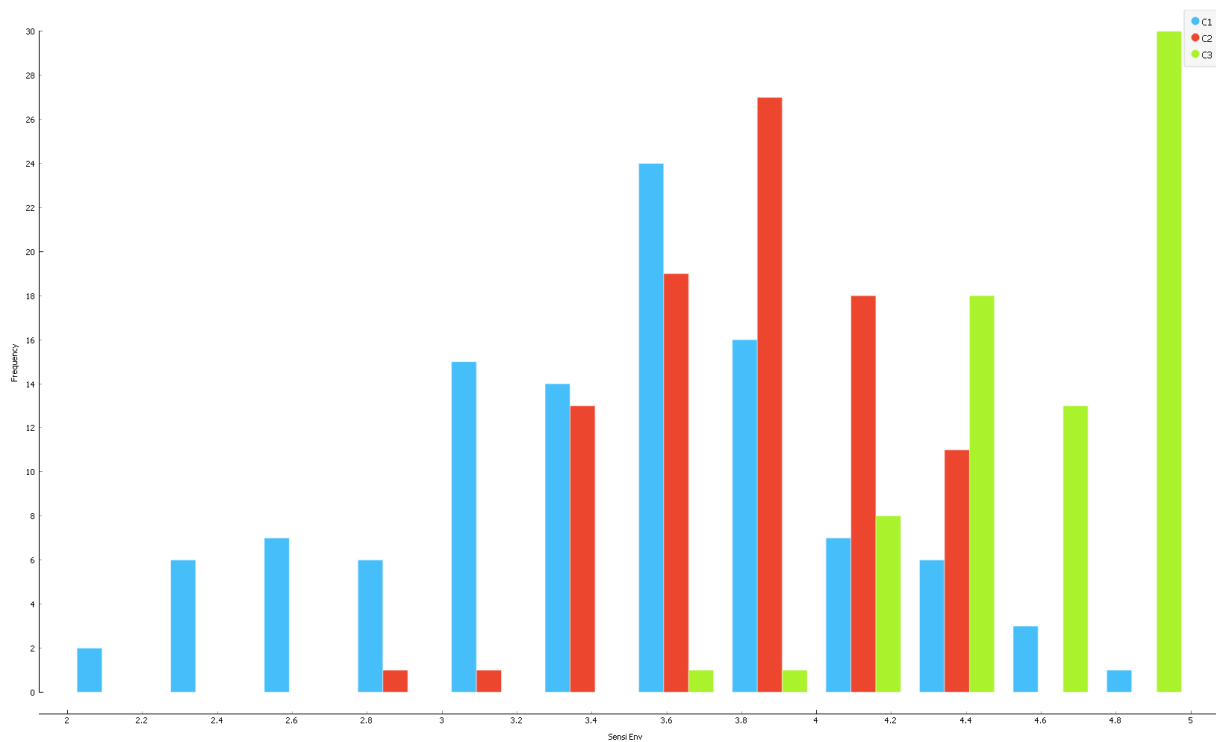


Figure 17 : Répartition de l'effectif des classes environnementales de consommateurs en fonction de leur sensibilité environnementale.

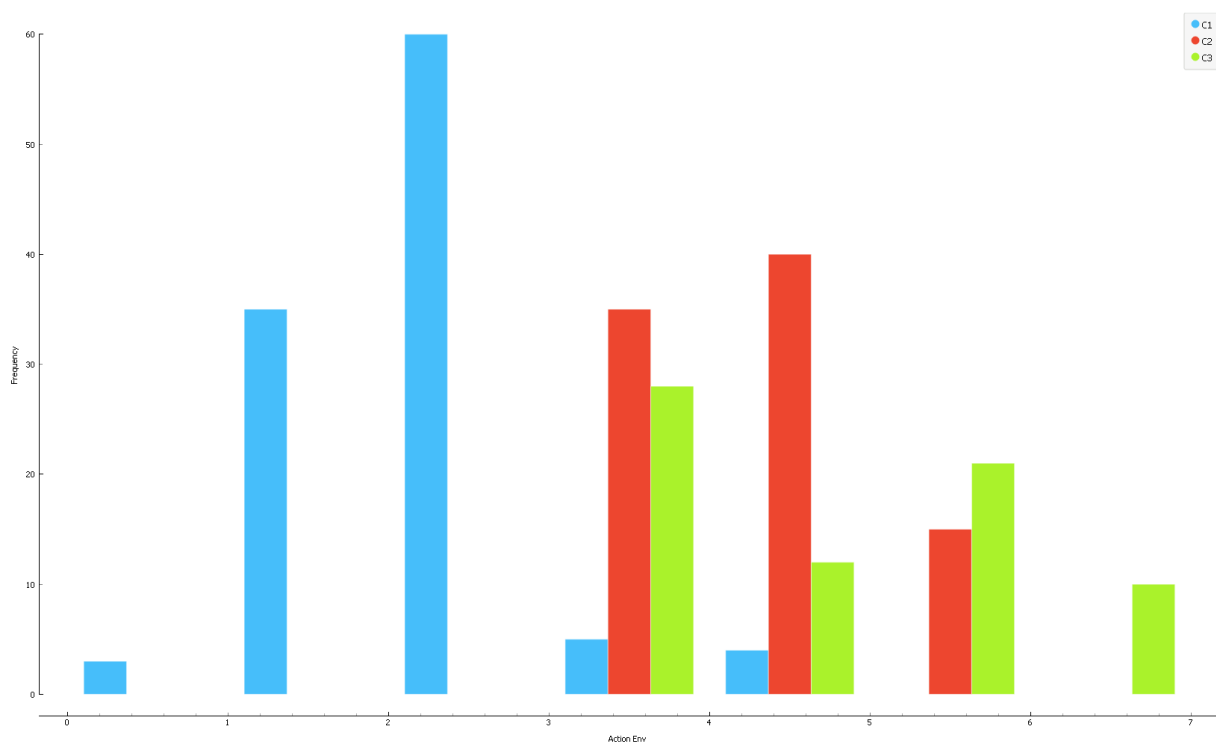


Figure 18 : Répartition de l'effectif des classes environnementales en fonction du nombre d'actions environnementales positives effectuée au cours des 6 derniers mois.

On peut noter que même dans le groupe « Insensibles » la sensibilité environnementale rapportée est relativement élevée (3,2 en moyenne), cette surévaluation est sans doute une résultante de

l'importante communication sur les enjeux environnementaux depuis quelques années ainsi que le crédit moral associé à la conscience environnementale. Ce groupe réunit 3 catégories de consommateurs :

- Les consommateurs avec à la fois une sensibilité faible et un petit nombre d'actions environnementales
- Les consommateurs avec une forte sensibilité environnementale mais un très faible nombre d'action pour l'environnement
- Les consommateurs avec une faible sensibilité mais un nombre d'action environnementale élevé

Ces deux derniers groupes illustrent deux phénomènes, premièrement, la sensibilité environnementale est valorisée socialement, il est donc probable qu'un certain nombre de consommateurs se surévalue sur ce critère. Deuxièmement, parmi les actions environnementales proposées, une partie de celles-ci pourraient être le résultat de motivations économiques ou sociales.

La typologie obtenue est cohérente avec d'autres typologies de consommateurs responsables établies par la littérature, notamment dans les travaux de McDonald et al. [97], Koszewska et al. [106], Mcneill & Moore [10] ou encore Onel et al. [105] (voir également le

Tableau 2 section II.1.5). Le Tableau 6 ci-après montre la correspondance entre les typologies issues de la littérature et celle obtenue ici, ces correspondances ne sont évidemment pas parfaites puisque les attributs utilisés pour les obtenir ne sont pas identiques.

Tableau 6 : Correspondance entre les types de consommateurs obtenus ici et ceux de la littérature.

	Insensibles	Éveillés	Hypersensibles
McDonald et al. [97]	Selectors	Translators	Exceptors
Koszeuwska et al. [106]	Neutral minimalist Thrifty	Ecological conservative Fashionistas Slow fashionistas	Ecologically and socially sensitive
Mcneill & Moore [10]		Self Social Sacrificial	
Onel et al. [105]		Consommateur restreint et transitionnel	Consommateur Holistique

Nous analysons ensuite plus précisément les similitudes entre nos segments identifiés et ceux de la littérature :

- Insensibles :
 - Neutral Minimalist, Thrifty et Self sont les types de consommateurs le plus proches de notre consommateur Insensible, comme eux ils sont très peu sensibles aux questions environnementales. Cependant, ces typologies n'interrogent pas le consommateur sur les actions « vertueuses » qu'il entreprend.
- Éveillés :
 - Ecological Conservative, Fashionistas et Slow Fashionistas sont associés aux consommateurs Eveillés par une prise en compte des critères environnementaux et sociaux dans leur prise de décision. Cependant ces typologies ne questionnent pas d'autres actions « vertueuses » que la prise en compte de ces critères dans l'acte d'achat.
 - Translators, Selectors, Consommateurs Transitionnels et Consommateurs Restreints sont assimilés aux consommateurs Eveillés puisqu'ils décrivent des consommateurs avec une sensibilité à l'environnement importante sans pour autant manifester ce trait par des actions « vertueuses » de façon importante.

- Social et Sacrificial sont des cas un peu particuliers, nous les plaçons à mi-chemin entre un consommateur Eveillé et Hypersensible. En effet ils sont caractérisés par une forte sensibilité environnementale, mais rapportent percevoir des barrières à la manifestation de cette sensibilité en acte, notamment un conflit avec eux-mêmes dans leur désir d'être « à la mode ».
- Hypersensibles :
 - Exceptors et Consommateur Holistique, ces consommateurs sont associés aux hypersensibles puisqu'ils rapportent une considération environnementale dans de nombreux aspects et actions de leur vie. Pour ces consommateurs on peut parler d'un style de vie responsable.
 - Ecologically and socially sensitive, nous les associons aux hypersensibles. Bien que cette typologie ne questionne pas les actions autres que l'achat chez les consommateurs, ceux-ci manifestent une considération environnementale systématique dans leurs prises de décision lors d'un achat.

Les travaux issus de la littérature confortent les résultats obtenus par classification issus de nos données. Ceci constitue une première base pour qualifier le consommateur. Nous nous intéressons ensuite aux différentes typologies qualifiant les achats des consommateurs.

II.5.2.2 Typologie d'achat

Dans cette sous-partie nous souhaitons faire émerger une typologie qui décrit les profils d'achats typiques des consommateurs. Pour cela nous considérons les items du questionnaire associé aux pratiques d'achat des consommateurs (cf 2.2.3) :

- Fréquence d'achat (FreqAchat) : la fréquence à laquelle le répondant déclare acheter des vêtements en général.
- Budget annuel (BudgetAnnuel) : le budget annuel alloué par le répondant à l'achat de ses vêtements
- Canal d'achat (CanalAchat) : le canal d'achat privilégié par le répondant
- Nombre de vêtements achetés par année (NBVetAnnée) : le nombre de vêtements que le répondant considère acheter par an.
- Prix Unitaire : le prix unitaire des pulls généralement achetés par le répondant
- Prix Maximum : le prix maximum que le répondant déclare être prêt à payer pour un pull.

Nous commençons par réduire cette liste en supprimant les attributs Prix Maximum que nous jugeons redondant avec l'attribut Prix Unitaire et plus subjectif, et nous supprimons l'attribut Budget annuel

qui est redondants avec les attributs Prix Unitaire et NBVetAnnée. La classification hiérarchique des comportements d'achat des répondants à partir des attributs (FreqAchat, CanaAchat, NBVetAnnée, Prix Unitaire) donne le dendrogramme en Figure 19.

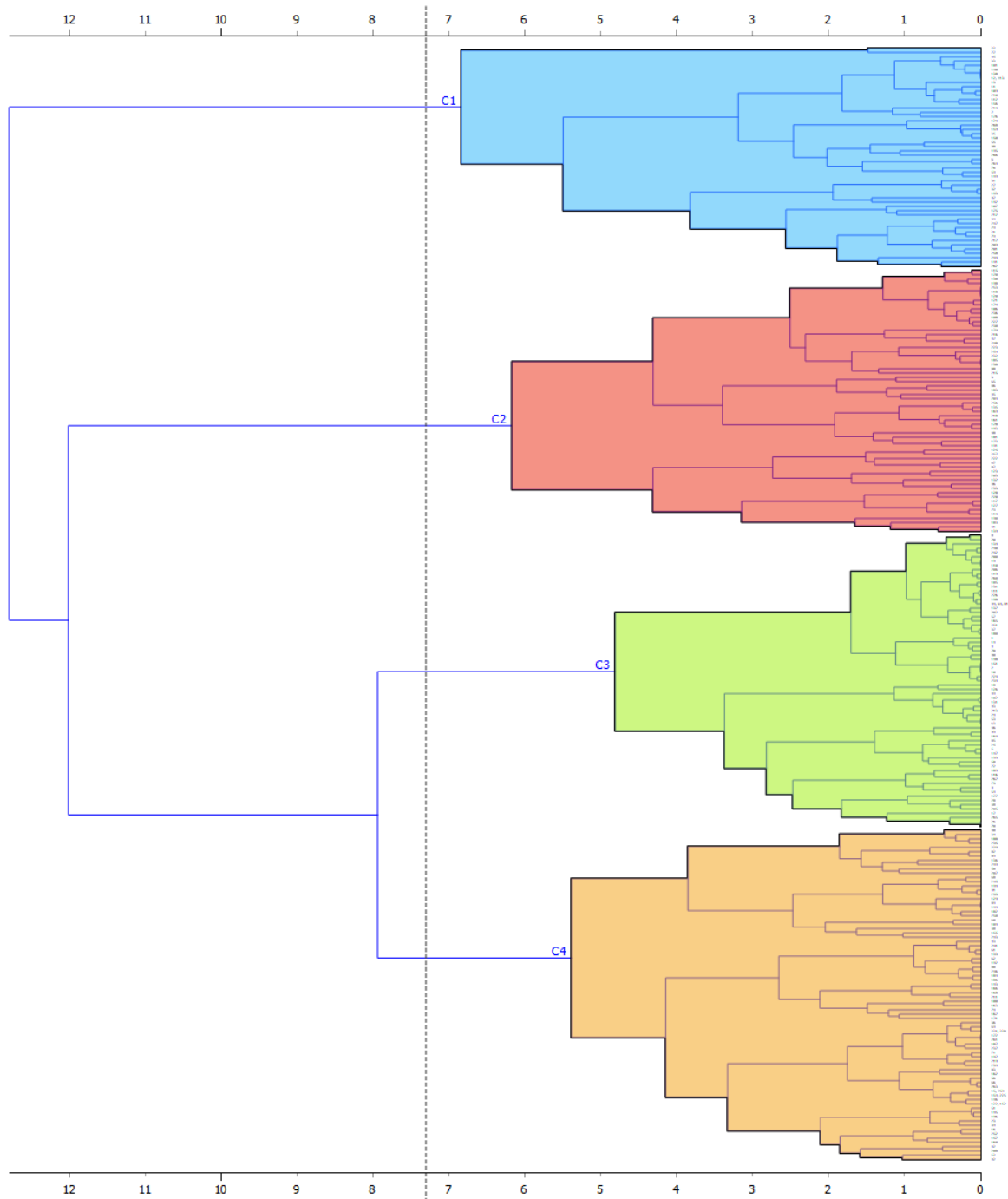


Figure 19 : Dendrogramme de la classification hiérarchique pour la typologie Achat.

Nous avons choisi le seuil de coupure du dendrogramme en fonction de la maximisation des distances interclasses et de nos connaissances issues des sciences humaines et sociales sur les comportements

des consommateurs. Ce choix nous permet d'identifier quatre classes de comportement principalement décrites par les attributs FréqAchat, NBVetAnnée et Prix Unitaire. L'attribut CanalAchat a un poids très faible dans la classification c'est pourquoi nous ne le considérerons pas (Figure 20)

	#	Gain ratio
C FreqAchat	6	0.452
N NBVetAnnée		0.250
N Prix Unitaire		0.243
C CanalAchat	8	0.025

Figure 20 : Rapport de gain d'information de chaque attribut de la typologie d'achat.

Les caractéristiques de ces quatre classes sont décrites par la répartition de leurs effectifs au sein de chaque attribut dans les Figure 21, Figure 22 et Figure 23. Les quatre classes identifiées sont les suivantes :

- Minimalistes (C4) : les répondants ayant une faible fréquence d'achat, un budget par article moyen et un faible nombre de vêtements achetés par an.
- Qualitatifs (C2) : les répondants ayant une fréquence d'achat relativement faible, un budget par article élevé et un faible nombre de vêtements achetés par an.
- Rationnels (C3) : les répondants ayant une fréquence d'achat moyenne, un budget par article relativement faible et un faible nombre de vêtements achetés par an.
- Impulsifs (C1) : les répondants ayant la plus grande fréquence d'achat, un budget par article faible et un nombre élevé de vêtements achetés par an.

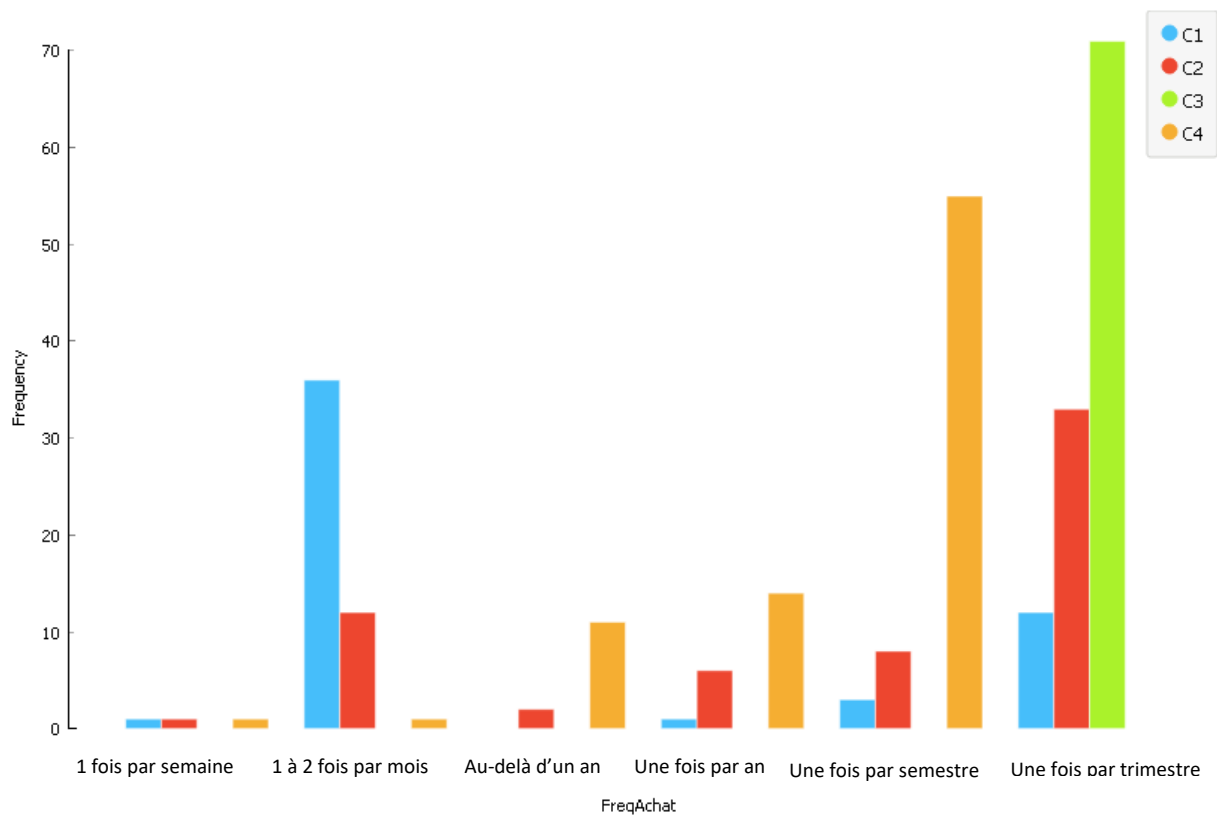


Figure 21 : Répartition de l'effectif de chaque classe en fonction de la fréquence d'achat.

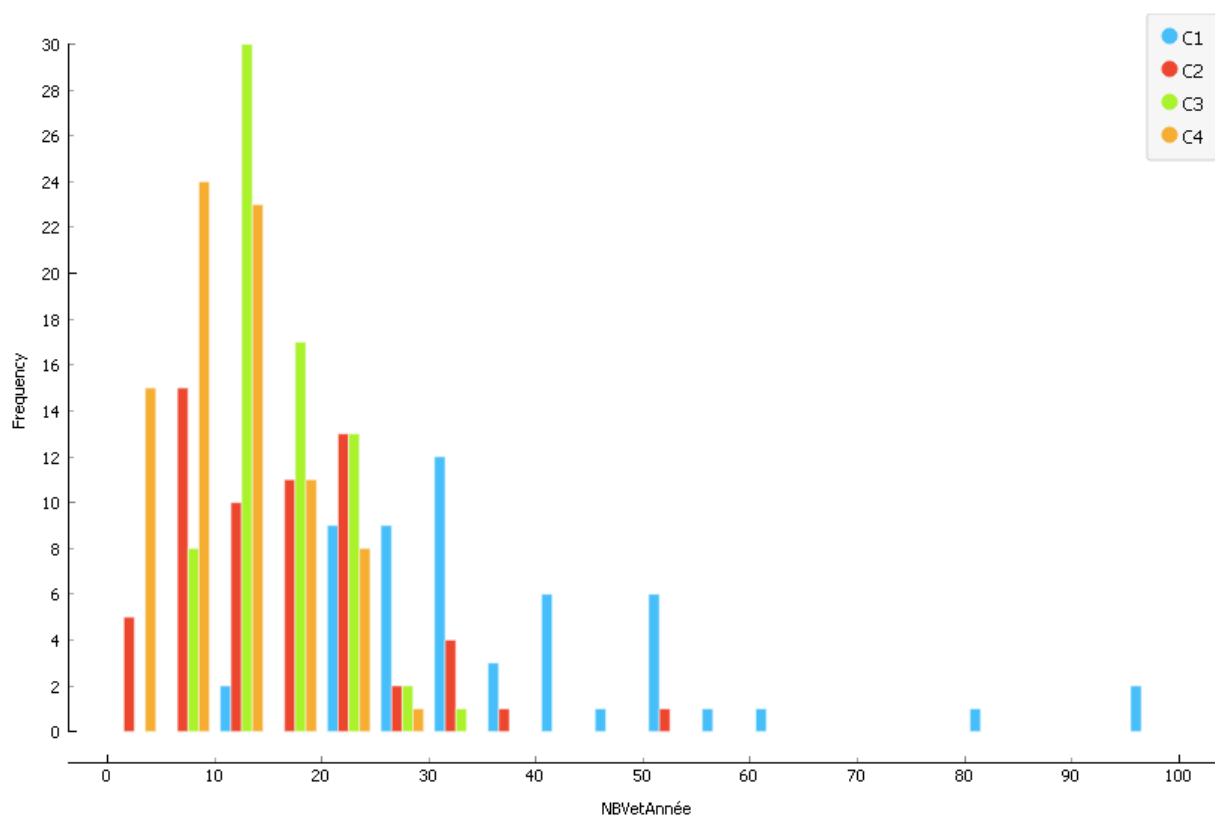


Figure 22 : Répartition de l'effectif de chaque classe en fonction du nombre de vêtements achetés par an.

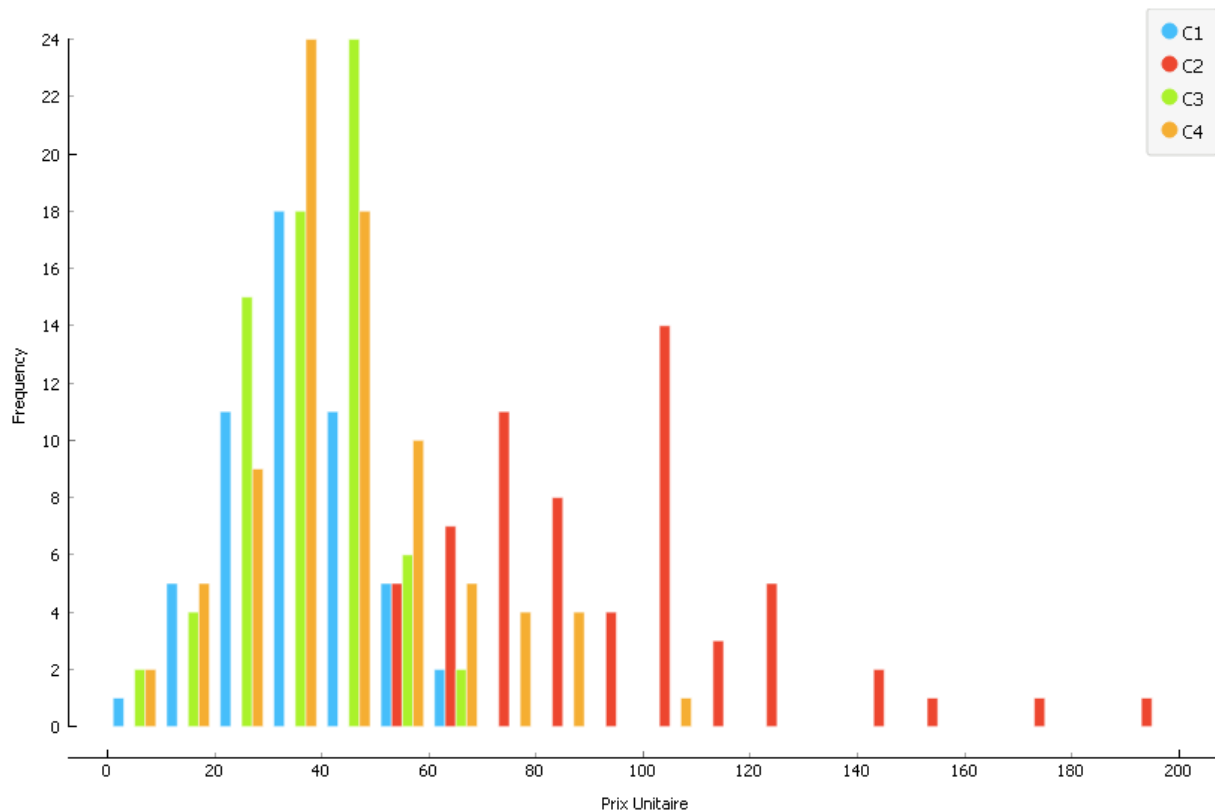


Figure 23 : Répartition de l'effectif de chaque classe en fonction du prix unitaire.

Ces classes représentent les différents comportements d'achat des consommateurs interrogés, nous avons jusqu'ici déterminé des profils de consommateurs typiques en fonction de leur sensibilité environnementale et de leurs pratiques d'achat. Ces deux premières typologies sont récurrentes dans la littérature, notamment chez Koszewska et al. [106] et chez Onel et al. [105].

II.5.2.3 Typologie d'entretien

Les attributs utilisés pour établir la typologie d'entretien sont plus hétérogènes que pour les deux typologies précédentes. On peut distinguer deux catégories : les attributs relatifs au lavage comme la température de lavage, la vitesse d'essorage sélectionnée, la méthode de séchage utilisée, le type de lessive utilisé, etc... et les attributs relatifs au soin du vêtement comme le tri du linge, le repassage, le suivi des étiquettes de lavage ou l'adaptation du programme de lavage en fonction du linge lavé. Les attributs utilisés pour une première classification ont été formalisés ainsi :

- **Tri Linge** : informe si le répondant tri son linge (Souvent ; De temps en temps ou Jamais) ;
- **Adaptation Lavage** : renseigne si le répondant estime adapter son entretien en fonction des types de vêtements : par exemple s'il adapte le programme de lavage ou la vitesse d'essorage, etc. (Oui ; Non) ;

- Conseil Etiquette : informe si le répondant considère suivre les conseils d'entretien mentionnés sur les étiquettes de ses vêtements (Souvent ; De temps en temps ou Jamais) ;
- Programme Principal : le programme de lavage le plus régulièrement utilisé par le répondant. (Coton ; Synthétique ; Laine ; Délicat ; Cycle court) ;
- Programme Secondaire : Le second programme le plus utilisé par le répondant. (Coton ; Synthétique ; Laine ; Délicat ; Cycle court) ;
- Repassage : renseigne si le répondant repasse ses vêtements. (Oui ; Non) ;
- Séchage : renseigne la méthode de séchage utilisée par le répondant (Suspendu ; À plat ; En sèche-linge) ;
- Essorage : informe de la fourchette de vitesse d'essorage en tr/min généralement utilisée par le répondant (400 – 800 ; 800 – 1200 ; 1200 – 1600) ;
- Type Lessive : le type de lessive généralement utilisée par le répondant (Lessive classique ; Lessive spécifique ; Lessive faite maison).

La classification obtenue à partir de ces attributs forme 4 classes (Figure 24).

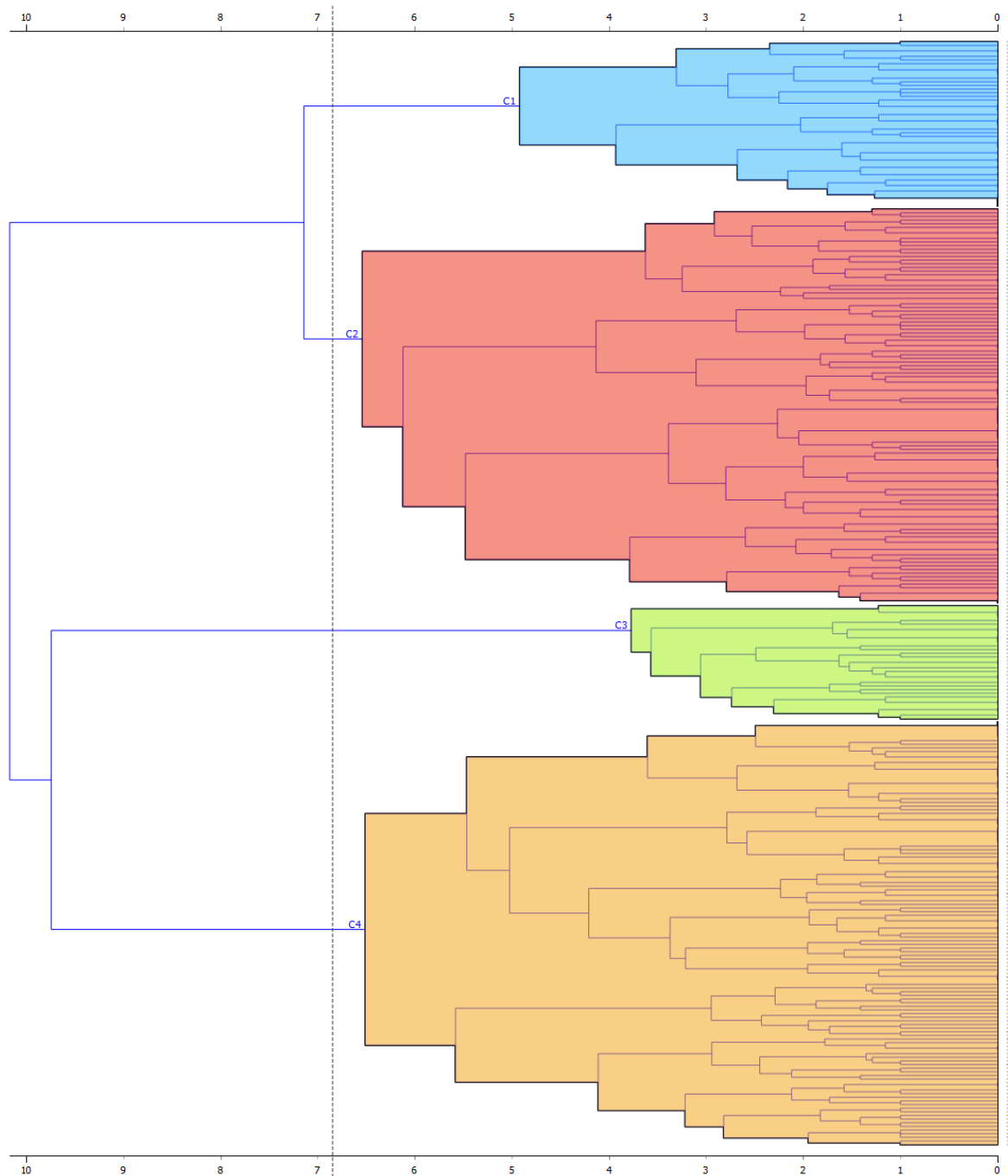


Figure 24 : Dendrogramme de la classification des profils d'entretien des consommateurs (ENT).

Lorsque nous avons analysé les profils des consommateurs de ces classes afin d'en qualifier la typologie nous avons remarqué qu'une de ces classes (C3) en particulier semblait représenter une typologie de consommateur bien définie, cependant cette classe regroupe simplement les consommateurs n'ayant pas répondu à certaines questions de la section entretien du questionnaire (Tableau 7). Il est difficile de faire émerger une typologie des trois autres classes obtenues, elles sont fortement similaires d'autant plus que nous ne considérons aucune relation d'ordre entre les attributs. Ainsi il s'avère

difficile pour nous de catégoriser ces classes et d'en définir les attributs principaux : est-ce le tri du linge ? l'utilisation régulière d'un programme de lavage plus doux ? ou l'utilisation d'une faible vitesse d'essorage ?

Tableau 7 : Caractéristiques des centres de classes obtenus selon chaque attribut de classification.

	Tri Linge	Adaptation Lavage	Conseil Etiquette	Programme principal	Programme secondaire	Repassage	Séchage	Essorage	Type lessive
C1	à chaque fois	OUI	à chaque fois	Coton	Laine	OUI	Suspendu	400 - 800	Lessive Maison
C2	à chaque fois	OUI	à chaque fois	Coton	Laine	NON	Suspendu	800 - 1200	Lessive Maison
C3	à chaque fois	OUI	De temps en temps	N/A	N/A	N/A	Suspendu	400 - 800	Lessive Maison
C4	De temps en temps	OUI	De temps en temps	Laine	Coton	NON	Suspendu	400 - 800	Lessive Maison

Les attributs utilisés pour cette classification sont issus d'une agrégation de plusieurs items du sondage, par exemple les attributs relatifs aux programmes de lavage sont une agrégation de 5 items questionnant la fréquence d'utilisation des programmes de lavage les plus typiques. Nous avons choisi ces agrégations pour éviter de faire une classification sur un trop grand nombre d'attributs dont certains étaient très similaires.

Dans la suite de ces travaux, nous avons choisi de ne plus considérer les attributs relatifs au lavage tels que les programmes de lavage. En effet ces paramètres peuvent dépendre de facteurs culturels, sociaux et géographiques indépendant des relations que nous cherchons à identifier ici [76], [119], [120]. C'est pourquoi nous les retirons de la classification et nous utiliserons ces données pour modéliser les phases d'utilisation dans l'ACV dans le Chapitre 4.

Nous avons réitéré la classification des consommateurs à partir des attributs restants : Séchage, Tri Linge, Adaptation Lavage, Repassage et Conseil Etiquette. De cette liste réduite nous avons supprimé l'attribut Tri Linge que nous jugeons redondant avec l'attribut Adaptation Lavage.

Nous écartons l'attribut Séchage qui n'est pas assez discriminant (Figure 25). La liste d'attributs réduite pour la seconde itération de classification est la suivante : Adaptation Lavage, Repassage et Conseil Etiquette et la classification produit le dendrogramme en Figure 26.

	#	Gain ratio
C Conseil Etiquette	4	0.504
C Repassage ?	3	0.399
C Adaptat... Lavage	3	0.263
C Séchage	4	0.057

Figure 25 : Rapport de gain d'information de chaque attribut de la typologie d'entretien.

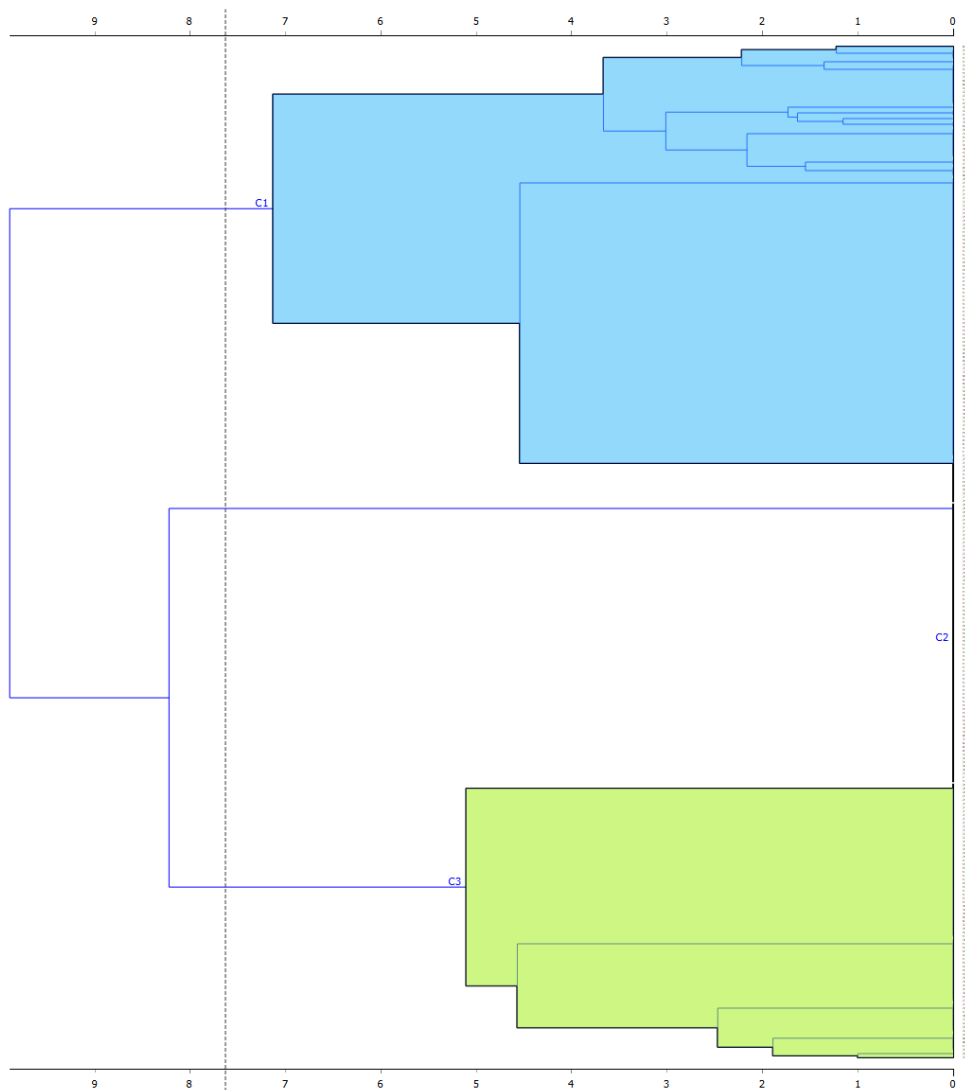


Figure 26 : Dendrogramme de la classification Entretien (ENT).

Cette nouvelle classification produit trois classes dont la répartition des effectifs de chaque classe (C1 en bleu, C2 en rouge et C3 en vert) par rapport à chaque attribut (Repassage, Adaptation du lavage et suivi des Conseils des étiquettes d'entretien) est détaillée dans les Figure 27, Figure 28 et Figure 29.

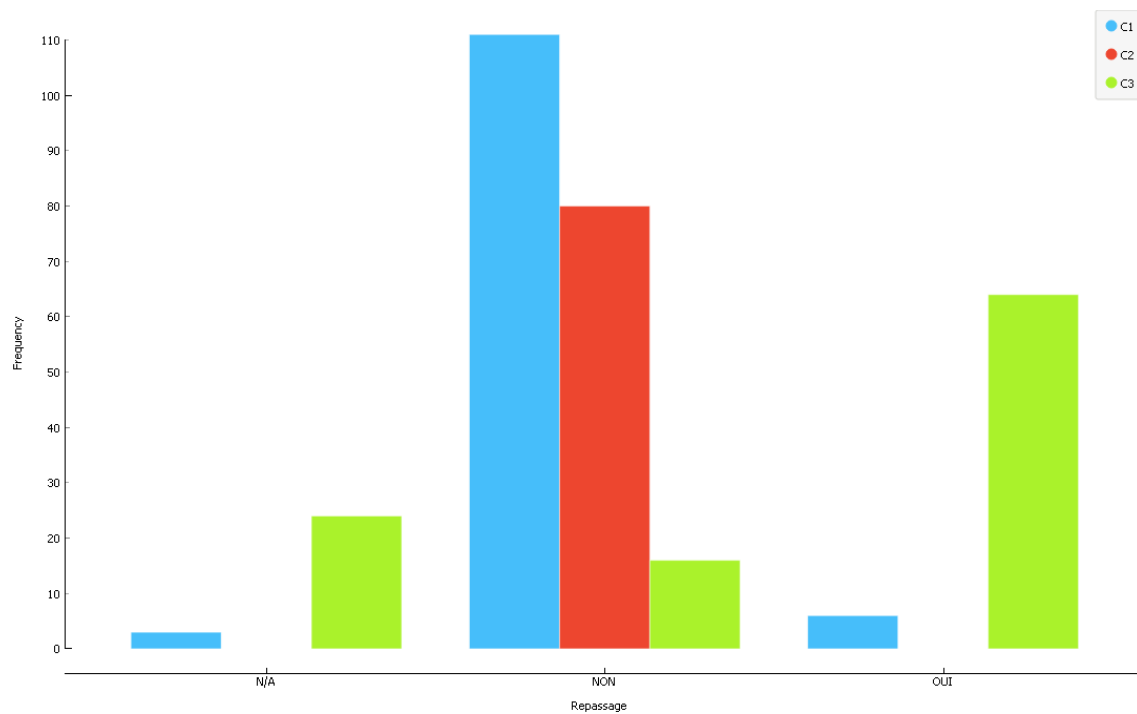


Figure 27 : Répartition des effectifs des classes d'entretien en fonction de l'attribut Repassage.

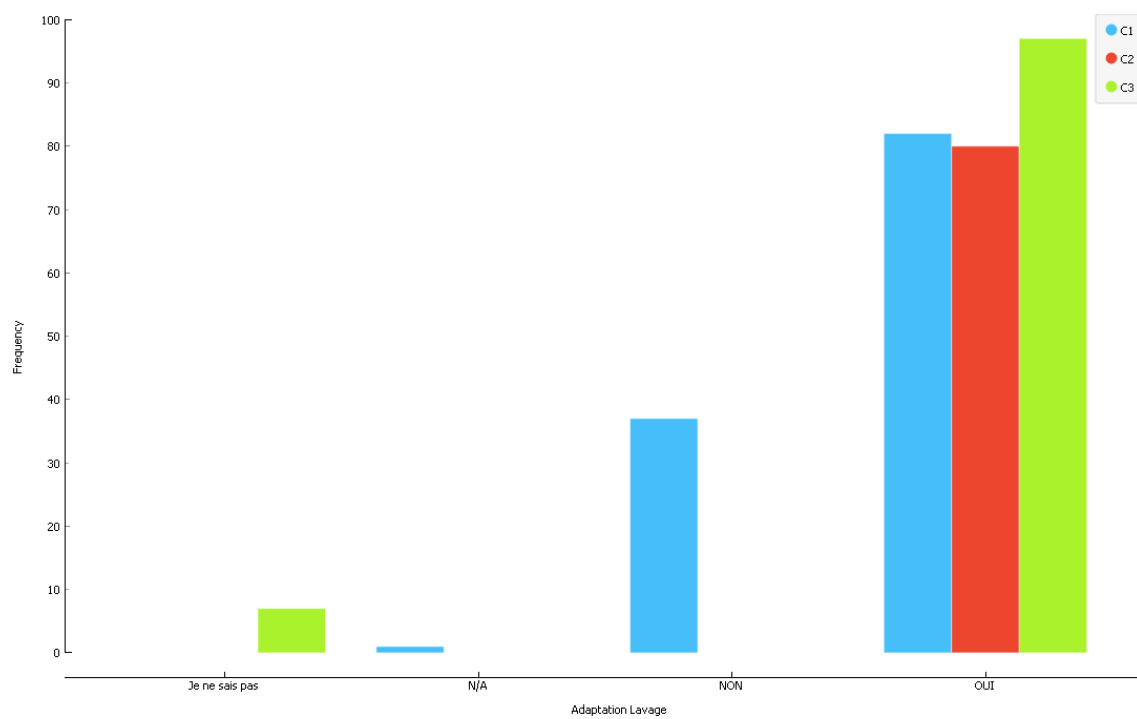


Figure 28 : Répartition des effectifs des classes d'entretien en fonction de l'attribut Adaptation Lavage.

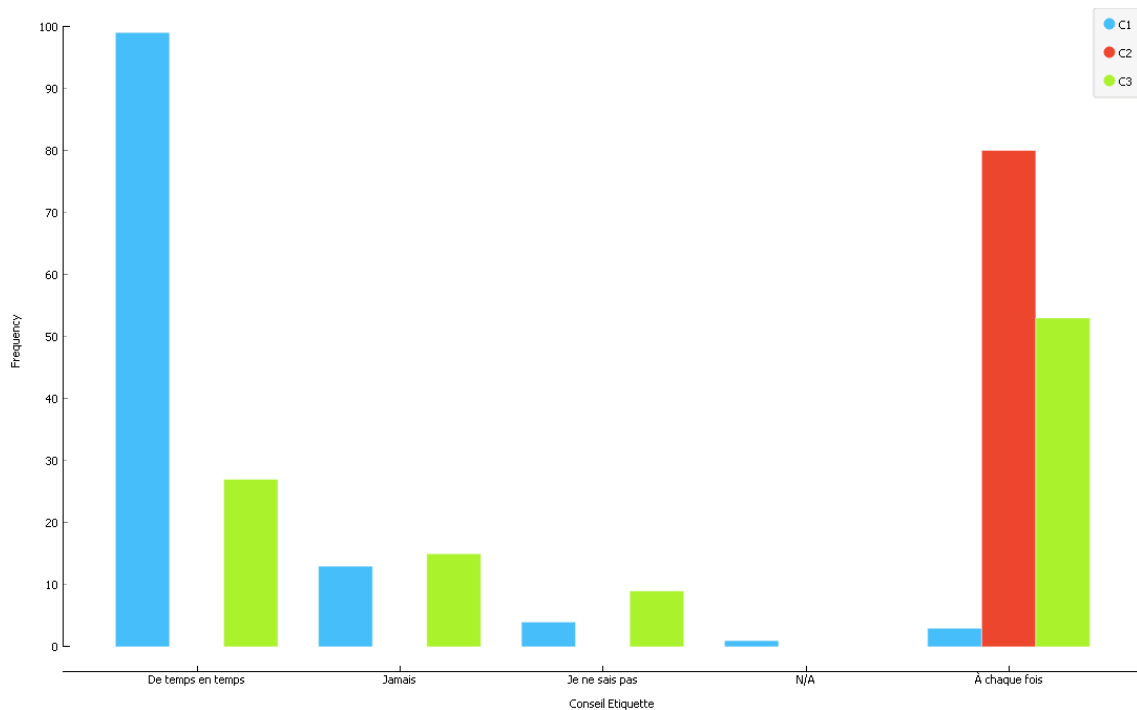


Figure 29 : Répartition des effectifs des classes d'entretien en fonction de l'attribut Conseil Etiquette.

L'objectif avec ces attributs est de représenter le degré d'investissement du consommateur dans l'entretien de ces vêtements. Nous émettons l'hypothèse que le consommateur qui repasse est plus concerné par ses vêtements puisqu'il s'impose une étape de manutention supplémentaire lors de l'entretien de ses vêtements. De même, le consommateur qui émet une plus grande tendance à prendre en compte les conseils d'entretien des étiquettes de ces vêtements est jugé plus investi que les autres. Les résultats de cette classification nous permettent d'extraire la typologie suivante :

- Soigneux (C3) : Les consommateurs qui repassent leurs vêtements, suivent systématiquement les consignes d'entretien de leurs vêtements et adapte le lavage en fonction des vêtements ;
- Conscientieux (C2) : Les consommateurs qui émettent suivre à chaque fois les consignes d'entretien mentionnées sur les étiquettes de leurs vêtements et adaptent le lavage en fonction des vêtements et ne repassent pas. Il s'agit de la seule classe dont tous les individus ont les mêmes valeurs quel que soit l'attribut considéré, ce qui explique la forme particulière observée sur le dendrogramme en Figure 26 ;
- Routiniers (C1) : Les consommateurs qui ne consultent les consignes d'entretien de leurs vêtements qu'occasionnellement et qui n'adaptent pas forcément le lavage en fonction des vêtements.

Cette typologie nous permet de qualifier le consommateur en fonction du degré de soin qu'il porte à ses vêtements. Lors de l'étude préliminaire des données, nous avons souhaité intégrer un attribut

important : la réparation du vêtement par le consommateur. Cependant la réparation est une pratique particulière qui n'est pas directement liée au soin du vêtement ou à son entretien, mais plutôt à sa maintenance. C'est pourquoi nous la traitons à part en examinant le taux de réparation dont font preuve les consommateurs des différentes typologies évoquées précédemment.

II.5.2.4 La réparation : une pratique singulière.

La réparation est une pratique très importante, car elle a une influence directe sur les impacts environnementaux des vêtements en prolongeant leurs durées de vie. La réparation est une pratique reconnue comme très vertueuse du point de vue environnemental notamment comme levier de l'économie circulaire [15]. C'est pourquoi un item du sondage était dédié à cet attribut. Cependant cet attribut était si discriminant qu'il masquait les contributions des autres attributs dans la classification. Nous avons donc choisi de considérer la réparation comme un élément de maintenance et un taux de réparation associé aux différentes typologies de consommateurs.

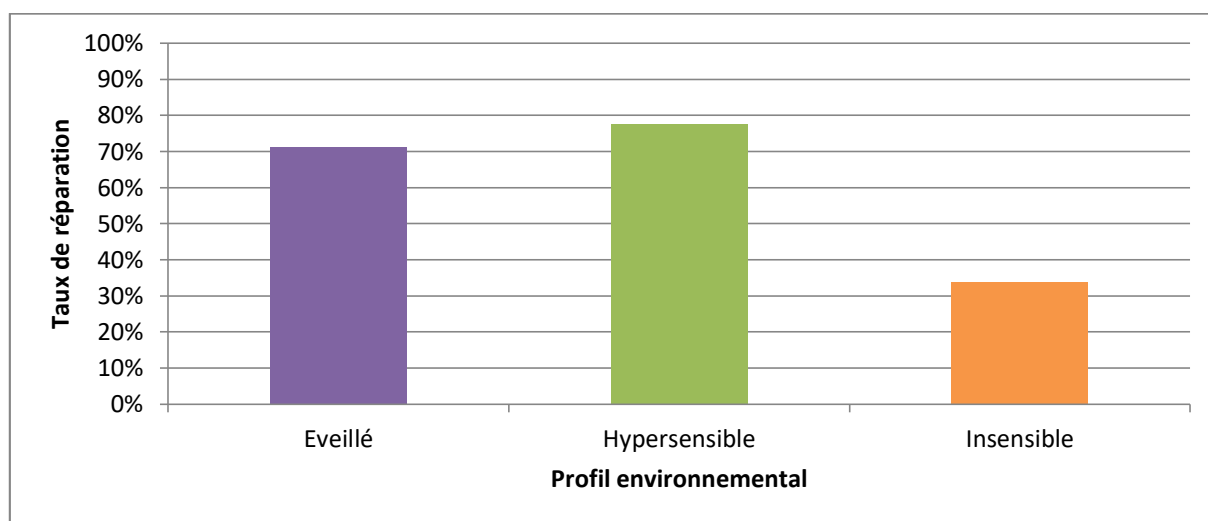


Figure 30 : Taux de réparation des différents profils environnementaux des consommateurs.

Le taux de réparation des « Insensibles » est plus de 2 fois inférieur à celui des autres classes. Ce résultat n'est pas inattendu, la réparation étant considérée comme un comportement pro-environnemental. Les modèles d'adoption de comportements pro-environnementaux dans la littérature font état de l'importance de paramètres similaires à la sensibilité environnementale chez les consommateurs adoptant ces comportements [96].

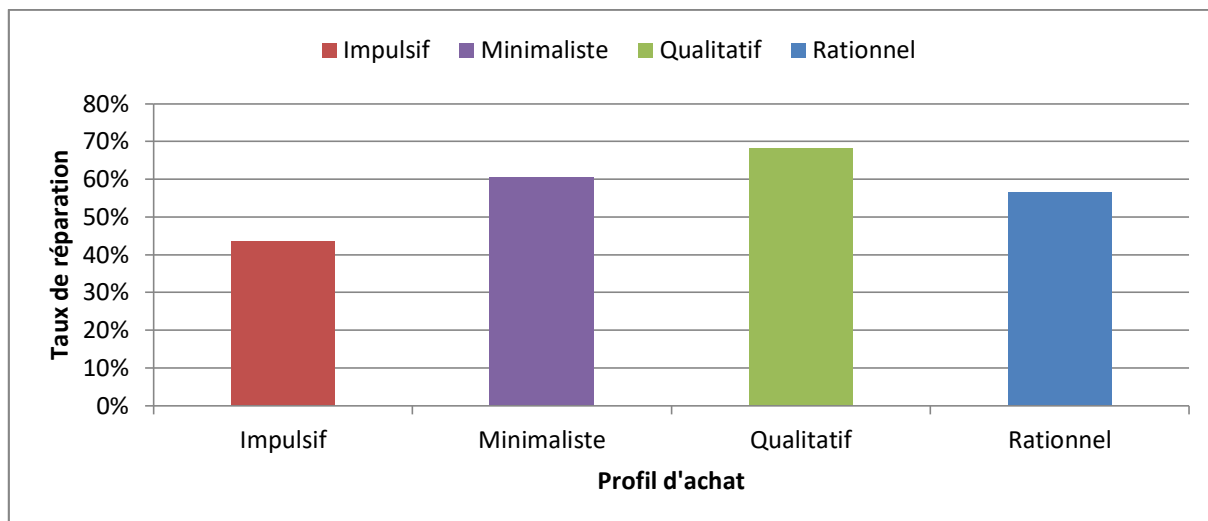


Figure 31 : Taux de réparation des différents profils d'achat des consommateurs.

Le taux de réparation examiné au prisme des comportements de consommation semble plus lié à la valeur que le vêtement revêt pour le consommateur, en supposant que la valeur perçue par le consommateur de son vêtement est plus faible pour un consommateur « Impulsif » et plus forte pour un consommateur « Qualitatif ».

Les typologies que nous venons d'évoquer décrivent chacune le consommateur en fonction d'axes précis : sa sensibilité environnementale, ses pratiques d'achats et le soin qu'il porte à ses vêtements. Si les différents profils identifiés sont intéressants en soi, il est d'autant plus intéressant d'analyser les éventuels liens entre les différentes typologies. En effet, nous souhaitons représenter le consommateur dans la diversité de ses attitudes et de ses pratiques et nous avons montré dans notre revue de littérature qu'il existait un certain lien relationnel entre l'attitude environnementale du consommateur et ses pratiques de consommations, notamment au travers du concept de consommateur responsable. Nous supposons que ce lien relationnel s'étend également entre nos typologies sensibilité environnementale, achat et usage. La mise en lumière de ce lien constitue le sujet de la partie qui suit.

II.6 Mise en relation des typologies de consommateur identifiées

Nous avons extrait trois typologies de consommateurs, une pour chaque axe du sondage. Elles formalisent les comportements typiques que l'on peut observer au sein de l'ensemble de données récoltées. Chaque répondant peut être qualifié selon un triplet qui caractérise son appartenance à chacune des typologies. Si à un triplet correspond une sous-catégorie de répondants alors il existe 36 sous-catégories de répondants. Afin de clarifier la suite de l'étude des typologies de consommateurs, nous allons réduire le nombre de sous-catégories en supprimant celles dont l'effectif

est inférieur à 1 % de l'effectif total des répondants. Cette opération réduit l'effectif de la population étudiée à 289 répondants dont voici la répartition :

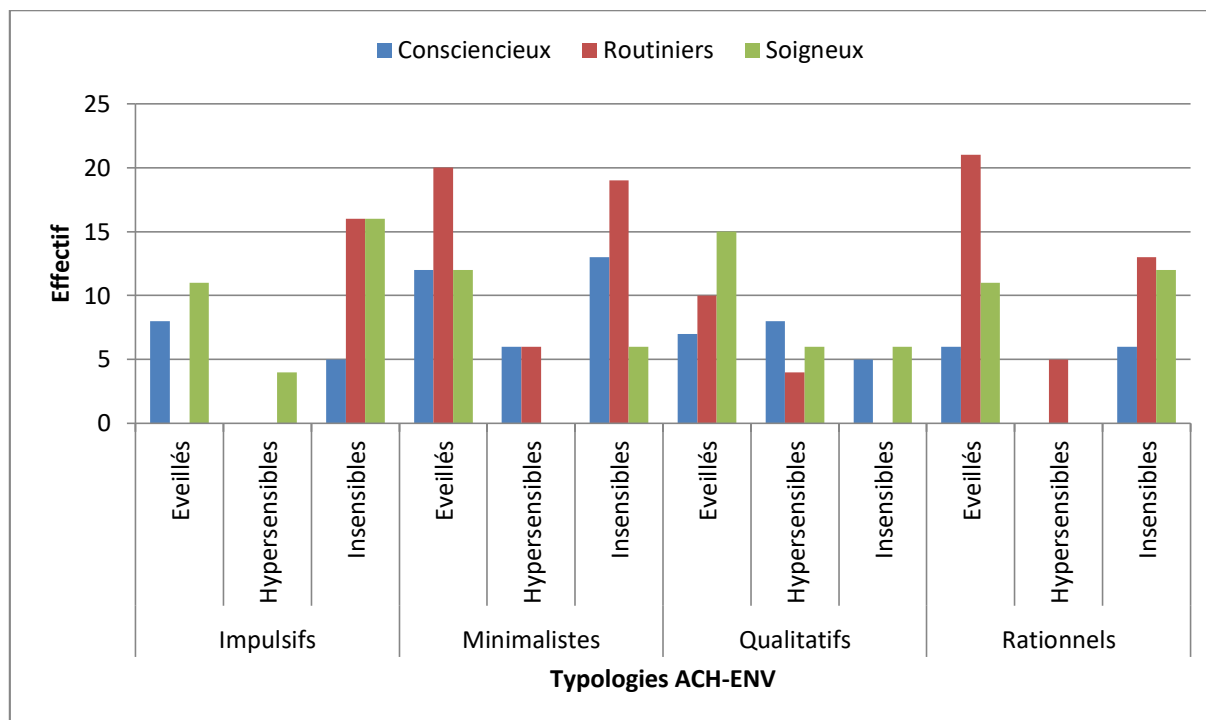


Figure 32 : Répartition des consommateurs au sein des typologies Environnement, Achat et Entretien.

II.6.1 Mise en relation profils Achat et Environnement

La première mise en relation à considérer est celle de la typologie environnementale avec la typologie de consommation. En effet, la littérature sur le consommateur responsable en sociologie et en marketing combine souvent ces deux aspects, on peut citer par exemple les typologies de Koszewska et al. [106] et de Onel et al. [105]. Dans ces typologies on retrouve respectivement une évaluation de l'importance que revêt le critère environnemental dans la décision d'achat [106] et une évaluation de la sensibilité aux problématiques environnementales associées à son influence sur les actions du consommateur, dont l'acte d'achat.

Dans notre cas, lorsqu'on croise les effectifs des typologies environnementales et de consommation on obtient la répartition suivante :

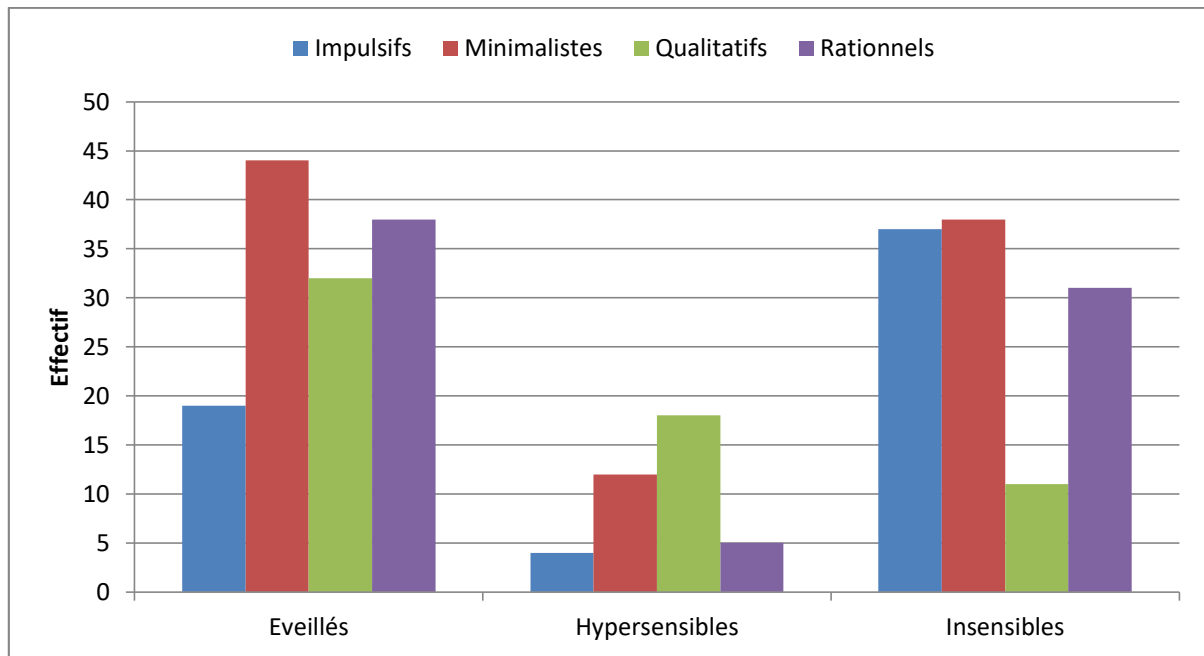


Figure 33 : Comparaison croisée des effectifs des typologies environnementale et d'achat.

Ce graphique met en valeur plusieurs tendances chez les consommateurs :

- Les Minimalistes et les Rationnels sont majoritairement répartis entre les catégories Eveillés et Insensibles (respectivement 47 % et 40 % pour les Minimalistes et 50 % et 42 % pour les Rationnels.) Ces profils sont marqués par une faible fréquence d'achat et un faible nombre de vêtements achetés par an. Cette faible consommation est généralement décrite comme une pratique responsable, mais force est de constater que celle-ci n'est pas toujours l'incarnation d'une sensibilité environnementale particulière. En effet, une partie conséquente des consommateurs ayant une faible consommation sont classés chez les Insensibles. Nous supposons qu'une des motivations propres à ce comportement est économique comme nous le rapportent certains consommateurs dans leurs entretiens.
- Les consommateurs Impulsifs sont majoritairement répartis entre les catégories Insensibles (~61 %) et Eveillés (~32 %). Ils ne représentent qu'environ 10 % des consommateurs Hypersensibles. Cette répartition semble indiquer une corrélation entre une forte consommation et une faible sensibilité environnementale.
- Les consommateurs Qualitatifs sont majoritairement répartis entre les catégories Eveillés (~55 %) et Hypersensibles (~28 %). Ces consommateurs représentent environ 46 % des consommateurs Hypersensibles. Cette répartition semble indiquée une corrélation entre le budget qu'il est prêt à allouer aux vêtements qu'il achète et la sensibilité environnementale du consommateur.

On remarque des tendances similaires lorsqu'on examine le taux de réparation des différents sous-groupes issu du croisement entre la typologie d'achat et la typologie environnementale (Figure 34). Les sous-groupes avec les taux de réparation les plus faibles sont les sous-groupes « Insensibles ». La réparation semble être une pratique dont les motivations sont partagées entre une motivation environnementale et une motivation économique. En effet, le plus fort taux de réparation est atteint par le sous-groupe « Minimaliste — Eveillé » marqué par une sensibilité environnementale forte et une considération économique importante.

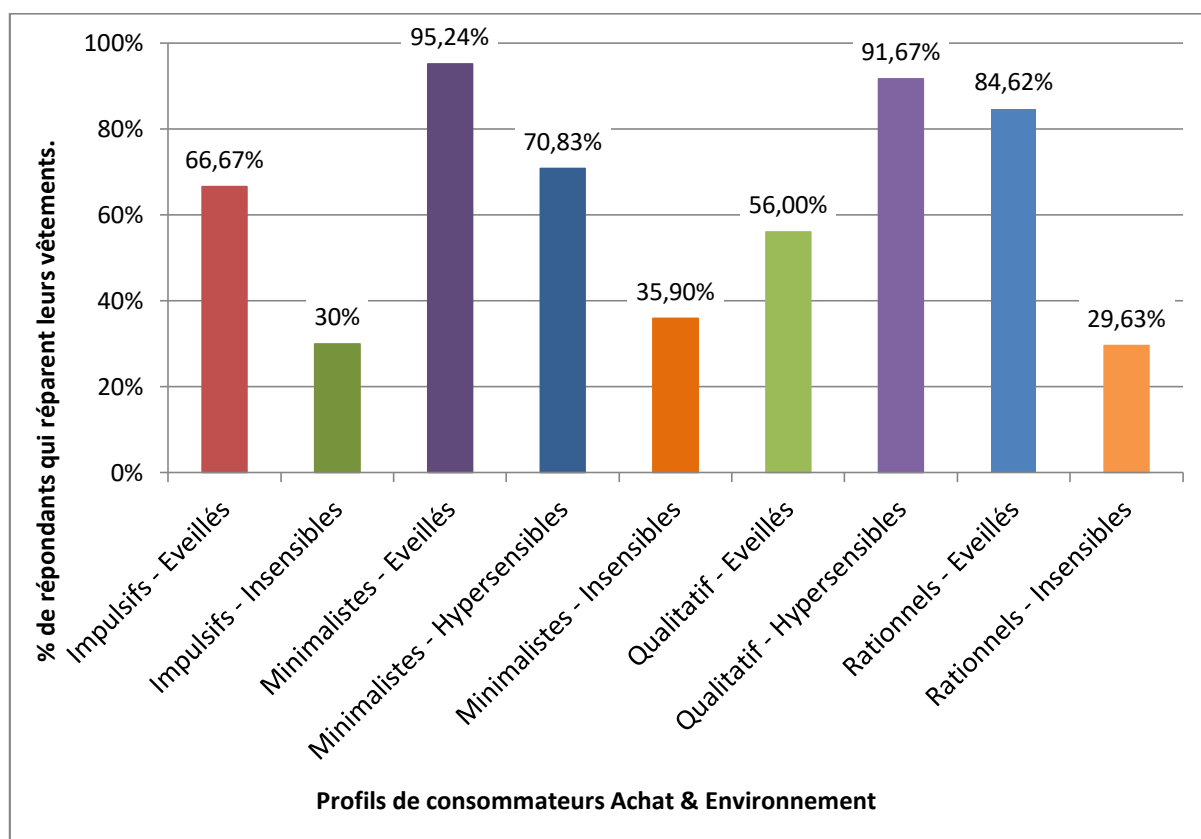


Figure 34 : Taux de réparations des différents sous-groupes achat/environnement de consommateurs

Pour conclure, on remarque que pour une frange de la population la sensibilité environnementale se traduit en effet par des pratiques de consommation différentes, mais que ces pratiques positives peuvent également résulter d'une motivation bien différente.

II.6.2 Mise en relation des profils Environnement et Entretien

Si la relation entre un profil environnemental et un profil d'achat est un sujet d'étude récurrent dans la littérature récente en sociologie et en marketing, comme on a pu le voir précédemment, il existe très peu d'études voir aucune qui étudie plus spécifiquement la relation entre le profil environnemental du consommateur et sa façon d'entretenir son linge. Notre hypothèse de départ est que le profil environnemental d'un consommateur influe sur ses pratiques d'entretien. D'autant plus

que d'après la littérature, l'entretien et l'usage constituent une phase particulièrement déterminante des impacts environnementaux du cycle de vie d'un vêtement [38] — [41].

Lorsqu'on croise les effectifs des classes d'entretien et des classes environnementales de consommateur on obtient le résultat suivant :

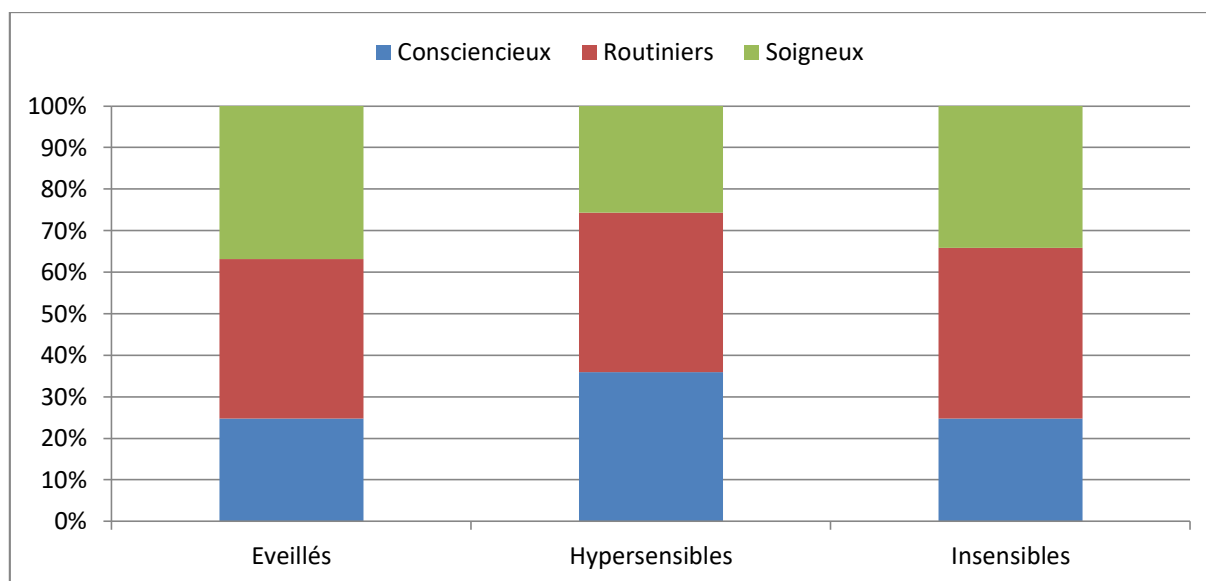


Figure 35 : Répartition croisée des effectifs des classes d'entretien et des classes environnementales des consommateurs.

Contrairement à l'hypothèse formulée initialement, il ne semble pas y avoir de lien significatif entre le profil environnemental d'un utilisateur et son profil d'entretien. Les différences de représentation des profils d'entretien au sein des profils environnementaux sont relativement faibles. Par exemple si on compare le pourcentage des répondants avec un profil d'entretien « Occasionnel » au sein des profils environnementaux on s'aperçoit que la variation d'un profil à l'autre est de l'ordre de 2 %. Concernant les deux autres profils d'entretien « Repassage » et « Conscientieux » cette différence est de l'ordre de 11 %.

Bien que notable, ces différences ne traduisent pas l'existence d'un lien significatif entre les deux typologies de consommateurs. Cependant la typologie d'entretien considérée ici a été construite dans la section II.5.2.3, en fonction d'attributs liés au soin du vêtement et pas liés au lavage.

Nous avons donc examiné la répartition du taux d'utilisation de chaque programme de lavage pour chaque profil environnemental (Figure 36). Les différences de taux d'utilisation sont là encore assez faibles entre les profils environnementaux. Le programme Coton est utilisé environ à 50 % pour tous les profils, de même que le programme Synthétique (20-25 %). La plus grande différence concerne la sous-utilisation du programme Laine chez les Insensibles (14 % contre 25 et 27 % chez les autres) au profit du programme Synthétique et du programme Cycle court.

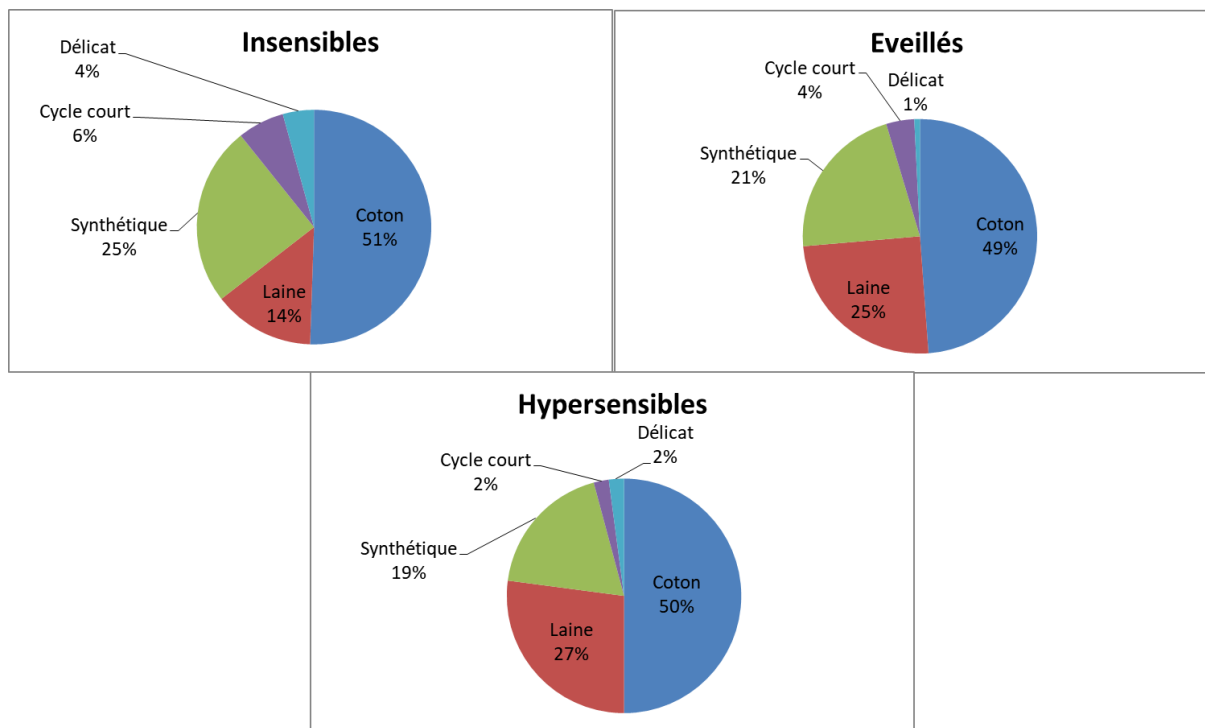


Figure 36 : Pourcentages d'utilisation des programmes de lavage au sein des profils environnementaux.

Il semble d'après ces résultats que bien qu'une forte conscience environnementale puisse avoir des effets sur le profil d'achat des consommateurs et soit un facteur de motivation aux actions positives pour l'environnement, elle a peu d'influence sur les pratiques d'entretien des consommateurs.

Pour approfondir ce lien entre sensibilité environnementale et pratiques d'entretien, comme nous l'avons souligné précédemment, nous avons conduit une série d'entretiens semi-directifs auprès de consommateurs afin d'étudier les différents liens existant chez eux entre les trois thématiques Achat, Environnement et Entretien. La section ci-après développe l'analyse de contenu de ces entretiens.

II.7 Analyse de contenu des entretiens semi-directifs

II.7.1 Mise en lumière d'un lien fort entre les achats et la sensibilité environnementale des consommateurs

Les retranscriptions issues des entretiens semi-directifs peuvent être découpées en un certain nombre de thèmes principaux répartis entre les trois axes qui structurent l'étude. Nous avons catégorisé ces thématiques en fonction des trois axes selon lesquels nous cherchons à définir le consommateur et son comportement (Tableau 8).

Tableau 8 : Analyse thématique des entretiens.

	Thématique (+) accord (-) opposition	n° entretien										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Achat	Coup de cœur	+	+		+	+						
	Attention portée au prix	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Attrait pour les matières responsables		+	+			+			+	+	
	Importance de la qualité perçue					+		+		+		+
	Se sentir bien dans le vêtement			+								
	Praticité de l'entretien					+						
	Avoir besoin du vêtement	-					+		+	+	+	+
	Origine du vêtement										+	
Entretien	Praticité de l'entretien	+	+	+	+			+		+		+
	Attention portée aux étiquettes	+										
	Habitude	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
	<i>Faibles températures de lavage privilégiées</i>	+	+	+	+		+	+	+	+		+
	Limitation de l'usure				+		+		+	+		
	Saleté					+	+			+		
	Réduction de l'impact sur l'environnement						+		+			
	Utilisations de produits naturels									+	+	
Environnement	Tri sélectif	+	+			+						
	Achats responsables	+	+				+					+
	Verbalisation de la sensibilité environnementale	+				-						
	Réduction des achats			+			+	+				
	Habitudes		+									
	Recherches de matières bios ou recyclées			+								
	Réduction des déchets					+	+	+	+	+	+	
	Réduction de la consommation de viande						+			+		
	Choix des moyens de transports			+			+				+	
	Réduction du nombre de produits d'entretien utilisés							+				
	Réduire les impacts de l'entretien								+			
	Produits d'entretien naturels									+	+	
	Localisme									+		+
	Limiter l'éclairage			+								
	Limiter la consommation d'eau			+								

On constate une très bonne connaissance des enjeux environnementaux de la part des informants, en effet, tous sauf un ont explicitement rapporté être sensible aux problématiques environnementale et mettre en place un ensemble de bonnes pratiques dans leur quotidien et ce de manière

intergénérationnelle. Les expressions de cette sensibilité et les actions entreprises sont diverses comme on le voit dans le Tableau 8 nous avons constaté que de nombreux consommateurs exprimaient un niveau d'information plutôt élevé sur les conséquences sur l'environnement de leur consommation, de l'utilisation de certains produit ou de leur fabrication. Les actions menées pour adresser ces enjeux peuvent se catégoriser selon trois catégories : la réduction ou la modification des éléments entrant dans le foyer (achats responsables, localisme, diminution de la consommation), la modification des pratiques internes au foyer et à l'individu (modification des moyens de transports, attention portée aux consommations d'eau et d'énergie) et la réduction des éléments sortant du foyer (réduction des déchets, tri sélectif, composte)

Au travers de ces entretiens nous avons constaté l'existence d'un lien très fort entre la sensibilité environnementale des répondants et leurs achats. Lors de la première partie des entretiens nous évoquons leurs achats de vêtements, dans cette première partie près de la moitié des informants ont spontanément évoqués un attrait ou une recherche particulière vers les produits composés de matières éco-responsables : « *Je regarde au maximum, l'origine du coton, si c'est recyclé et ça peut conditionner un achat* » ; « *si ça peut être respectueux, voilà, si ça peut être du recyclé, si ça peut être du bio, etc, je le fais plus facilement* » (Corinne, 52 ans). Certaines consommatrices ont rapporté une connaissance environnementale très précise allant jusqu'à spécifier les labels environnementaux recherchés lors de leurs achats de vêtements : « *Pour le bio, le GOTS et pour le recyclage, le label GRS* » (Manon, 26 ans) ; « *s'il y a des t-shirt en coton GOTS ou ce genre de choses, je trouve ça mieux oui* » (Delphine, 27 ans). Ces considérations environnementales au sein des achats de vêtements restent néanmoins subordonnées au prix des articles chez tous les informants. En effet, le prix reste la première thématique évoquée par les consommateurs lorsqu'ils évoquent leurs achats.

Il est néanmoins intéressant de noter que ce lien entre les achats et la sensibilité environnementale des consommateurs se retrouve également au niveau des achats globaux des consommateurs. Lorsque nous avons évoqué leur sensibilité environnementale et les pratiques qu'ils mettaient en place en lien avec cette sensibilité, les informants ont révélé un éventail de pratique très diverses mais néanmoins fortement liées à leurs achats et à leur consommation : « *J'essaye d'avoir moins de déchet, c'est-à-dire que j'ai des cotons lavables, du sopalin lavable, des shampoings solides. J'ai de quoi remplacer l'alu etc à la cire d'abeille etc des couvercles pour éviter de mettre du film plastique. C'est déjà bien pour moi. J'ai des gourdes aussi pour ne pas toujours avoir des petits gobelets au travail.* » (Julie, 24 ans), « *Je fais attention à l'eau : je prends des douches, pas des bains. Je tri, je fais attention au tri. Je composte. Je fais attention, très attention à l'électricité aussi, j'ai une pompe à chaleur, pour le chauffage de la maison. J'évite de rouler, quand on peut faire du covoiturage on fait du covoiturage pour sortir.* » (Corinne, 52 ans), « *Je mange moins de viande rouge. J'essaie d'acheter en vrac. De manière générale,*

j'essaie de ne pas acheter grand-chose en fait : de ne pas consommer de choses dont je n'ai pas besoin. J'essaie toujours de trouver un système D au lieu d'acheter un produit nouveau pour résoudre un problème. » (Delphine, 26 ans).

Le contenu de ces entretiens renforce le lien entre les profils Environnement et les profils Achats que nous avons évoqués lors de l'étude quantitative. Il s'avère pertinent désormais de nous intéresser au contenu des entretiens liés à l'entretien des vêtements par les informants.

II.7.2 Mise en lumière de l'absence d'un lien fort entre l'entretien et sensibilité environnementale

D'après le Tableau 8, l'entretien a majoritairement été associé à la thématique de l'habitude et de la praticité par les informants, ceux-ci ont également mentionné en très grande majorité une attention particulière à effectuer l'entretien de leurs vêtements à des températures de lavage peu élevées, maximum 40°C, sauf pour les articles de linge de maison. Ce premier résultat semble corroborer la très faible différence de pratique de lavage constatée dans l'étude quantitative, la plupart des informants utilisent des programmes et températures similaires : programme coton ou synthétique à 30 °C ou 40 °C, programme laine pour les pulls :

- Corinne, 52 ans : « *Le programme délicat pour les pulls, soit je le mets en rapide à 40, et mixte pour certains vêtements* »
- Julia, 24 ans : « *Je mets tout en Mix à 40° et ça ressort nickel.* »
- Laurence, 52 ans : « *je cherche le moins possible à les abîmer, donc je fais des lavages courts à 30 °C.* »
- Delphine, 26 ans : « *De ce que j'ai compris, c'était mieux de laver plus bas donc je fais des programmes courts à 40 degrés.* »
- Isabelle, 51 ans : « *Sinon en général c'est soit programme laine ou 30 °C synthétiques.* »
- Manon, 26 ans : « *je fais les cycles rapides 30 minutes soit je fais des lavages à 30 degrés, je dépasse rarement les 30 degrés sauf de temps en temps quand je fais les draps.* »
- François, 49 ans : « *Cycle coton, à 40° essorage 1200 tours et ensuite accroché sur un cintre pour sécher* »

Ces pratiques sont, au même titre que le tri du linge, toujours mentionnées accompagné d'un vocable évoquant l'habitude et la praticité : « *Moi c'est le côté pratique moi il faut que je puisse nettoyer* », « *en général c'est soit programme laine ou 30°C synthétique* » (Isabelle, 51 ans), « *ça part à la machine. 0 entretien spécifique, je mets tout en Mix à 40° et ça ressort nickel. Donc pas d'entretien particulier.* » (Julia 24 ans)

Contrairement à l'étude quantitative cependant, dans cette approche qualitative les informants n'ont pas démontré d'homogénéité de leurs pratiques d'entretien hormis selon deux éléments : les températures de lavage et le tri du linge avant lavage. Les informants ont par contre fait ressortir une grande diversité dans leurs pratiques d'entretien par exemple dans le choix de la lessive utilisées, l'utilisation d'adoucissant, l'utilisation du sèche-linge ou le repassage. Parmi ces différentes pratiques on peut distinguer les manifestations chez les informants d'une sensibilité environnementale particulière ou d'une importance apportée à l'économie en terme pécuniaire ou en termes d'efforts et de temps.

Chez les répondants, l'utilisation du sèche-linge et l'évitement du repassage est caractéristiques d'une recherche d'un gain de temps ou d'effort vis-à-vis de l'entretien des vêtements : *« Je mets tout au sèche-linge, je ne trie pas, je mets tout au sèche-linge. Sauf forcément si c'est des pulls en laine mais autrement tout passe au sèche-linge. Pour pouvoir après plier sans repasser, sans passer par la case repassage. Donc je plie tout en sortie du sèche-linge. Je trouve que les vêtements sont plus doux. »* (Laurence, 52 ans), *« Après moi je suis la reine du sèche-linge, dès que je peux sécher en sèche-linge je sèche en sèche-linge. »* (Isabelle, 51 ans), *« comme là en ce moment, qu'il pleut pas mal, où je me dis "ah tiens, un sèche-linge, ça pourrait être sympa" et puis ça fait 2-3 fois qu'on me montre qu'avec le sèche-linge il y a encore moins de repassage à faire. »* (François, 49 ans)

Dans notre échantillon seuls quatre répondants ont réellement fait un lien explicite et spontané entre l'entretien de leurs vêtements et les enjeux environnementaux. Ainsi chez ces informants on constate un choix délibéré dans les modalités de l'entretien des vêtements avec notamment, le recours à des solutions alternatives pour remplacer les détergents : *« ce sont les gargouilles. [...] en fait c'est des boules que tu mets direct dans ton tambour de machine et à l'intérieur c'est des perles de céramique.[...] Et du coup ça remplace la lessive et ça a une durée de vie de plusieurs lavages. »* (Victoire, 23 ans) ; le choix d'un programme et d'une température de lavage particulière avec comme justification l'aspect environnemental : *« Je lave quasiment tout à 30° pour pas abîmer la fibre et c'est plus « écolo » et ça abîme moins mes vêtements et ça suffit à les laver. »* (Julie, 24 ans) ou encore *« en général j'essaye de faire des programmes courts et à 40 degrés, parce qu'il me semble que c'est la température qui joue le plus sur l'énergie, ou il y a un truc comme ça. De ce que j'ai compris, c'était mieux de laver plus bas donc je fais des programmes courts à 40 degrés. »* (Delphine, 25 ans), *« la lessive : alors j'ai deux solutions soit je la fais moi-même donc lessive au savon noir basique, savon noir, bicarbonate et cristaux de soude. Soit, en fait j'ai acheté aussi une lessive qui est certifiée Ecocert. »* (Manon, 26 ans)

Il est néanmoins intéressant de noter que ces pratiques sont également présentes chez d'autres informants cependant ceux-ci ne mentionnent pas de lien entre leur pratique et l'environnement, par

exemple dans le cas d'un programme court à 30°C comme mentionné par Julie 24ans, Valérie 54 ans rapporte : « *Parce que j'estime qu'il n'est pas sale c'est juste pour lui redonner un petit coup de... donc c'est des programmes court à 30°* ». On constate donc que certains consommateurs adoptent des pratiques vertueuses du point de vue environnemental sans forcément faire le lien entre celles-ci et les gains environnementaux qui en résultent.

Nous observons un phénomène similaire chez les consommateurs qui manifestent une volonté de protéger leurs vêtements de l'usure sans pour autant lier cette volonté et les pratiques qui en découlent avec l'environnement. Ces pratiques sont bénéfiques pour l'environnement, cependant très peu d'informants ont verbalisé une motivation environnementale derrière ces pratiques, au contraire les informants ont plutôt manifesté une motivation économique ou une motivation affective envers le vêtement comme motivation de la pratique : « *Et après parce que je cherche le moins possible à les abîmer, donc je fais des lavages courts à 30.* », (Laurence, 52 ans), « *quand c'est des trucs ultra fragiles, je le fais à la main. Donc j'ai acheté un pull avec un peu de cachemire dedans je le fais à la main mais sinon voilà.* » (Victoire, 23 ans).

Pour conclure, certaines bonnes pratiques d'entretien sont dorénavant ancrées chez une grande partie des consommateurs sans pour autant qu'un lien soit établi chez ces derniers entre ces pratiques et les bénéfices environnementaux qui en résultent, comme par exemple l'utilisation de plus faibles températures de lavage. Il semble donc que pour de nombreux consommateurs l'environnement ne soit pas un facteur primordial dans les décisions relatives à l'entretien des vêtements. On retrouve un résultat similaire à ceux de Sarah Bly [91]. Cette chercheuse a effectué une série d'entretiens avec une population fortement engagée en termes d'environnement. Une de ses conclusions est que même chez cette population engagée, la « sustainable fashion » est conceptualisée comme une manière de consommer le vêtement. Cette conception ne s'étend pas à l'entretien du vêtement en dépit de sa grande contribution aux impacts environnementaux des vêtements. Cependant, nous notons une tendance à inclure une considération environnementale dans les décisions relatives à l'entretien chez certaines des consommatrices les plus jeunes avec lesquelles nous nous sommes entretenus.

Pour conclure, de manière générale, les comportements d'entretien vertueux sont des externalités positives de décision qui ne sont pas systématiquement liées à la conscience environnementale des individus. Elles relèvent généralement d'un aspect économique ou d'un souci de préserver ou maximiser la durée de vie du vêtement sans que cette pratique soit reliée à une considération environnementale.

II.8 Conclusion et bilan du chapitre

Dans ce chapitre nous avons présenté l'étude du premier axe de travail identifié dans la thèse au travers de la question de recherche suivante :

- Comment développer une modélisation réaliste de l'usage d'un vêtement prenant en compte la diversité des profils de consommateurs et leurs usages ?

Un état de l'art sur le lien entre sensibilité environnementale et achats responsables nous a permis de mettre en lumière différentes typologies de consommateurs responsables. Ces études nous ont permis de définir les questions et paramètres à rechercher pour définir le consommateur selon sa sensibilité environnementale et ses pratiques d'achat. Nous avons ajouté à ces deux axes les pratiques d'usage et d'entretien des vêtements. Cette analyse du consommateur selon trois axes : sensibilité environnementale, achat et usage nous permettent d'illustrer, au travers de plusieurs typologies, la diversité des profils des consommateurs dans le secteur de la mode.

Le questionnaire construit à partir de ces trois axes nous a permis de construire les typologies de consommateurs suivantes :

- Axe Achat :
 - Minimalistes : les répondants ayant une faible fréquence d'achat, un budget par article moyen et un faible nombre de vêtements achetés par an.
 - Qualitatifs : les répondants ayant une fréquence d'achat relativement faible, un budget par article élevé et un faible nombre de vêtements achetés par an.
 - Rationnels : les répondants ayant une fréquence d'achat moyenne, un budget par article relativement faible et un faible nombre de vêtements achetés par an.
 - Impulsifs : les répondants ayant la plus grande fréquence d'achat, un budget par article faible et un nombre élevé de vêtements achetés par an.
- Axe Environnement :
 - Insensibles : les répondants déclarent une faible sensibilité aux questions environnementales et entreprennent le moins d'actions « vertueuses ».
 - Éveillés : les répondants déclarent une forte sensibilité aux questions environnementales et un nombre moyen d'actions « vertueuses » réalisées régulièrement.
 - Hypersensibles : les répondants qui déclarent une sensibilité forte et un nombre important d'actions « vertueuses » réalisées régulièrement.
- Axe Entretien :

- Soigneux : Les consommateurs qui repassent leurs vêtements, suivent systématiquement les consignes d'entretien de leurs vêtements et adapte le lavage en fonction des vêtements.
- Conscientieux : Les consommateurs qui émettent suivre systématiquement les consignes d'entretien mentionnées sur les étiquettes de leurs vêtements et adaptent le lavage en fonction des vêtements.
- Routiniers : Les consommateurs qui ne consultent les consignes d'entretien de leurs vêtements qu'occasionnellement et qui n'adaptent pas forcément le lavage en fonction des vêtements

Le croisement des typologies Achat et Environnement corrobore les typologies du consommateur responsable évoquées dans la littérature et met en évidence l'influence de la préoccupation environnementale sur les pratiques d'achat des consommateurs. La plupart des consommateurs Impulsifs sont Insensibles vis-à-vis de l'environnement et s'opposent ainsi aux consommateurs Qualitatifs avec une fréquence d'achat plus faible et une sensibilité environnementale plus marquée. Enfin, les typologies Rationnel et Minimaliste, qu'on peut qualifier de vertueux par la faible fréquence d'achat et le faible nombre de vêtement achetés par an qui les caractérises, indique qu'un comportement d'achat vertueux n'est pas forcément la manifestation d'une sensibilité environnementale particulière puisqu'ils sont séparés presque à moitié entre les profils Eveillés et Insensibles.

Nous avons également croisé les typologies Environnement et Entretien, nous pensions mettre en lumière un lien entre ces typologies similaire à celui évoqué précédemment entre les typologies Environnement et Achat. Cependant, nous avons illustré qu'au sein des consommateurs que nous avons sondés il y avait très peu de différences de représentation des typologies Entretien au sein des classes de la typologie Environnement. Cette absence de lien se manifeste également dans les programmes de lavage utilisés par les consommateurs qui sont sensiblement les mêmes quelle que soit la sensibilité environnementale du consommateur. Une potentielle explication à cette absence de lien est l'harmonisation des pratiques de lavage induite par les communications importantes de divers acteurs publics et privés sur la réduction des températures de lavage, ou encore les travaux d'informations effectués par la COFREET visant à éduquer les consommateurs sur les pratiques de lavage. Nous nous sommes entretenus avec un échantillon de consommateur afin de mettre en lumière d'autres sources potentielles derrière cette non prise en compte de l'environnement lors de l'entretien des vêtements. Il est apparu que les consommateurs font plus difficilement le lien entre l'entretien de leurs vêtements et l'environnement qu'entre ce dernier et leurs achats. Ces thématiques étaient peu associées par les consommateurs de plus de 30 ans. Les consommateurs plus jeunes ont

manifesté une mise en relation plus forte entre ces sujets, il faut cependant noter que ces derniers étaient majoritairement des étudiants ingénieurs textile ou jeunes diplômés formés et sensibles à ces problématiques.

De manière générale, la notion d'usure lors de l'entretien des vêtements est uniquement évoquée avec l'utilisation du sèche-linge et d'un éventuel rétrécissement soudain du vêtement. L'usure n'est pas associée au lavage dans les témoignages des consommateurs. Dans la majorité des entretiens, le choix des pratiques d'entretien n'était pas jumelé à une considération environnementale mais était associé aux notions de praticité des actions, de propreté du vêtement ou d'habitude du consommateur. Ces différents éléments révèlent le manque de connaissance du consommateur sur l'impact que son entretien peu avoir à la fois sur l'environnement et sur son vêtement.

Cette étude nous a permis de qualifier le consommateur en fonction de sa sensibilité environnementale, de ses pratiques d'achats et de ses pratiques d'usage des vêtements. Grâce à ces données, nous pouvons associer un profil de consommateur à un usage particulier. Cela permet de ne plus considérer les consommateurs comme un ensemble homogène dans les ACV textiles. Ces données nous permettent également l'analyse et la comparaison de l'influence des attitudes et pratiques « vertueuses » que le consommateur peut adopter sur les impacts environnementaux de ses vêtements. Nous développerons les modélisations des phases d'usages associées aux profils des consommateurs dans le Chapitre 4. Dans ce chapitre nous illustrerons l'utilisation des données et des résultats obtenus dans ce chapitre dans le cadre de l'ACV.

Dans le prochain chapitre, nous allons décrire la mise en œuvre du second axe de travail de cette thèse au travers d'une étude sur la durabilité et le vieillissement des pulls.

Chapitre III : Etude de la durabilité des pulls

Ce chapitre est centré sur la prédiction de la durée de vie de pulls à partir de travaux expérimentaux mené sur le boulochage. Les enseignes de mode, telles que Camaïeu, Cyrillus ou le groupe ERAM qui ont été associées à ces travaux, ont des attentes et intérêts majoritairement portés sur l'étude de durabilité des pull-overs. Le boulochage est considéré dans la littérature comme un facteur majeur pour l'étude de la durabilité et de la qualité des pulls [41], [121] et constitue également une problématique complexe pour les entreprises qui les fabriquent et les commercialisent. En effet les entreprises ayant participé aux travaux ont rapporté être confrontées à des pulls dont les tests qualité ne reflétaient pas la tenue lors du porter.

Nous chercherons à prédire le comportement des produits au boulochage, l'objectif étant d'arriver à comprendre le vieillissement des produits, d'évaluer leurs durées de vie et de pouvoir lier les comportements des consommateurs à la variation de ces données.

Des tests de durabilité au boulochage seront réalisés sur des pulls-overs fournis par les entreprises citées précédemment et seront complétés par une campagne de tests au porter afin d'établir un lien éventuel entre les performances des produits aux tests en laboratoire et le comportement observé pendant leur porter. Afin de mener cette étude, nous nous appuierons sur un état de l'art complet de la notion de boulochage et de sa prédiction, à partir duquel nous construirons notre méthodologie de prédiction de la durée de vie des pulls.

III.1 Etat de l'art : le boulochage, cause de fin de vie des pulls

III.1.1 Définition

Le boulochage est une détérioration de la surface des étoffes textiles. Il est considéré comme l'un des principaux problèmes qualité dans l'industrie de l'habillement, en particulier pour les tricotés. Outre l'aspect inesthétique qu'il produit, le boulochage est également une cause importante d'usure et de mise au rebut prématurée des produits tricotés et est donc hautement indésirable. Pour ces raisons, le boulochage est depuis longtemps un sujet de recherche important : le mécanisme du boulochage a été étudié depuis le milieu des années 1950 [122], tandis que des études plus récentes se sont concentrées sur la prédiction du comportement du boulochage [123].

Les bouloches sont formées par un enchevêtrement de fibres à la surface des étoffes. Le processus de boulochage a été décrit en 3 étapes par Gintis & Mead [122], et a été approfondi dans les travaux de Cook [124]–[126]. Il peut être décrit comme suit :

- Les fibres impliquées dans le boulochage sont soit présentes à la surface de l'étoffe dès sa conception soit sont transportées à la surface par action mécanique lors de l'usage
- Ces fibres s'enchevêtrent ensuite avec d'autres, formant une structure appelée « bouloche », qui va croître au fur et à mesure que de plus en plus de fibres sont entraînées à l'intérieur de la bouloche
- La bouloche peut ensuite se détacher en l'absence de fibre d'ancrage ou peut être arrachée de l'étoffe par une forte sollicitation mécanique

Pour que ce mécanisme ait lieu, les fibres doivent avoir la possibilité de se déplacer vers la surface de l'étoffe. Il faut donc qu'elles glissent, se plient et se tordent autour des fibres voisines et qu'elles ne soient pas retenues par les forces de frottement au sein de la structure du fil et de l'étoffe. Quant à la deuxième phase qui implique la formation et la croissance de la bouloche, différents facteurs dépendant des paramètres structurels de l'étoffe vont entrer en jeu. La dernière étape est principalement déterminée par la résistance à la rupture des fibres. Ces trois processus se déroulent en parallèle et à des rythmes différents selon les étoffes, ce qui entraîne une évolution variable du niveau de boulochage au cours de l'usure.

III.1.2 Les paramètres qui influencent le boulochage

Il existe de nombreux paramètres basés sur la structure et les caractéristiques des étoffes qui influencent le comportement au boulochage. La section suivante résume ce qui a été défini comme les paramètres du boulochage dans la littérature et leur influence sur le boulochage. Le Tableau 9 présente une liste de ces paramètres et suit le processus de transformation qui s'étend sur 3 échelles, de la fibre au fil et au tissu. Les paramètres de l'étoffe sont ceux liés aux articles en tricot qui font l'objet de cette étude.

Tableau 9 : Paramètres influençant le boulochage dans les tricots selon la littérature

Fibre	Composition	[127] (1956), [128] (1977)
	Finesse	[128] (1977), [124]–[126] (1982,1983,1984), [129] (1963), [128] (1977)
	Longueur	[129] (1963), [128] (1977), [124]–[126] (1982,1983,1984)
	Coefficient de friction	[122] (1958), [128] (1977)
	Rigidité à la flexion	[122] (1958)
	Ténacité	[122] (1958), [130] (1998)
	Courbure	[131] (2002), [132] (2002)
	Morphologie de section	[122] (1958)
	Usure	[124] (1982)
Fil	Filature	[127] (1956), [133] (1994)
	Régularité	[123], [134] (2005, 2006), [135] (2010)
	Type de fil	[127] (1956), [136] (1962)
	Titre	[122] (1958), [137] (1958), [136] (1962), [128] (1977)
	Torsion	[127] (1956), [136] (1962), [128] (1977)
	Pilosité	[127] (1956), [138] (1972), [139] (1991)
Etoffe	Nombre de fils par boucle	[136] (1962)
	Facteur de couverture	[136] (1962), [132] (2002)
	Contexture	[127] (1956)

La composition des fibres, à savoir le type de fibre, était naturellement l'un des premiers paramètres pris en compte dans le processus de boulochage [127] et son influence a été clairement observée dans les premières publications sur le boulochage [140]. La nature des fibres influence à la fois la tendance des étoffes à boulocher, l'évolution du nombre de bouloches, leurs morphologies et leur tendance à rester accrochées aux étoffes [140]. Les fibres synthétiques ont une plus forte tendance à boulocher, de même que les fibres artificielles, notamment à cause de la régularité de leurs structures et des interactions électrochimiques entre elles. Pour les mélanges de fibres, il a été constaté que le ratio entre les différentes fibres impliquées était un paramètre important [127], [140]. La plupart des études sur le boulochage ont été menées sur une nature de fibre spécifique ou sur des mélanges de fibres spécifiques, et les travaux de recherche se sont concentrés sur l'influence des autres caractéristiques des fibres (voir Tableau 9), en particulier celles qui favorisent la mobilité des fibres vers la surface du tissu.

Le mécanisme de boulochage est caractérisé dans toutes ses étapes par les paramètres liés à la capacité des fibres à circuler dans la structure textile et à s'enchevêtrer pour former des bouloches [122]. Ainsi, la longueur des fibres s'est avérée être un paramètre pertinent impliqué dans le mécanisme [124]–[126], [128]. Les étoffes avec des fibres courtes ont tendance à avoir un taux de bouloches plus faible que les étoffes avec des fibres plus longues. Cependant, la masse de bouloches est plus importante pour les fibres courtes, davantage de bouloches tombent du tissu et sont remplacées par d'autres. Il existe une différence cinétique dans le mécanisme de boulochage induite par la longueur des fibres, car les fibres plus courtes ont une plus grande tendance à se déplacer vers l'extérieur de la structure du fil pendant l'utilisation. Un phénomène similaire est également en jeu avec le nombre de fibres [128], [138], [141].

Le mouvement à l'intérieur de la structure du fil est également possible lorsque les fibres ont la capacité de glisser les unes sur les autres ; le paramètre pertinent pour quantifier cette capacité est le coefficient de friction. Gintis & Meade [122], Baird et al. [127] et Iredale et al. [128] ont observé que les forces de friction inter-fibres sont un facteur déterminant dans le processus de boulochage car elles caractérisent non seulement la capacité de la fibre à se déplacer mais aussi à être tirée hors du fil et à l'intérieur de la bouloche. Ils ont également observé que deux autres paramètres de la fibre étaient impliqués dans ce processus : la rigidité à la flexion et la ténacité de la fibre. Au fur et à mesure que la fibre se déplace à l'intérieur du fil, elle doit se plier sous et sur les autres fibres et finalement sur les fils de l'étoffe. Enfin, dans les cas où la force de cohésion de la structure dépasse la ténacité de la fibre, celle-ci se brise et est susceptible d'alimenter les bouloches.

Deux autres paramètres relatifs à la morphologie de la fibre sont mentionnés dans la littérature : la courbure de la fibre [130]–[132] et la morphologie de la section [122],[142], [140]. La courbure de la fibre semble indiquer le degré avec lequel la fibre peut former des crochets et donc être plus facilement extraite pour former des bouloches. La morphologie de la section est un paramètre intéressant car elle est liée à la rigidité à la flexion : on a constaté que les fibres ayant une section transversale en forme de ruban, comme le coton, produisent moins de bouloches car la rigidité à la flexion n'est pas égale dans toutes les directions comme dans les fibres de forme circulaire. La morphologie de la section peut également influencer la surface de contact de la fibre et est donc liée au coefficient de friction.

En ce qui concerne les paramètres du fil, le processus de boulochage dépend de la technologie de filature puisque la mobilité des fibres est liée à leur enchevêtrement dans la structure du fil [127], [133]. Il varie également beaucoup entre les fils monobrins, les fils à brins multiples, les filés de fibres, les fils texturés ou les fils fantaisie. Dans le cas des tricotés, le nombre de fils par boucle est également

un paramètre bien étudié [122], [128], [136], [142] : il influence la compacité de l'étoffe et le degré de liberté des fibres pendant le processus de boulochage. Le facteur de torsion est évidemment un autre paramètre important qui définira également la mobilité des fibres à l'intérieur du fil et du tissu.

La régularité du fil est également un paramètre pertinent dans le phénomène de boulochage, notamment lorsqu'il s'agit d'endroits plus fins où les fibres sont structurellement plus susceptibles de sortir du fil et qui concentrent également les effets des sollicitations mécaniques. Cependant, Beltran et Wang [143],[27] (2005) Yap et al. [135] (2010) ont trouvé que la régularité du fil avait une influence moindre sur le boulochage par rapport aux autres paramètres.

La pilosité est un autre paramètre important du fil lié au boulochage [127], [138], [140]. Dans son étude, Ukponwan [140] a montré qu'un niveau élevé de pilosité ne reflète pas toujours une plus grande tendance au boulochage. Cependant, si l'on considère une étoffe spécifique, il est essentiel de noter qu'avec l'élimination des poils saillants, une réduction significative du boulochage est possible.

A l'échelle de l'étoffe, plusieurs paramètres se sont avérés actifs dans le mécanisme de boulochage. En 1962, Richards [136] comparant des tricotés en jersey et des tricotés à côtes a noté que pour une même longueur de maille, le tricoté en côtes produisait un poids de bouloches plus élevé que le tricoté jersey, même si l'aspect visuel des deux étoffes était relativement similaire. Il a également noté que le boulochage des étoffes variait en fonction de la valeur du produit du nombre de rangées par le nombre de colonnes pour les tricotés unis et du nombre de rangées par côtes pour les tricotés à côtes. Il a également observé que la compacité de l'étoffe semblait jouer un rôle important dans le processus de boulochage.

Candan & Onäl [144], Coldea & Vlad [145] ont également confirmé que la géométrie de la structure du tricot influençait le boulochage de l'étoffe, la structure Lacoste étant plus résistante au boulochage par rapport aux tricotés unis et aux côtes. Dans leurs travaux, Rejali et al. [146] ont conclu par une affirmation similaire. Une densité de boucles plus élevée entraîne moins de boulochage, ce qui est également le cas pour les étoffes plus serrées [147]. Toutes ces caractéristiques sont liées à un paramètre principal qui est souvent utilisé pour définir la compacité des étoffes, le facteur de couverture. D'autres études ont en effet montré que les étoffes ayant un facteur de couverture plus élevé ont une meilleure résistance au boulochage [132], [143], [148], [149].

Enfin, le nombre de fils d'alimentation, qui est une spécificité des étoffes tricotés, a été considéré comme jouant un rôle dans le boulochage par Rejali et al. [146] : il augmente la compacité de la structure et réduit la tendance au boulochage. Cependant, c'est l'un des paramètres les moins influents dans le processus de boulochage.

III.1.3 La mesure du boulochage

Les deux appareils communément utilisés pour la mesure du boulochage sont le Martindale et la boîte de boulochage.

La méthode Martindale est décrite dans la norme NF EN ISO 12945-2:2020 et consiste en deux jeux de plaques d'essai qui frottent l'une sur l'autre : un jeu est statique tandis que l'autre est mobile. L'étoffe testée est montée sur la plaque mobile qui va suivre une figure de Lissajous pendant l'essai. L'étoffe abrasive est montée sur la plaque statique. La norme mentionne deux abrasifs possibles : le premier est l'étoffe testée elle-même et le second est la toile de laine peignée standard utilisée dans la norme d'essai d'abrasion NF EN ISO 12947-1:1999.

Dans la méthode de la boîte de boulochage, les échantillons de tissu sont montés sur des tubes en polyuréthane et sont culbutés dans des boîtes rotatives doublées de liège selon la norme NF EN ISO 12945-1:2020. Les échantillons se déplacent librement à l'intérieur de la boîte, et les frottements étoffe/étoffe et étoffe/liège sont aléatoires contrairement au test Martindale où les cycles de frottement sont imposés par les mouvements de Lissajous.

Il est important de noter que pour les tests au Martindale, les bouloches n'ont presque pas l'occasion de quitter l'étoffe. Cela peut entraîner une maximisation de la croissance des bouloches. Alors que dans le cas de la boîte de boulochage, les frottements et chocs aléatoires permettent aux bouloches de se décrocher des étoffes, même si on les considère généralement les frottements comme étant plus doux que ceux sur Martindale.

Après un certain nombre de cycles de boulochage sur ces appareils, il faut ensuite quantifier et évaluer le niveau de boulochage produit sur l'étoffe. La méthode la plus courante est l'évaluation visuelle. Elle est réalisée par des opérateurs formés qui comparent les échantillons avec des normes visuelles qui peuvent être des étoffes de références réelles ou des photographies. Le résultat du test est une "cotation de boulochage" selon une échelle allant de 1 à 5, 1 signifiant un boulochage très important et 5 un boulochage nul.

Cette évaluation étant basée sur l'appréciation de l'opérateur, elle est subjective et peut être critiquée pour son inconstance entre les opérateurs et l'imprécision de leurs notations. Les autres méthodes d'évaluation ont pour objectif une méthode d'évaluation objective avec une mesure automatique et non intrusive du boulochage. Furferi et al. en 2018 [150] ont passé en revue les différentes méthodes d'évaluation du boulochage basée sur le traitement d'image par ordinateur. Dans leur travail, ils expliquent en détail les principes que les méthodes suivantes utilisent :

- Traitement de l'image 2D (seuillage, analyse de Fourier et ondelette).

- Traitement des images 3D
- Traitement des données par réseaux de neurones artificiels

Le principe des traitements d'images 2D est de partitionner l'image originale en plusieurs segments pour isoler l'étoffe en arrière-plan des bouloches. Elle est généralement utilisée pour obtenir des informations telles que le nombre de bouloches, la densité et la surface occupée par les bouloches sur l'étoffe. Elle permet également de déterminer la distribution des bouloches en termes de taille et de morphologie des bouloches.

L'imagerie 3D suit le même principe que la méthode précédente mais avec une représentation en 3D des échantillons. Elle fournit les mêmes informations en plus d'une information géométrique sur la morphologie des bouloches.

Les réseaux neuronaux artificiels (ANN) peuvent être appliqués après l'étape de segmentation de l'image pour corrélérer les paramètres des bouloches et le jugement des experts. Ils peuvent aussi être utilisés pour relier les paramètres de l'étoffe à son aspect général. Ils peuvent également être utilisés comme un prétraitement de l'ensemble des données avant la cotation par les experts ou l'utilisation d'un autre procédé d'évaluation du boulochage.

Ces dernières méthodes ne sont pas couramment utilisées par l'industrie car elles sont plus coûteuses et plus longues qu'une évaluation visuelle par des opérateurs qualifiés, pour ces mêmes raisons nous privilégions la cotation visuelle du boulochage lors dans ces travaux. Cependant, il est intéressant de noter qu'elles permettent d'obtenir des informations différentes sur le boulochage et les bouloches telles que : le nombre total de bouloches, le nombre de bouloches par unité de surface, la distribution de la taille des bouloches, la surface totale et moyenne des bouloches, la forme, l'orientation, l'angle, l'uniformité des bouloches, etc. Elles fournissent donc une représentation plus fine et plus complète du phénomène de boulochage, offrant aux chercheurs de nouvelles perspectives sur le boulochage des étoffes et sa relation avec les paramètres de l'étoffe, du fil et de la fibre.

III.1.4 La prédiction du boulochage

La prédiction du boulochage et du taux de boulochage est un sujet relativement nouveau qui n'a fait l'objet que de quelques articles. Le développement des méthodes d'analyse de données capables d'analyser et de modéliser des systèmes complexes comprenant de multiples facteurs ouvre de nouvelles opportunités pour améliorer les performances de prédiction. Ces méthodes incluent les algorithmes d'apprentissage supervisés pour la classification ou la régression tels que les arbres de décision, les réseaux de neurones artificiels ou les machines à vecteurs de support (aussi appelés séparateurs à vaste marge). La Figure 37 présente l'architecture générale des méthodes de prédiction.

Tout d'abord, un ensemble d'apprentissage, composé de données expérimentales, est utilisé pour établir les relations entre les paramètres d'entrée (caractéristiques du produit) et la sortie (boulochage mesuré). Ensuite, le modèle obtenu est appliqué à un nouvel ensemble de données d'entrée pour prédire la sortie.

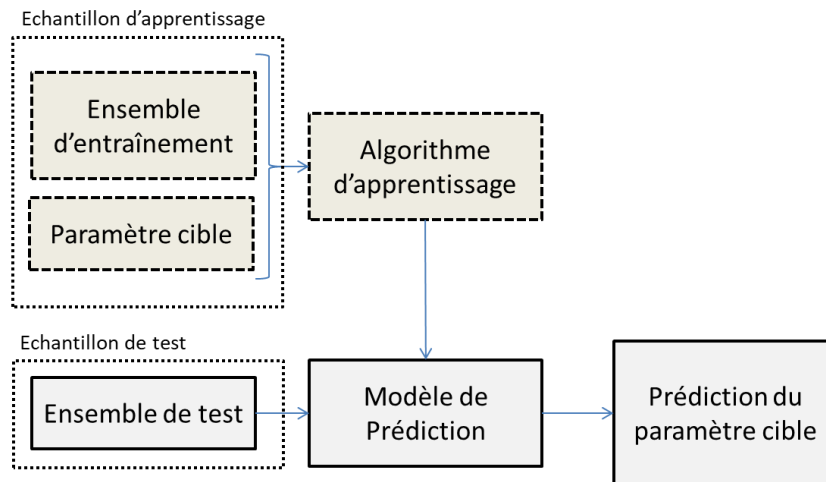


Figure 37 : Schéma de principe d'un modèle prédiction générique

Dans cette sous-partie nous allons présenter une revue des méthodologies de prédiction du boulochage dans la littérature. Peu d'articles existent dans ce domaine et la synthèse de ces travaux est présentée dans le Tableau 10. Trois modèles y sont utilisés :

- La régression multilinéaire (MLR) : méthode statistique qui identifie les relations linéaires entre différents ensemble d'entrées/sorties
- Les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les séparateurs à vaste marge (SVM) : méthodes d'analyses non-linéaires qui identifient les relations complexes entre des ensembles d'entrées/sorties

Tableau 10 : Résumé des modèles de prédiction du boulochage de la littérature

			Beltran et al [123]	Yap et al [135]	Kayseri et al Part I & II [148], [149]	Rejali et al.[146]
Nombre de références			170	135	189	36
Matériaux			Laine 100%		Coton 100%	Mélanges Laine/Acrylique
Modèle de prédiction			ANN	SVM	MLR	ANN
ENTREE	Fibre	Finesse	Diamètre (D)		Finesse	
			CV (D)			
			% Diamètre > 30 μm			
		Longueur	Hauteur (H)		Longueur de fibre	
			CV (H)		Variation de longueur de fibre	
			% Hauteur > 30 mm		Taux de fibre courte	
		Morphologie	Courbure			
		Résistance	Ténacité			
		Maturité			Taux de maturité	
					Taux de fibres immatures	
		Traitement	Traitement anti-rétrécissement			
	Fil	Titre	Titre		Titre	Titre
		Torsion	α de torsion		Taux de torsion	Taux de torsion
			Taux de torsion			
		Régularité	Nombre de noeuds			
			Nombre de creux			
	Pilosité	Pilosité		Pilosité		
	Etoffe	Facteur de couverture	Facteur de couverture		Facteur de couverture	Densité de l'étoffe
		Structure	Type de contexture			Type de contexture Nombre de fils par boucle
	OUTPUT		Boulochage	Cotation de boulochage		

Beltran & Wang [123] ont travaillé sur des étoffes tricotées en 100% laine produits spécifiquement pour leur étude. L'ensemble de données était composé de 170 paires d'entrée/sortie qui ont été séparées aléatoirement en ensembles d'entraînement et de validation. Le degré de boulochage a été mesuré conformément à la norme ISO 12945-1 sur une durée de 4 heures, soit 14 400 révolutions dans une boîte à boulochage ICI. Le boulochage a été évalué par 4 observateurs indépendants et expérimentés, à partir desquels la moyenne des évaluations a été calculée et utilisée comme résultat. Si une ou plusieurs évaluations variaient fortement des autres (plus d'une demi-cotation), les valeurs aberrantes étaient ignorées et la moyenne était arrondie à la demi-cotation la plus proche.

Sur les 170 ensembles de données, 85 % (145) ont été choisis aléatoirement pour former l'ensemble d'entraînement, tandis que les 15 % restants ont été utilisés pour évaluer la robustesse et la généralisation du modèle. À partir du processus d'apprentissage, les auteurs ont classé l'influence de chaque entrée par rapport au résultat du boulochage. Le facteur de couverture s'est avéré être le facteur de loin le plus important, avec un coefficient deux fois plus important que les coefficients des paramètres qui se classaient en deuxième position: le nombre de fils, le nombre de creux, la hauteur et le taux de torsion.

Kayseri et al. [149] ont effectué une démarche similaire avec des étoffes de coton et en utilisant un réseau de neurones artificiels. L'apprentissage a été effectué sur un ensemble aléatoire de 140 références sur les 189 disponibles, et le modèle a été testé sur les 49 références restantes. Selon leur modèle, la liste des paramètres déterminants pour prédire le boulochage par ordre d'importance est la suivante : titre du fil, taux de torsion, taux de fibres courtes, taux de fibres immatures et longueur de fibre.

Yap et al. [135] ont travaillé sur des étoffes en laine et en utilisant un séparateur à vaste marge (SMV). L'ensemble de données d'entraînement comprenait 135 références et le modèle a été appliqué à 83 nouvelles références. Ils précisent dans leur papier que la méthode avec un séparateur à vaste marge est particulièrement sensible au nombre de références utilisées pour construire le modèle en raison de son approche particulière. Contrairement aux modèles évoqués précédemment, les SMV considèrent le problème comme une classification binaire avec pour chaque cotation possible un classifieur particulier qui apprend les combinaisons d'entrées associées à cette cotation.

Cette revue de littérature montre que tous les modèles sont axés sur la prédiction du degré de boulochage d'une étoffe après un nombre spécifique de cycles d'un test de boulochage. De plus, afin de réaliser cette prédiction à un degré acceptable, un ensemble de données significatif est nécessaire, les types d'étoffes utilisées dans les différentes mesures doivent être très similaires entre eux avec, par exemple, la même fibre ou de faibles variations entre leurs paramètres. Cela démontre la

complexité du développement de modèles plus génériques et plus complets qui seraient valides sur plusieurs matières ou types d'étoffes.

Compte-tenu de la diversité des compositions et des paramètres des tricotés vendus dans le commerce, l'utilisation des modèles précédents pour prédire le boulochage représente des centaines d'échantillons nécessaires pour chaque mélange de fibres, contexture de pull, chaque variation des caractéristiques des pulls. Une autre difficulté dans l'application de ces modèles à plus grande échelle est que les marques ne maîtrisent pas souvent complètement leur chaîne de valeur et ne peuvent pas avoir accès à toutes les données nécessaires pour mettre en œuvre les modèles proposés.

En tenant compte de toutes ces contraintes, nous proposerons par la suite un modèle de prédiction du boulochage plus complet intégrant différents tricotés issus du commerce et une vision dynamique du boulochage par la mesure du niveau de boulochage à différents cycles de vieillissements. Les courbes de vieillissement au boulochage ainsi obtenues sur l'ensemble de nos produits seront analysées en utilisant une méthode de classification qui permettra d'identifier des classes de comportement au boulochage. L'objectif est ensuite de prédire l'appartenance d'un produit à l'une de ces classes de boulochage en fonction de ses caractéristiques techniques.

Nous réaliserons un travail similaire sur les résultats d'un test au porter réalisé sur les mêmes références de pulls. Les courbes de vieillissement obtenues (en laboratoire et au porter) nous permettront, d'estimer et de prédire la durée de vie des pulls à partir d'un seuil de boulochage acceptable par le consommateur.

III.2 Matériaux, méthodes et outils

Dans cette sous partie nous allons décrire les divers éléments matériels et méthodologiques que nous utilisons pour la construction de notre méthodologie de prédiction de la durée de vie des pulls.

Nous avons vu précédemment que les modèles de prédiction du boulochage mentionnés dans la littérature s'articulaient autour de la prédiction d'une cotation de boulochage après un nombre de cycles de test. Ces études étaient centrées sur l'étude d'étoffes homogènes aux caractéristiques très proches et utilisaient un nombre élevé d'échantillons.

Nous souhaitons que notre modèle soit applicable sur un large éventail de pulls et avec un faible nombre d'échantillons, de plus notre objectif est la prédiction de la durée de vie. C'est pourquoi nous privilégions une approche expérimentale dynamique du vieillissement des pulls au boulochage en analysant le profil de boulochage au lieu de l'état de boulochage après un nombre donné de cycles. Afin d'approcher notre modèle des conditions réelles de porter des pulls nous relevons également le

profil de boulochage des pulls sur des abrasifs différents afin d'identifier les changements potentiels dus à ce paramètre.

III.2.1 Description des pulls étudiés

Dans le cadre de cette thèse, 26 références de pulls ont été étudiées. Ces pulls ont été mis à disposition par 4 entreprises partenaires, et sont issus de leurs collections 2019/2020. Les seules informations fournies sur ces produits sont les informations communes présentes sur les étiquettes : composition fibreuse et conditions d'entretien. La Figure 38 présente quelques photos des étoffes de ces pulls. Les produits ont des compositions variées, majoritairement des mélanges d'acrylique, polyamide, coton ou viscose avec d'autres fibres. La composition a été simplifiée en une matière principale et une matière secondaire en fonction des taux mentionnés sur les étiquettes des produits.



Figure 38 : Photos de 4 des 26 références de pulls étudiés

Pour mieux comprendre la structure des produits et leurs composants, les pulls ont été déconstruits afin de mesurer les caractéristiques suivantes : masse surfacique, épaisseur, contexture, longueur de maille, titre du fil, type de fil, torsion et facteur de couverture. Le Tableau 11 résume les caractéristiques des produits étudiés et leur mode d'évaluation utilisé dans cette étude.

Tableau 11 : Synthèse des caractéristiques des produits et des mesures en laboratoire

	Gamme de valeurs	Evaluation
Masse surfacique	165 – 831 g/m ²	NF EN 12127
Epaisseur	0,9 – 4,8 mm	NF EN ISO 5084
Contexture	Jersey, Côte 1x1, Côte 2x2, autre	Evaluation visuelle
Longueur de maille	Small - Medium - Big	Evaluation visuelle
Matière Principale	Acrylique, Polyamide, Laine,	Etiquettes de composition
Matière Secondaire	Coton, Viscose, Elasthane, etc	
Titre du fil	37– 353 tex	NF EN 14970
Torsion	38 – 550 t/m	NF G 07-079
Facteur de couverture	35 – 56 %	Traitement d'images
Type de fil	Fancy, 2 ply, Single ply	Evaluation visuelle

Pour les tricotés, le facteur de couverture représente le pourcentage de surface de l'étoffe effectivement couverte par le fil. Il constitue par la même occasion une estimation de la surface potentiellement impliquée dans le processus de boulochage. Dans nos travaux, le facteur de couverture des étoffes a été mesuré par une méthode de traitement d'image. L'étoffe est d'abord scannée à haute résolution, et l'image obtenue est convertie en niveaux de gris qui sont ensuite binarisés en pixels noirs et blancs en utilisant une méthode de binarisation adaptative.

La Figure 39 montre les différentes étapes du traitement d'image : les pixels blancs correspondent au fil et aux fibres dans l'image de la dernière étape. Le facteur de couverture est ensuite obtenu en utilisant un seuil approprié pour calculer le pourcentage de pixels blancs présents sur toute la surface analysée. Les valeurs obtenues pour les pulls de l'étude varient entre 35% et 56%.



Figure 39: Différents stades du traitement d'image utilisé pour évaluer le facteur de couverture des tricotés

Le détail de toutes les principales caractéristiques de l'ensemble des 26 références de pulls est présenté dans le Tableau 12 (les valeurs sont notées N/M (non mesurée) en cas d'absence de mesure et « - » si la caractéristique n'est pas appropriée comme la torsion pour les fils fantaisie). Elles sont très variées et illustrent la grande diversité des pulls du marché.

Tableau 12 : Liste des 26 pulls et leurs principales caractéristiques

Pull	Matière Principale	Matière secondaire	Type de fil	Contexture	Titre (tex)	Torsion (tr/m)	Masse surfacique (g/m ²)	Epaisseur (mm)	Facteur de couverture (%)
PC	Viscose	Acrylique	Retors	Côte 2x2	61	358,6	363,38	1,68	43,8
FRI	Viscose	Polyamide	Retors	Jersey	44,1	550,1	353,51	1,22	34,9
WAV	Acrylique	Laine	Fantaisie	Jersey	259,6	-	305,68	3,32	51,8
MAR	Lin	Coton	Retors	Jersey	37,4	414,1	183,79	0,87	56,3
SEQ	Acrylique	Laine	Fantaisie	Jersey	99,2	-	371,82	4,11	48,8
FAN	Viscose	Coton	Simple	Jersey	57	452,5	165,42	0,91	53,9
PIL	Viscose	Polyester	Retors	N/M	38	411,6	371,5	2,73	48,8
LOB	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Autre	90,9	-	310,94	2,82	37,3
LOU	Polyester	Acrylique	Fantaisie	Côte 1x1	87,3	-	307,32	3,54	38,8
PZR	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Jersey	132,1	-	339,58	3,27	50,1
FLO	Acrylique	Viscose	Fantaisie	Jersey	N/M	-	N/M	N/M	N/M
PLOV	Acrylique	Polyamide	Simple	Jersey	353	452,5	332,57	4,75	49,9
PZO	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Jersey	132,1	-	330,09	3,16	45,1
ENG	Acrylique	Laine	Simple	Spéciale	58,8	129,9	252,53	2,61	39,6
PC	Coton	Aucun	Retors	Jersey	76,8	335,6	266,89	1,18	48,5
COL	Polyamide	Viscose	Retors	Côte 1x1	69,3	320,6	831,16	4,49	47,7
PD	Polyamide	Coton	Retors	Jersey	42	443,8	186,19	0,90	36,5
PH	Laine	Polyamide	Simple	Jersey	68	306,3	259,2	2,21	37,3
PN	Acrylique	Aucun	Retors	Jersey	95,9	217,5	279,33	1,81	36,7
BB	Viscose	Polyester	Retors	Autre	44,4	403,4	246,88	1,57	37,1
PP	Polyamide	Aucun	Fantaisie	Spéciale	91,8	-	490,26	2,95	53,1
CON	Acrylique	Laine	Retors	Côte 1x1	84,3	247,1	530,07	1,97	35
EFI	Acrylique	Coton	Retors	Jersey	68,7	382,6	261,52	1,14	37,6
ECO	Acrylique	Laine	Fantaisie	Spéciale	116,1	-	276,15	2,34	55,3
CP	Coton	Polyamide	Retors	Jersey	55,3	349,1	331,18	1,49	38,6
FLO	Coton	Aucun	Retors	Jersey	37,7	444,73	592,18	3,25	53,7

III.2.2 Méthode de mesure du vieillissement des pulls

III.2.2.1 Etude du boulochage en laboratoire

Le test utilisé pour évaluer le vieillissement au boulochage des pulls est basé sur le test au Martindale tel que défini par la norme NF EN ISO 12947-2. Alors que le test normé est réalisé pour un nombre de cycles précis et dépendant de l'article considéré, nous proposons d'effectuer la cotation sur un même

échantillon à différents nombres de cycles: 125, 500, 1000, 2000, 5000, 7000 cycles. La mesure d'évaluation choisie pour le boulochage est la cotation visuelle pour sa rapidité d'exécution et son faible coût.

Les tests de boulochage ont été effectués sur 3 éprouvettes pour chacun des abrasifs soit 6 éprouvettes par référence de pull. La cotation de boulochage a été effectuée pour les 6 nombres de cycles. La cotation est effectuée avec l'aide des échelles normées également utilisée pour évaluer le boulochage par la norme ISO EN 12945-2. La cotation moyenne finale du pull est obtenue en faisant la moyenne des cotations des 3 éprouvettes pour chaque nombre de cycle de Martindale et pour chaque abrasif.

Les deux abrasifs mentionnés dans la norme NF EN ISO 12947-2 sont utilisés : l'étoffe test que l'on dénommera SELF, et le tissu en laine normalisé dénommé NORM. Ces tests nous fournissent ainsi les courbes de boulochage du pull lorsque celui-ci est frotté contre lui-même et lorsqu'il est frotté contre un abrasif normé : la Figure 40 présente un exemple de résultat obtenu avec le pull PZR. Nous présentons les résultats de cotation de boulochage sur une échelle non-linéaire avec chaque point de mesure équidistant, cela permet une lecture simplifiée des résultats des mesures et cela n'a pas d'influence sur le traitement des données effectué par la suite.

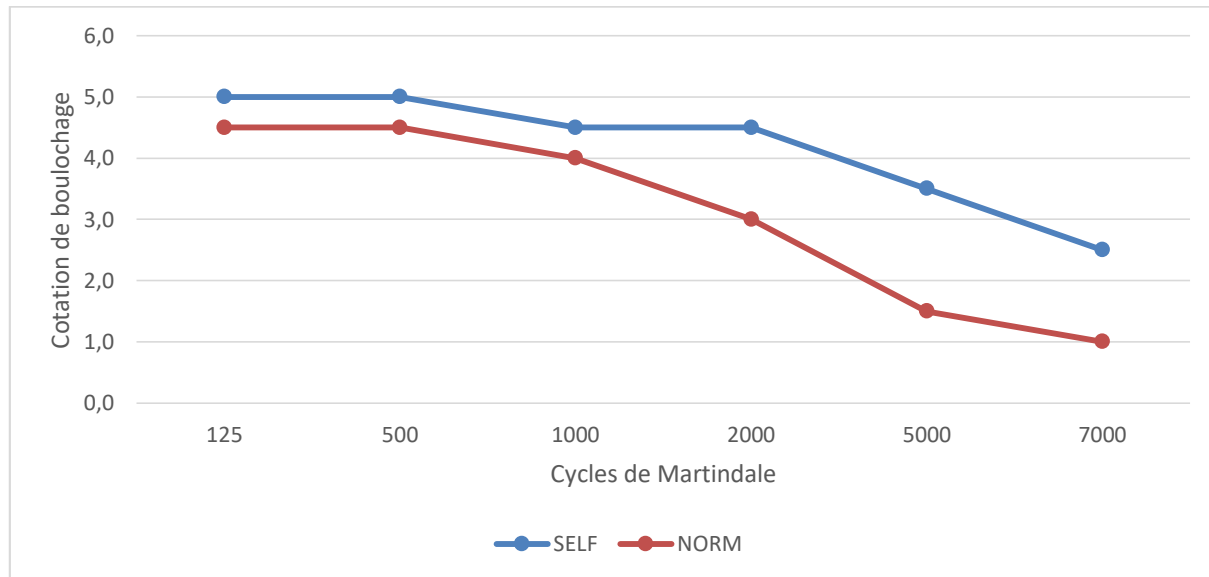


Figure 40 : Courbes de boulochage SELF et NORM du pull PZR.

III.2.2.2 Etude du boulochage au porter

Les tests en laboratoire sur Martindale pour qualifier le vieillissement ne sont pas forcément représentatifs de la réalité du porter et de l'usure d'un vêtement. C'est pourquoi nous avons choisi de compléter les tests précédents par une campagne de tests au porter. Elle a été réalisée sur 20 des 26

références de pulls étudiées précédemment car tous les modèles n'étaient pas disponibles en quantité suffisante.

III.2.2.2.a Les porteurs

Les porteurs ont été sélectionnés sur la base du volontariat avec comme critères principaux leur disponibilité, leur présence régulière à l'ENSAIT et leur taille par rapport aux pulls disponibles. Un panel d'une quinzaine de porteurs a ainsi été retenu et était constitué du personnel du laboratoire GEMTEX et de l'ENSAIT. Un porteur peut avoir plusieurs références de pull à tester. Le Tableau 13 liste les caractéristiques des 15 porteurs de ce panel.

Tableau 13 : Panel des porteurs

Porteur	Âge :	Catégorie socioprofessionnelle	Taille
M.L	50-59 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	M
G.G	50-59 ans	Employé	L
S.V	40-49 ans	Employé	M
D.Q	21-29 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	M
J.R	21-29 ans	Etudiant	S
M.S	21-29 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	XS
F.D	40-49 ans	Profession intermédiaire	XXL
M.F	50-59 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	M
S.C	40-49 ans	Employé	L
P.JL	40-49 ans	Employé	XXL
E.J	21-29 ans	Profession intermédiaire	S
M.E	21-29 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	S
S.O	50-59 ans	Employé	L
C.P	30-39 ans	Employé	XL
A.BR	21-29 ans	Cadre, professions libérales et professions intellectuelles supérieures	XL

III.2.2.2.b Déroulé des tests

Il a été demandé à chaque porteur de bien vouloir porter le pull dans le cadre d'une journée normale de travail, même si cela impliquait de le mettre sous une blouse de laboratoire ou un bleu de travail. L'entretien des pulls entre chaque porter est centralisé et effectué au laboratoire afin de maîtriser les conditions de lavage.

Les produits ont été lavés une première fois avant distribution au porteur. Chaque porteur avait une semaine pour porter son ou ses pulls et les retourner pour l'entretien avant de les porter à nouveau. Avant et après chaque entretien le boulochage des produits a été coté avec la même méthode que le boulochage en laboratoire, par la même personne : cotation visuelle par comparaison avec des échelles de boulochage normées. Les sollicitations mécaniques que le produit subit n'étant pas les mêmes partout nous avons décidé de coter le boulochage des produits sur plusieurs zones selon le découpage suivant : aisselles, manches, ventre, poitrine et dos.

La campagne de ces tests au porter a duré du 08/12/2020 au 14/05/2021.

III.2.2.2.c Les conditions de lavage

La maîtrise des conditions de lavage permet de réduire le nombre de variables pendant le test au porter. Cependant, le choix des conditions de lavage peut être complexe lorsque l'échantillon de pulls contient différentes consignes de lavages donnés par les étiquettes d'entretien sous la forme de pictogrammes. Ces pictogrammes sont nés dans les années 50 et sont gérés par le Comité Français de l'Etiquetage des Textiles (COFREET) et le Groupement International de l'Etiquetage pour l'Entretien des Textiles (GINETEX). Ces organismes ont petit à petit créé et mis en place une nomenclature de pictogrammes indiquant les consignes de d'entretien aux consommateurs. Les symboles sont répartis en 5 catégories : le cuvier, le triangle, le cercle circonscrit, le fer à repasser et le cercle, chacune de ces catégories contient entre 3 et 14 variations [151].

Compte tenu des pulls présents dans l'échantillon d'étude, de leurs consignes de lavage respectives et des caractéristiques des machines à laver utilisées, il a été décidé que les pulls seraient lavés suivant le programme synthétique 30°C, avec un essorage à 1000 tr/min et 50g de détergent pour 3 kg de linge à laver.

III.2.3 Classification et prédiction du vieillissement des produits

III.2.3.1 Classification non-supervisé des comportements au boulochage

La classification non-supervisée est une technique d'analyse de données qui consiste à chercher une segmentation des données en groupes ou classes homogènes de telle sorte que les éléments au sein des clusters soient proches et que les éléments de clusters différents soient éloignés. Il existe de nombreuses techniques pour réaliser cette segmentation plus ou moins adaptée en fonction des données à étudier. Dans le chapitre 2, nous avons déjà évoqué la classification hiérarchique non-supervisée, bien adaptée pour un ensemble de données comportant des points aberrants, des attributs hétérogènes et un nombre de classes non spécifié.

Ici nous souhaitons obtenir des classes représentatives des courbes de boulochage des pulls, l'ensemble des données utilisées dans la classification est l'ensemble des résultats de tests, les attributs correspondent aux cotations effectuées à différents nombres de cycles et sont donc exclusivement numériques. Au regard des résultats obtenus dans la section 3 suivante, nous observons qu'il est possible d'estimer visuellement le nombre de classes. Dans ce contexte, la méthode des K-moyennes, couramment utilisée pour sa simplicité d'utilisation et sa rapidité de calcul, apparaît particulièrement adaptée pour traiter des ensembles de données numériques avec un nombre de classes ciblé [152], [153]

Dans le cas de la méthode des K-moyennes, il s'agit de diviser M points définis par N dimensions en K classes telles que la distance entre les individus d'une classe soit minimale et que la distance entre les classes soit maximale [154].

Cette méthode est très fréquemment utilisée dans de nombreux domaines de recherches et dans des disciplines très différentes : Yang et al. [155] l'utilisent pour classifier les précipitations d'une ville, Hu et al. [156] pour classifier des textures et Clément et al. [157] mettent en œuvre le clustering pour de l'analyse d'image.

Il est important de noter que le contenu des classes et leur place dans l'espace de données peuvent être dépendants du placement initial des centres de classe [158]. En pratique, afin de contrer cet inconvénient, plusieurs itérations de l'algorithme des K-moyennes sont effectuées pour un même nombre de classes en plaçant aléatoirement les centres de classes. Les résultats de chaque itération sont ensuite comparés entre eux afin de déterminer la partition optimale. Les techniques de classification non-supervisée utilisent la notion de distance entre les points pour déterminer leurs similarités et cette distance peut être calculée de nombreuses manières différentes. Le cas le plus basique et qui sera utilisé dans ces travaux est d'utiliser la distance Euclidienne.

III.2.3.2 Prédiction du comportement au boulochage par la méthode bayésienne

Les différentes techniques de prédiction utilisées dans la littérature que nous avons évoquées précédemment en section III.1.4, telles que les réseaux de neurones artificiels ou les séparateurs à vaste marge fournissent une performance satisfaisante mais nécessitent un grand nombre de données, donc de références produits, avec une variabilité très limitée entre les caractéristiques des produits. Par conséquent, elles ne sont pas adaptées à notre ensemble de données contenant une large gamme de produits et un nombre limité d'échantillons de chacun des produits. Dans une telle situation, des modèles de prédiction plus simples génèrent de meilleures performances. Il a été démontré que les classifieurs bayésiens sont plus performants que les autres classifieurs d'apprentissage automatique

pour les ensembles de données limités (en termes de nombre de dimensions, de classes et d'instances) [159]. En effet, ils requièrent un faible nombre de données pour la phase d'apprentissage, peuvent prendre en compte des données de grandes dimensions, et sont rapides d'utilisation [160].

La méthode bayésienne est une méthode de classification supervisée qui utilise les attributs des individus considéré pour en prédire sa classe d'appartenance. Ici, le paramètre étudié est le boulochage caractérisé par des classes de comportements et les attributs d'entrée sont l'ensemble des caractéristiques techniques des produits.

Pour la mise en œuvre du modèle de prédiction, les données disponibles sont divisées en deux sous-ensembles : un sous-ensemble d'apprentissage (75% des données) et un sous-ensemble de test (25% des données). Les données d'apprentissage sont utilisées pour entraîner le modèle et les données de test permettent d'évaluer ses performances. Afin que les résultats obtenus ne soient pas dépendants de la composition des sous-ensembles, nous avons exécuté cette procédure à 10 reprises en sélectionnant aléatoirement les individus. La Figure 41 ci-après illustre le principe général la méthode et donne la composition des deux sous-ensembles.

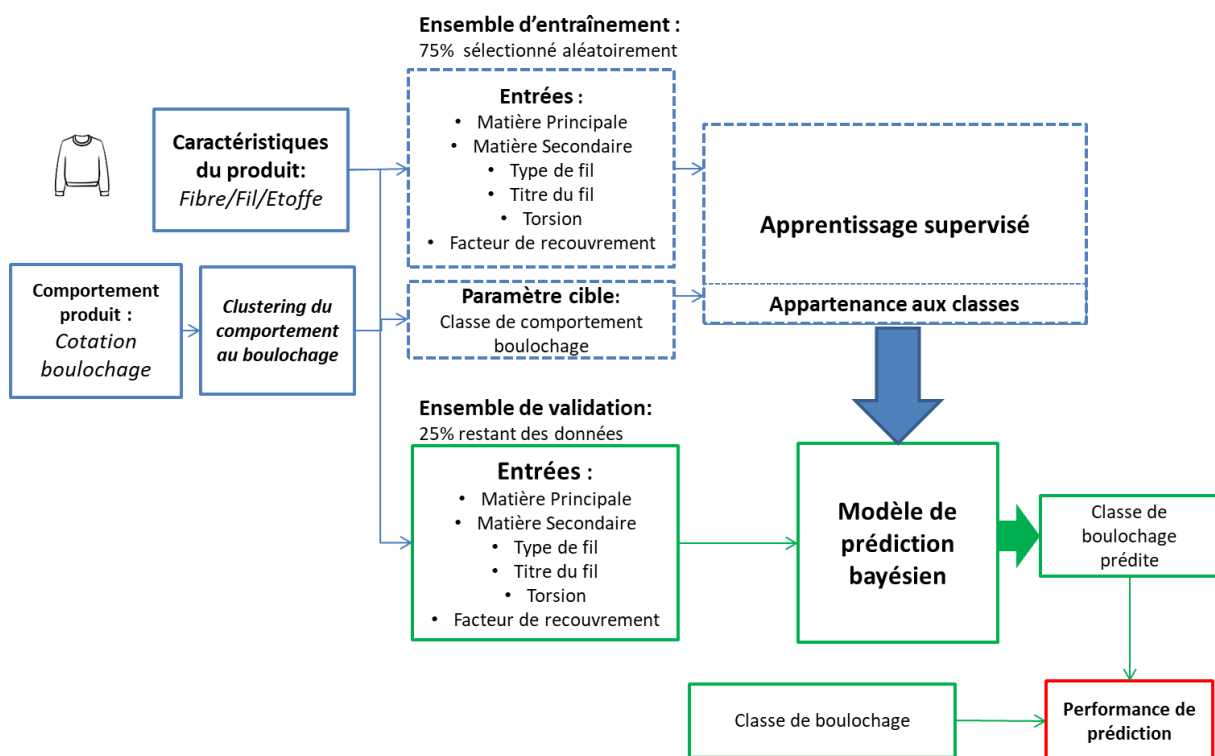


Figure 41 : Principe général du modèle de prédiction des classes de comportement au boulochage.

III.3 Mise en œuvre de la méthodologie de prédiction du vieillissement au boulochage des pulls

Dans cette partie seront présentés l'ensemble des résultats de boulochage obtenus sur notre échantillon de 26 pulls, en laboratoire et au porter. Des analyses par classification seront menées afin d'identifier des classes de comportement afin de prévoir le boulochage des pulls.

III.3.1 Analyse des résultats du boulochage en laboratoire

Les Figure 42 et Figure 43 représentent l'évolution de la cotation du boulochage des pulls en fonction du nombre de cycles de Martindale sur l'étoffe testée appelée « SELF » et sur l'abrasif normé « NORM ». Ces courbes peuvent constituer une représentation de la cinétique du vieillissement du pull au boulochage.

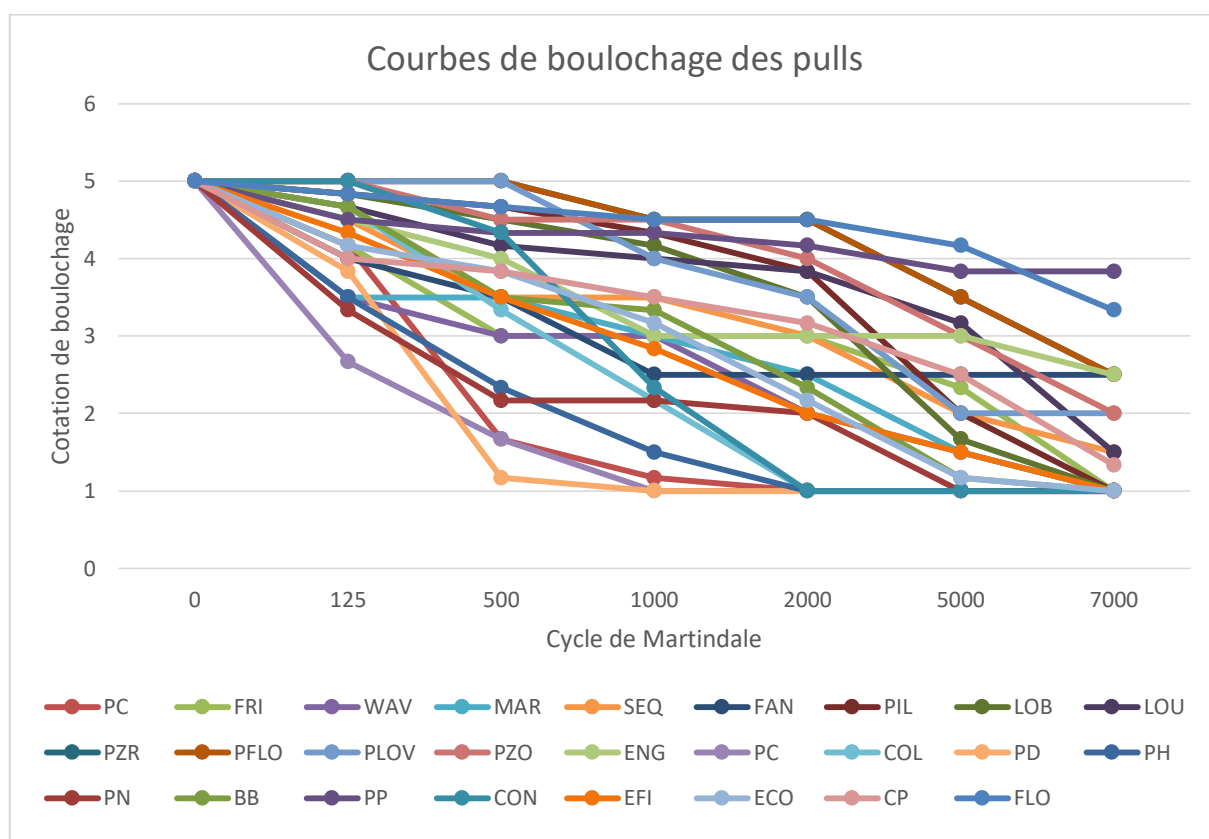


Figure 42 : Courbes de vieillissement au boulochage SELF

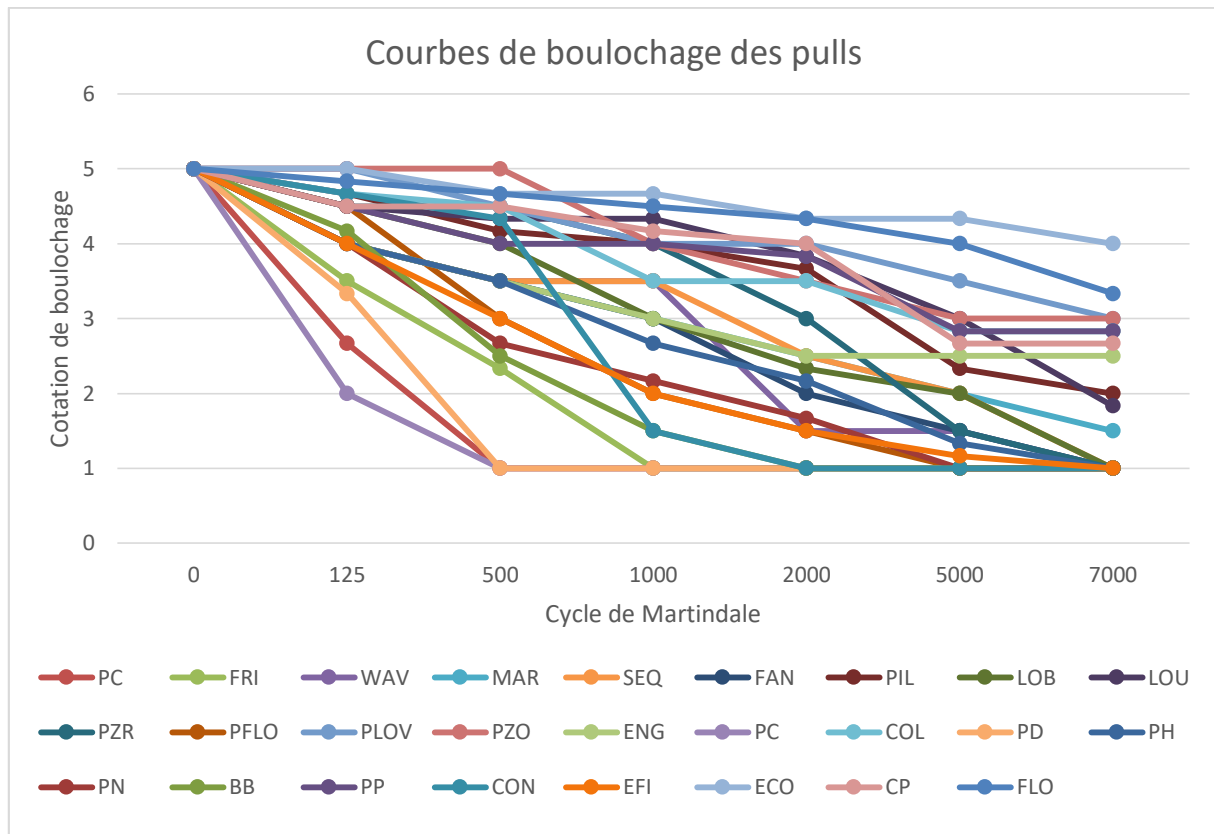


Figure 43 : Courbes de vieillissement au boulochage NORM

Nous obtenons des comportements très variés, avec des pulls qui se dégradent dès 125 cycles (par exemple les pulls PC, CT et FRI), alors que d'autres résistent assez bien au cours du vieillissement comme les pulls ECO, PLOV et FLO.

Afin d'identifier les différentes typologies de comportement au sein de cet ensemble de pulls, une classification non supervisée par la méthode des k-moyennes est appliquée sur ces courbes de cotations de boulochage.

III.3.1.1 Classification des comportements de boulochage

D'après les figures précédentes 3 classes de comportement semblent se dégager visuellement : les pulls très sensibles au boulochage dont la cotation s'effondre dès les premiers cycles de Martindale, les pulls peu sensibles au boulochage dont les cotations restent élevées tout au long du test et les pulls dont le comportement se situe entre ces pôles.

Afin de confirmer quantitativement ce nombre optimal de classes, nous avons évalué les partitions obtenues avec l'indice Silhouette [161]. La meilleure partition est obtenue avec un indice silhouette le plus proche de 1 possible. Nous calculons l'indice silhouette pour K=2 à 10 (Figure 10). Nous en

déduisons l'existence de 3 classes de comportements au boulochage des pulls pour les ensembles de données SELF et NORM.

Silhouette Scores SELF		Silhouette Scores NORM	
2	0.424	2	0.463
3	0.425	3	0.472
4	0.373	4	0.447
5	0.335	5	0.394
6	0.406	6	0.336
7	0.392	7	0.354
8	0.400	8	0.344
9	0.416	9	0.296
10	0.374	10	0.300

Figure 44 : Indice silhouette des itérations de la méthode K-moyenne pour K entre 2 et 10.

Ces classes, que nous avons nommées Solide, Moyen et Fragile, décrivent la tendance du produit à boulocher plus ou moins rapidement (Figure 45 et Figure 46, respectivement pour l'abrasif SELF et NORM).

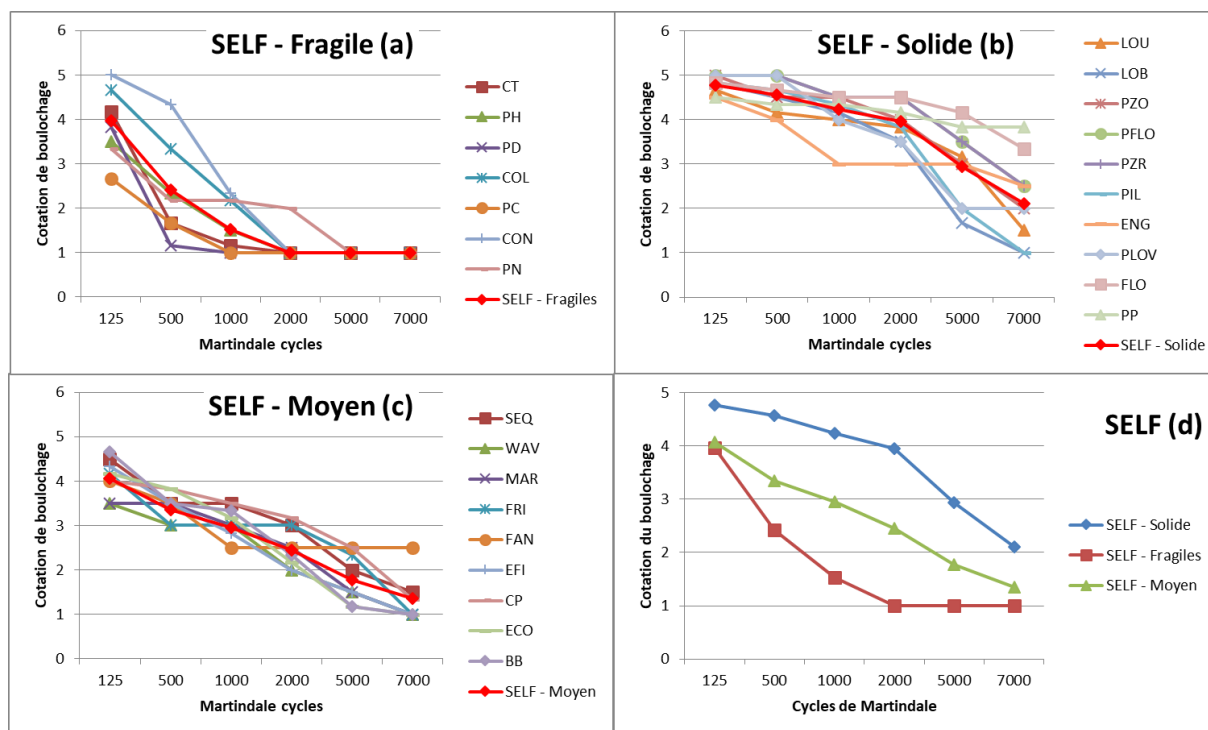


Figure 45 : Courbes de boulochage (a,b,c) et Centres de classe (d) associées sur les données SELF

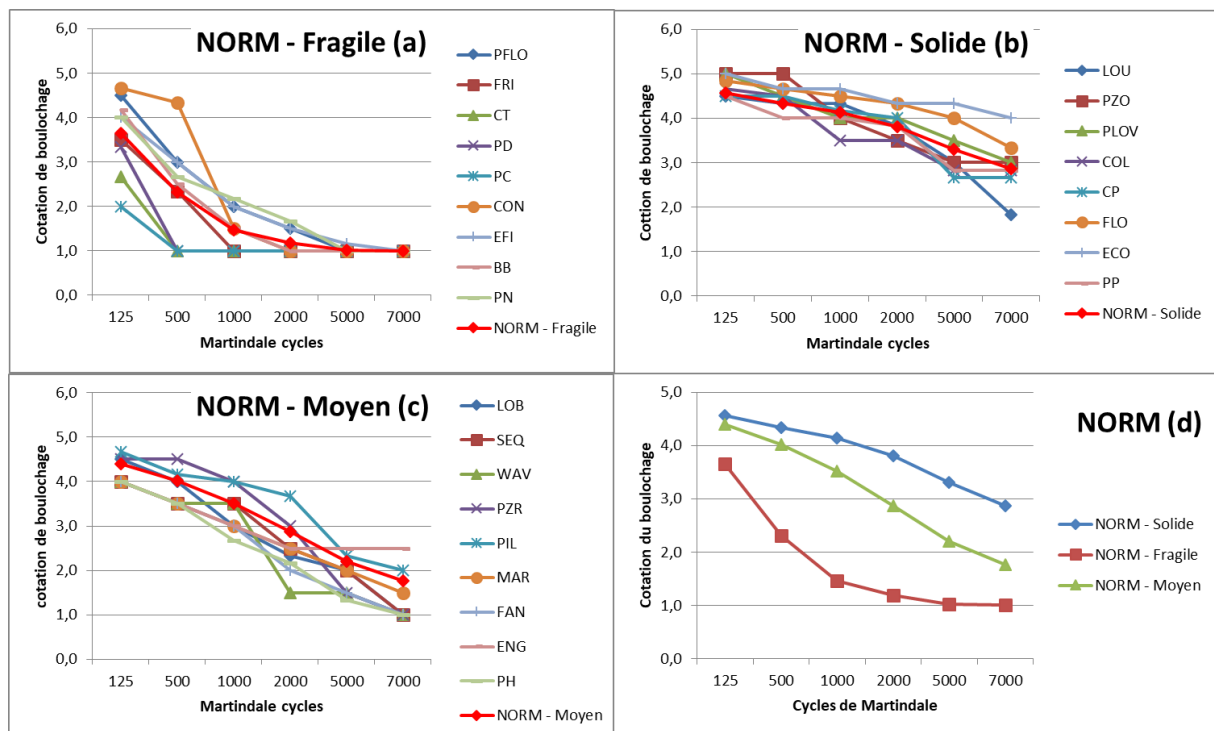


Figure 46 : Courbes de boulochage (a,b,c) et Centres de classe (d) associées sur les données NORM

Les 3 classes de comportement peuvent plus précisément se distinguer de la façon suivante :

- La classe « Solide » est caractérisée par une résistance élevée sur les premiers cycles
- La classe « Moyen » est caractérisée par une augmentation progressive du boulochage en fonction du nombre de cycles de Martindale et un boulochage globalement plus important que les produits « Solide »
- La classe « Fragile » est caractérisée par une très forte augmentation du boulochage dès les premiers cycles de Martindale jusqu'à atteindre la cotation la plus faible

Il est intéressant de mettre les résultats de cette classification en perspective des caractéristiques des produits : le Tableau 14 présente les différents pulls et les classes qui leur ont été attribuées ainsi que certaines de leurs caractéristiques qui influent fortement sur le boulochage d'après la littérature (rappel : les valeurs sont notées N/M en cas d'absence de mesure et « - » si la caractéristique n'est pas appropriée comme la torsion pour les fils fantaisie).

Tableau 14 : Tableau des classes et des caractéristiques des pulls

Pull	Classe SELF	Classe NORM	Matière Principale	Matière secondaire	Type de fil	Contexture	Titre (tex)	Torsion (tr/m)	Facteur de couverture (%)
PC	Fragile	Fragile	Viscose	Acrylique	Retors	Côte 2x2	61	358,6	43,8
FRI	Moyen	Fragile	Viscose	Polyamide	Retors	Jersey	44,1	550,1	34,9
WAV	Moyen	Moyen	Acrylique	Laine	Fantaisie	Jersey	259,6	-	51,8
MAR	Moyen	Moyen	Lin	Coton	Retors	Jersey	37,4	414,1	56,3
SEQ	Moyen	Moyen	Acrylique	Laine	Fantaisie	Jersey	99,2	-	48,8
FAN	Moyen	Moyen	Viscose	Coton	Simple	Jersey	57	452,5	53,9
PIL	Solide	Moyen	Viscose	Polyester	Retors	N/M	38	411,6	48,8
LOB	Solide	Moyen	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Autre	90,9	-	37,3
LOU	Solide	Solide	Polyester	Acrylique	Fantaisie	Côte 1x1	87,3	-	38,8
PZR	Solide	Moyen	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Jersey	132,1	-	50,1
FLO	Solide	Fragile	Acrylique	Viscose	Fantaisie	Jersey	N/M	-	N/M
PLOV	Solide	Solide	Acrylique	Polyamide	Simple	Jersey	353	452,5	49,9
PZO	Solide	Solide	Acrylique	Polyamide	Fantaisie	Jersey	132,1	-	45,1
ENG	Solide	Moyen	Acrylique	Laine	Simple	Spéciale	58,8	129,9	39,6
PC	Fragile	Fragile	Coton	Aucun	Retors	Jersey	76,8	335,6	48,5
COL	Fragile	Solide	Polyamide	Viscose	Retors	Côte 1x1	69,3	320,6	47,7
PD	Fragile	Fragile	Polyamide	Coton	Retors	Jersey	42	443,8	36,5
PH	Fragile	Moyen	Laine	Polyamide	Simple	Jersey	68	306,3	37,3
PN	Fragile	Fragile	Acrylique	Aucun	Retors	Jersey	95,9	217,5	36,7
BB	Moyen	Fragile	Viscose	Polyester	Retors	Autre	44,4	403,4	37,1
PP	Solide	Solide	Polyamide	Aucun	Fantaisie	Spéciale	91,8	-	53,1
CON	Fragile	Fragile	Acrylique	Laine	Retors	Côte 1x1	84,3	247,1	35
EFI	Moyen	Fragile	Acrylique	Coton	Retors	Jersey	68,7	382,6	37,6
ECO	Moyen	Solide	Acrylique	Laine	Fantaisie	Spéciale	116,1	-	55,3
CP	Moyen	Solide	Coton	Polyamide	Retors	Jersey	55,3	349,1	38,6
FLO	Solide	Solide	Coton	Aucun	Retors	Jersey	37,7	444,73	53,7

On remarque tout d'abord que presque tous les produits (23 sur 26) sont plus sensibles au boulochage sur l'abrasif normé que sur eux-mêmes.

Les produits composés de fils fantaisie, qui représentent 35% du total des produits, semblent être particulièrement résistants au boulochage car ils sont surreprésentés dans la classe Solide (60% de l'effectif de la classe Solide SELF et 50% de Solide NORM).

En analysant la composition des classes SELF nous remarquons les tendances suivantes :

- La classe Moyen SELF est principalement caractérisée par une valeur de facteur de couverture remarquablement élevée, un seul produit a un facteur de couverture inférieur à 48%. 6 produits sur 9 de cette classe sont composés de viscose ou de coton comme matériau principal

ou secondaire, mais contrairement aux produits similaires de la classe Fragile SELF, leur torsion est nettement plus élevée. De même, 5 des 9 produits sont des fils retors à 2 brins mais avec une torsion plus élevée qui semble renforcer leur résistance au boulochage.

- Le sous-ensemble Fragile SELF est caractérisé par des taux de torsion plus faibles et une structure de fil retors à 2 brins (6 des 7 produits classés comme Fragile SELF). Leurs facteurs de couverture sont parmi les plus faibles de tous les produits.
- La plupart des produits Solide SELF (7 sur 10) contiennent de l'acrylique dans des proportions significatives (matériau primaire ou secondaire dans le mélange) et sont tricotés à partir de fils fantaisie. Pour cette classe particulière, le facteur de couverture ne semble pas être un facteur décisif, les valeurs étant soit parmi les plus faibles (5 sur 10 inférieurs à 40%), soit parmi les plus élevées (5 sur 10 supérieurs à 45%).

Les classes NORM montrent une tendance similaire en ce qui concerne les fils fantaisie et les fils retors.

L'étape suivante du traitement de ces données est d'utiliser les caractéristiques des pulls pour en prédire l'appartenance du pull à une des classes de comportement que nous venons d'identifier.

III.3.1.2 Prédiction du comportement en laboratoire

Nous considérons les caractéristiques des pulls influençant le boulochage et identifiées dans la littérature (voir Tableau 9) avec comme contrainte de pouvoir les mesurer à partir des pulls finis, ce qui exclue les paramètres des fibres excepté leur matière. Les caractéristiques retenues sont les suivantes :

- Matière principale : la matière avec le plus grand pourcentage dans la composition du pull
- Matière secondaire : la matière avec le second plus grand pourcentage dans la composition du pull
- Type de fil : le type de fil utilisé pour tricoter le pull (simple, retors ou fantaisie)
- Titre du fil
- Torsion
- Facteur de couverture

La classification a permis de définir trois typologies d'évolution du boulochage. Ainsi, l'objectif du modèle de prédiction du boulochage est d'assigner chaque produit à une de ces classes à partir de leurs caractéristiques. Avec les données disponibles on cherche à prédire 3 éléments :

- La classe de comportement au boulochage du produit sur lui-même (SELF)
- Le comportement au boulochage du produit sur l'abrasif normé (NORM)

- La similarité entre les classes de comportements au boulochage sur les deux abrasifs (SELF/NORM). Les entreprises ayant contribué à ces travaux nous ont rapporté des cas de pulls dont les tests n'étaient pas représentatifs de leur qualité lors du porter, cette dernière prédiction pourrait fournir un élément de réponse à ce phénomène en prédisant la dépendance plus ou moins grande du boulochage du pull à la matière avec laquelle il est en contact, en prenant le cas particulier de l'abrasif normé.

Nous utilisons le modèle bayésien décrit dans la section III.2.3.2. Ce modèle va associer une probabilité d'appartenance à chaque classe pour chaque produit du jeu de données en fonction de ses caractéristiques.

Le rapport de gain d'information est calculé pour quantifier la contribution de chaque paramètre à la précision de la prédiction. Cet indice est couramment utilisé pour la sélection d'attributs, notamment lors de la construction d'arbre de décision pour la classification ou la régression [118]. Il permet de sélectionner et réduire la liste des attributs les plus significatifs pour chaque modèle.

Le Tableau 15 présente les résultats des 3 modèles bayésiens développés pour prédire respectivement le comportement SELF, le comportement NORM, et la similitude de comportement SELF/NORM, les entrées considérées par chaque modèle, le rapport de gain (gain ratio) de chacune de ces entrées et le taux de prédictions du modèle. Le taux de prédiction correspond au taux de bonne prédiction de la classe réelle des pulls.

Tableau 15 : Résultats des modèles bayésiens de prédiction du boulochage

	SELF	Gain ratio	NORM	Gain ratio	SELF/NORM	Gain ratio
Paramètres d'entrée	Matière Principale	0,33	Titre du fil	0,27	Torsion	0,10
	Type de fil	0,26	Matière Principale	0,20	Matière Principale	0,10
	Titre du fil	0,20	Matière Secondaire	0,17	Matière Secondaire	0,06
	Facteur de couverture	0,16	Facteur de couverture	0,14	Titre du fil	0,05
					Type de fil	0,05
Précision de la prédiction	0,70		0,58		0,80	

		Predicted			Σ
		Fragile	Moyen	Solide	
Actual	SELF				
	Fragile	78.6 %	28.6 %	8.6 %	20
	Moyen	14.3 %	57.1 %	17.1 %	20
	Solide	7.1 %	14.3 %	74.3 %	30
Σ		14	21	35	70

		Predicted			Σ
		Fragile	Moyen	Solide	
Actual	NORM				
	Fragile	54.5 %	0.0 %	27.3 %	9
	Moyen	27.3 %	75.0 %	36.4 %	10
	Solide	18.2 %	25.0 %	36.4 %	7
Σ		11	4	11	26

Figure 47 : Matrices de confusion des prédictions des comportements au boulochage SELF et NORM.

La meilleure prédiction est obtenue pour le modèle SELF/NORM, c'est à dire pour la prédiction d'un comportement similaire sur les deux abrasifs testés, avec une précision de 0,80. La prédiction du comportement au boulochage sur abrasif normé est la plus difficile avec une précision de 0,58. Cette faible performance peut indiquer que les paramètres utilisés en entrée sont insuffisants et qu'il faudrait ajouter d'autres paramètres. Certains paramètres mentionnés dans la littérature comme la régularité du fil, la longueur et le diamètre des fibres ou encore la pilosité des fils n'a pas été utilisée ici car leur mesure à partir de produits finis était impossible ou difficile. Ce manque de précision peut également être dû à la construction de notre ensemble de données, avec un faible nombre de produits et une grande variabilité entre eux. Ces réflexions peuvent également être appliquées au modèle SELF bien que son taux de précision de 0,7 permette une meilleure identification des tendances entre les produits et leur comportement au boulochage. Enfin, on notera que les matrices de confusion obtenues ne montrent pas de biais significatif des modèles de prédiction (Figure 47). Seule une légère tendance du modèle à surestimer le comportement au boulochage peut être constaté, plus particulièrement sur les classes SELF.

Lorsque l'étoffe est frottée contre elle-même, le comportement de boulochage dépend majoritairement du type de fil, alors que dans le cas de l'abrasif en laine normé le facteur le plus influent est le titre du fil. Le facteur de couverture ne figure pas parmi les paramètres les plus importants, bien que la littérature spécialisée avait montré qu'il s'agissait d'un des paramètres les plus influents pour le boulochage [135], [143], [148], [149]. Cependant dans ces études, les étoffes étudiées ont été produites pour l'occasion et présentaient une faible variabilité entre elles. Ici, avec des produits aux structures et composants très différents, l'influence de ce paramètre s'estompe devant celle de la composition du produit.

Pour conclure, cette approche permet une vision plus dynamique du mécanisme de boulochage puisque l'objectif de la prédiction ne vise pas un degré de boulochage à un nombre spécifique de cycles de test mais la prédiction de l'appartenance à une classe de comportement de boulochage. Elle met

également en évidence les comportements de vieillissement typiques au boulochage obtenus sur une large gamme de tricot.

Dans tous les cas, la matière principale figure parmi les deux premiers contributeurs de la prédiction, le second paramètre est différent pour chaque modèle : le type de fil pour SELF, le nombre de fils pour NORM et la torsion pour le modèle SELF/NORM. Le facteur de couverture n'occupe pas une place importante dans le classement des contributeurs ; il semble que ce paramètre soit plus pertinent pour comparer deux étoffes similaires en termes de caractéristiques techniques. Cependant, son influence n'est pas à négliger car, avec la torsion, il divise les produits quant à leur comportement respectif sur les deux abrasifs utilisés dans le test. Enfin, il apparaît que pour les produits étudiés, les fils fantaisie soient plus résistants au boulochage que les fils simples et retors à deux brins.

Les tendances identifiées dans cette étude ont été obtenues à partir de produits de formes, de matières et de structures variées. Ces résultats soulignent qu'une prédiction du boulochage est possible à partir de produits finis existant sur le marché sans connaissance précise de leur processus de fabrication.

Des données supplémentaires pourraient permettre d'améliorer les performances des modèles. D'autres études sont également nécessaires sur les fils fantaisie pour confirmer la relation avec le boulochage révélée ici. Les prédictions réalisées sont cohérentes avec la littérature, elles respectent les tendances qui y sont déjà identifiées. L'intérêt particulier de cette approche réside dans son applicabilité aux produits finis issus de l'industrie de l'habillement : avec cette capacité à prédire les comportements de boulochage sur différents abrasifs, il sera possible de concevoir des produits tricotés en fonction du profil de boulochage souhaité.

III.3.2 Analyse des résultats du boulochage lors des tests au porter

La campagne de tests au porter aura duré 13 semaines : pendant ce laps de temps environ 11% des pulls ont effectivement été portés 13 fois, 65% des pulls ont été portés au moins 6 fois. Outre l'abandon d'un porteur, le vol de deux pulls à déplorer au début de la campagne de test et le contexte sanitaire réduisant la présence des porteurs au sein du laboratoire, l'ensemble de données obtenues couvre bien les premiers porters, cruciaux pour qualifier le vieillissement des produits.

Si l'on analyse d'abord les résultats de la cotation du boulochage par zone, nous observons que pour tous les produits, la zone qui boulochait le plus et le plus vite est la zone des aisselles suivie de près par les manches, spécifiquement le bout des manches et le poignet. Les sollicitations mécaniques que subissent ces zones sont les plus assimilables aux phénomènes reproduits par les tests en laboratoire et notamment par le Martindale avec un contact long entre les surfaces et une pression maintenant

les surfaces en contact. Les zones les moins boulochées des produits étaient soit le dos, soit le ventre, ces mêmes zones présentaient un développement moins rapide du boulochage.

Dans l'analyse de ces résultats, nous devons aussi prendre en compte les conditions du porter qui diffèrent selon les occupations des porteurs et qui peuvent être une cause d'usure accrue. Nous avons aussi pu constater que la morphologie du porteur peut jouer un rôle important sur l'usure des pulls et notamment chez les femmes. En effet, le pull PC présentait un boulochage plus important au niveau de la poitrine dans le prolongement des aisselles qui s'expliquait par la forte poitrine de la porteuse.

Ces différences de boulochage entre les zones sont cependant assez faibles puisqu'elles représentent environ une demi-cotation dans la plupart des cas (voir Tableau 9). Seuls 6 pulls (PC1, PZ1, ECO, PN1, ENG, BB3) ont présenté une différence de boulochage entre les aisselles et le ventre d'au moins une cotation au cours des porters. Il semblerait que ces différences de boulochage tendent à disparaître à mesure que le produit est porté, sauf pour 2 pulls (ECO et ENG) pour lesquels la différence de boulochage augmente. Le Tableau 16 ci-après résume les différences de cotation de boulochage entre les zones Aisselles et Ventre des pulls portés, les pulls numérotés sont les références pour lesquels nous avons eu plusieurs porteurs.

Tableau 16 : Différence de cotation du boulochage entre les zones Aisselle et Ventre au cours du porter

Produits	Porter 1	Porter 2	Porter 3	Porter 4	Porter 5	Porter 6
PC1	1	0	0	0	0	0,5
PC2	0,5	0,5	0	0	0	0
EFI	0	0	0	0	0	0
PZO1	1,5	0,5	0,5	0,5	0	0
ECO	0	0,5	0,5	1,5	1	1
PD	0,5	0	0	0	0	0
BB1	0	0	0	0	0	0,5
WAV	0	0	0	0	0	0
PN1	1	0	0	0,5	0	0
PN2	0	0	0,5	0	0	0
CP1	0,5	0	0			
CP2	0	0	0	0	0,5	0,5
PP1	0	0	0	0	0	0
PP2	0	0	0	0	0	0
ENG	0	0	0,5	1	1,5	1,5
BB2	0	0	0	0	0,5	0,5
BB3	0	1	0	0	0	0,5
SEQ1	0	0	0	0	0	0
SEQ2	0	0	0	0	0	0
FRI	0,5	0,5	0	0	0	0
PZR	0,5	0	0	0,5	0	0
PZO2	0	0,5	0,5	0	0	0
CT	0,5	0,5	0	0	0	0
PIL	0	0	0	0	0	0
LOU	0,5	0	0	0	0	0
LOB	0	0	0	0	0	0
FLO	0	0	0	0	0	0
CON	0,5	0	0			

Afin de présenter les courbes de vieillissement pour ces tests au porter, nous avons calculé la moyenne du boulochage sur toutes les zones pour chaque pull et à chaque porter. Ces moyennes ont ensuite été tracées en fonction du nombre de porters (Figure 48). On peut y observer une gamme de comportements très variée comme pour les tests laboratoires. On peut identifier visuellement les 3 comportements précédemment définis par classification des résultats de l'étude métrologique : Solide, Moyen et Fragile. Cela semble indiquer la possibilité d'effectuer un lien entre le boulochage observé en laboratoire et le boulochage lors du porter du produit, sujet qui sera exploré dans la partie suivante.

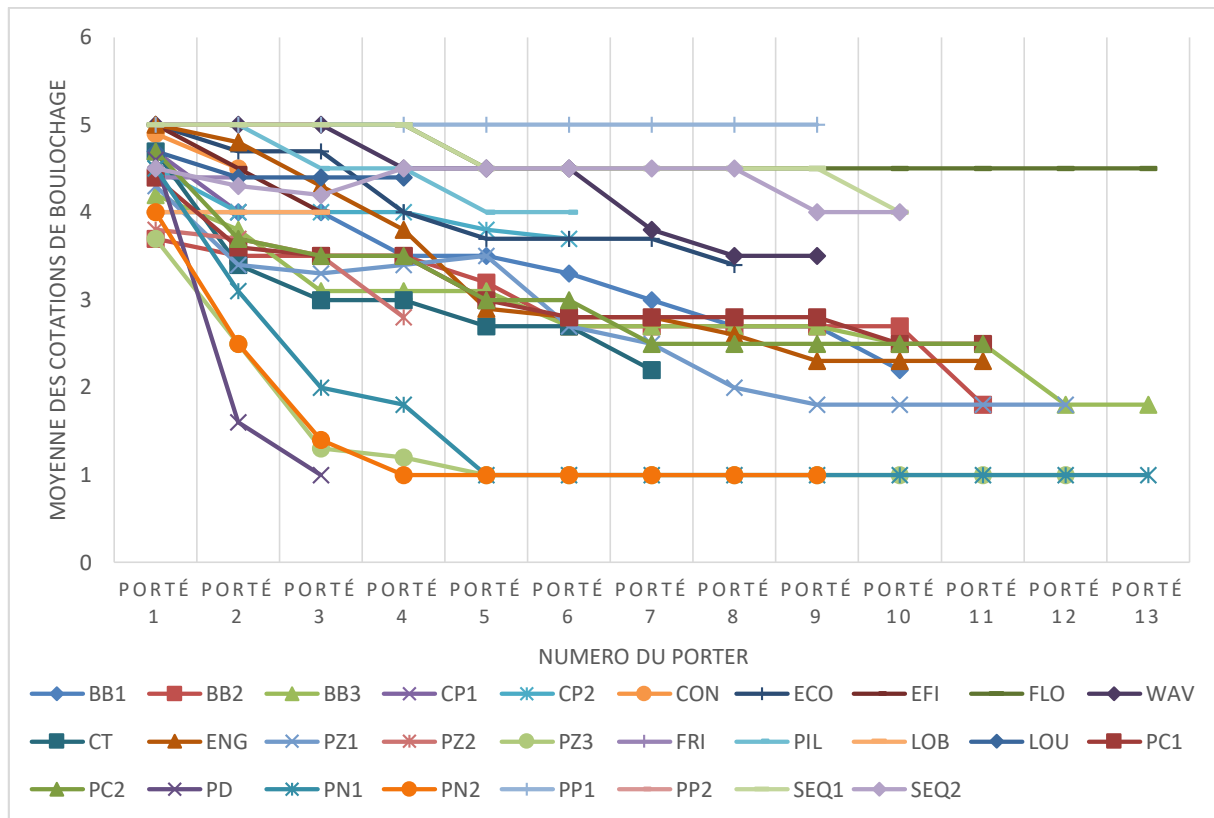


Figure 48 : Courbe de boulochage au porter des pulls

III.4 Estimation de la durée de vie par comparaison des tests au porter et laboratoire

Dans un premier temps, à partir des points de cotations au boulochage de chaque courbe de classes de comportement laboratoire, nous définissons par interpolation une fonction qui représentera le boulochage du pull en fonction du nombre de cycles de Martindale (Figure 49).

Ensuite nous cherchons le nombre de cycles de Martindale correspondant à un porter qui minimise les écarts entre les points de cotation au boulochage au porter et la courbe de comportement obtenue par interpolation (Figure 49).

Enfin, à partir de cette optimisation et d'un seuil de boulochage acceptable par le consommateur nous obtiendrons la durée de vie du pull en nombre de porters.

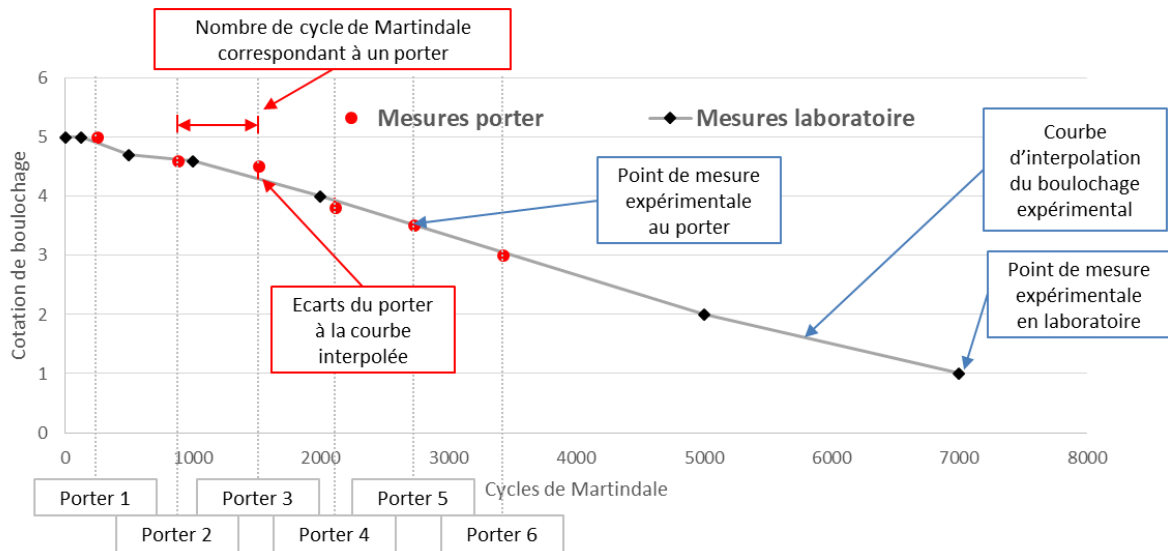


Figure 49 : Illustration de la méthode d'estimation du nombre de cycles Martindale correspondant à un porter.

Afin de s'assurer d'avoir un ensemble de données suffisant pour mettre en perspective le porter et les tests au laboratoire, nous ne considérons que les 6 premiers porters, ce qui concernent 68% des pulls.

Ce traitement de données a été réalisé avec la fonction *interp1d* de la bibliothèque SciPy pour l'interpolation et un algorithme programmé en python [162], [163].

Nous avons à notre disposition deux jeux de données de vieillissement qui décrivent les pulls suivant la même ordonnée (cotation au boulochage) mais avec des abscisses différentes : le nombre de cycles de Martindale ou le nombre de porters des produits. Notre méthode consiste à trouver le nombre optimal de cycles de Martindale correspondant à un porter.

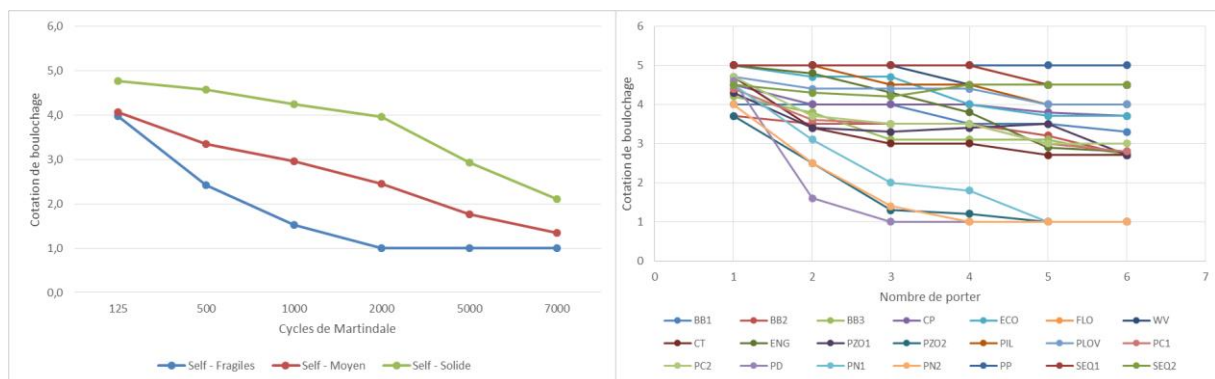


Figure 50 : Courbes de boulochages en laboratoire et au porter.

Ainsi, le critère d'optimisation considéré est l'écart quadratique moyen (MSE) entre les points de cotation au porter et les points de la courbe laboratoire correspondant à α cycles

de Martindale (points estimés par interpolation). Ainsi le problème d'optimisation considéré pour l'ensemble des K pulls est le suivant :

Trouver α tel que $MSE(\alpha)$ soit minimal (Équation 2) :

Équation 2 : Equation de l'écart quadratique moyen entre les cotations au porter et les points de la courbe de boulochage en laboratoire correspondant.

$$MSE(\alpha) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (P_k(n) - f_k(n\alpha))^2 \right)$$

Avec N le nombre de porter considérés, $P_k(n)$ la cotation au $n^{\text{ième}}$ porter du pull k et f_k la fonction de la classe de comportement du pull k obtenue par interpolation.

La ou les valeurs intéressantes de α sélectionnées minimisent l'erreur quadratique moyenne (MSE) entre les courbes au porter transposées sur l'échelle en cycle de Martindale et les courbes de boulochage en laboratoire.

Nous avons à notre disposition plusieurs représentations du boulochage des pulls : les mesures en laboratoire, les classes de comportement au boulochage en laboratoire, les mesures du boulochage au porter et nous pouvons également définir des classes de comportement au boulochage au porter à partir des mesures du boulochage au porter. L'ensemble de ces données permet d'envisager différentes approches pour estimer le nombre de cycles équivalent à un porter. Dans la suite de cette sous partie, nous allons explorer les résultats obtenus avec les approches suivantes :

- Cas 1 : Estimation d'un nombre de cycle pour un porter unique pour l'ensemble des pulls par comparaison des classes de boulochage en laboratoire avec les courbes de boulochage au porter
- Cas 2 : Estimation d'un nombre de cycle pour un porter par type de comportement (Fragile, Moyen, Solide) par comparaison des classes de boulochage en laboratoire avec les courbes de boulochage au porter
- Cas 3 : Estimation d'un nombre de cycle pour un porter par type de comportement (Fragile, Moyen, Solide) par comparaison des classes de boulochage en laboratoire avec les classes de boulochage au porter

III.4.1 Cas 1 – Approche directe

Dans ce Cas n°1, on considère l'ensemble des pulls par comparaison des classes de boulochage en laboratoire avec les courbes de boulochage au porter. Pour α entier et dans un intervalle borné, l'ensemble des solutions est de dimension finie et raisonnable : par conséquent, nous avons choisi de

calculer l'ensemble des MSE pour α compris dans l'intervalle $[0 ; 2000]$. Le minimum de MSE est atteint dans un intervalle de valeurs de cycles/porter entre 100 et 200, et plus précisément pour $\alpha = 141$ (Figure 51).

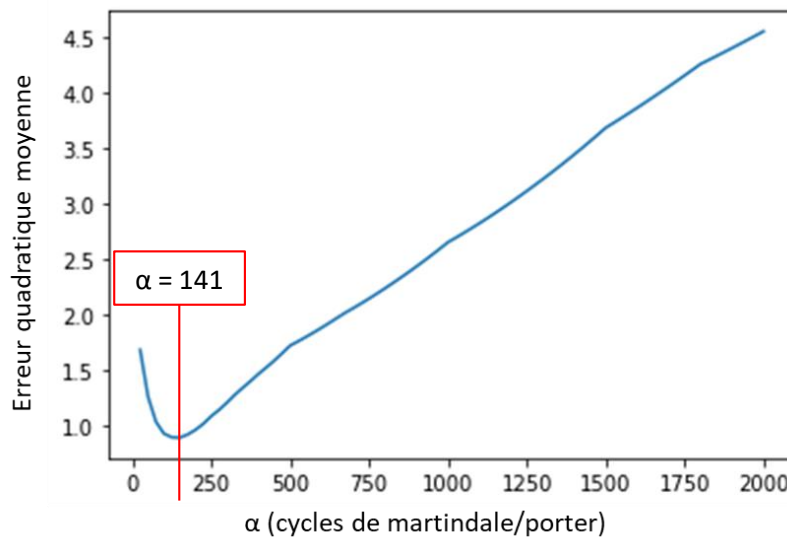


Figure 51 : Erreurs quadratiques (MSE) des pulls en fonction des valeurs de cycles/porter.

Lorsqu'on représente les courbes de boulochage en laboratoire et au porter avec cette équivalence $\alpha=141$ cycles de Martindale pour un porter (Figure 52), on remarque que les produits portés les plus sensibles au boulochage sont relativement éloignés de la classe des pulls Fragile. De plus, il est difficile de distinguer clairement les comportements Moyen et Solide sur les cotations au porter.

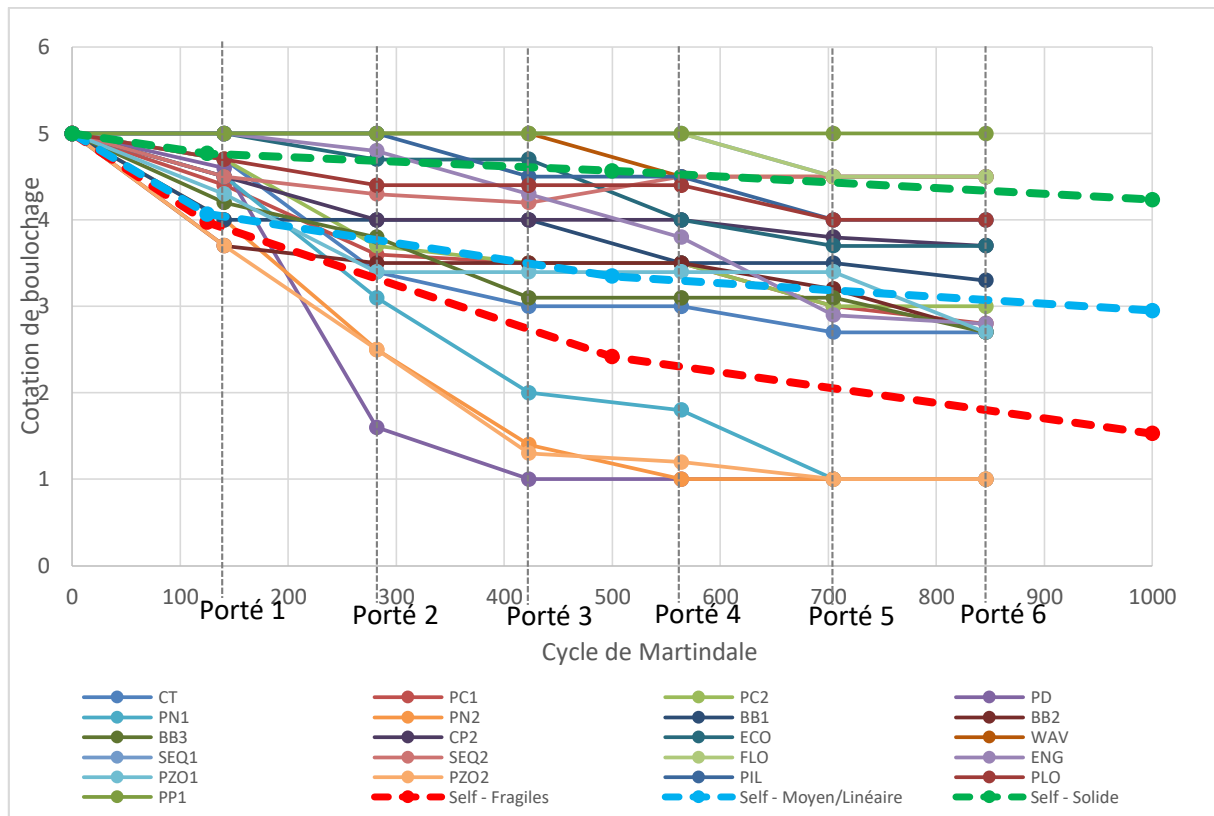


Figure 52 : Courbes de boulochage des produits portés et des classes de boulochages en laboratoire pour 141 cycles/porter.

La limite de cette approche est que l'on recherche une unique valeur de cycles de Martindale représentative du porter quel que soit le produit considéré. Les résultats montrent que cette valeur unique n'est pas adaptée pour décrire tous les comportements observés en laboratoire. Ainsi il semble plus pertinent de définir un nombre de cycles équivalent à un porter pour chaque classe de boulochage.

III.4.2 Cas 2 – Approche par typologie laboratoire

Selon le même principe décrit en section III.4.1, nous déterminons le nombre de cycles de Martindale équivalent à un porter pour chaque classe de comportement (Fragile, Moyen, Solide).

Ainsi, les *MSE* minimum entre le centre de classe et les cotations au porter des pulls appartenant à cette classe sont obtenus pour les valeurs suivantes :

- 150 cycles/porter pour la classe de produit « Fragiles »
- 150 cycles/porter pour la classe « Moyen »
- 50 cycles/porter pour la classe « Solide »

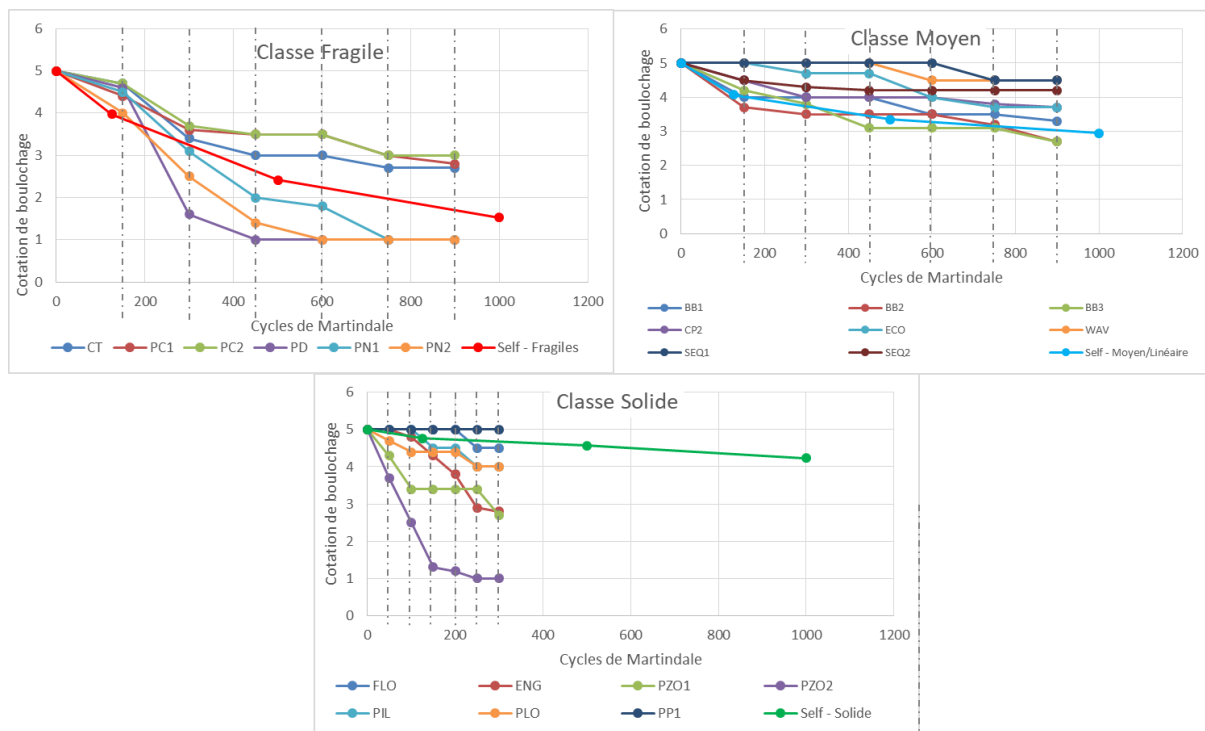


Figure 53 : Comparaison des cotations au porter et les courbes laboratoire après optimisation par classe de comportement.

La Figure 53 présente les résultats avec les valeurs issues de l'optimisation par classe : on s'aperçoit que certains des produits (PZO1, PZO2, ENG, SEQ1, SEQ2, WAV, PC1, PC2, CT) ont des comportements au porter très différents de la classe de comportement définie en laboratoire. Cela souligne l'influence très importante du porteur sur le comportement du produit au porter (pour rappel, dans cette expérience l'entretien est identique pour chaque produit). Par exemple, le pull PZO2 classé comme « Solide » lors de l'étude métrologique semble se comporter comme un produit de la classe « Fragile » lors du porter.

Afin d'améliorer l'estimation du nombre de cycles Martindale équivalent à un porter, nous proposons une troisième démarche qui consiste à définir des classes de comportement au porter à partir des résultats des tests au porter avant de procéder à la comparaison entre les deux tests. Cette approche similaire à la classification décrite en section III.3.1.1, permet de dégager les principales typologies de comportement au boulochage au porter en réduisant l'impact des cas particuliers sur les résultats.

III.4.3 Cas 3 – Approche par typologie laboratoire et porter

Comme nous l'avons évoqué plus précédemment, les courbes de boulochage au porter présentent 3 types de comportement qui se rapprochent de ceux identifiés en test laboratoire. Nous proposons donc de réaliser une classification similaire à celle réalisée sur les données laboratoires de boulochage avec les données des tests au porter. Cette nouvelle approche présente plusieurs avantages :

- Mettre en évidence les produits dont la classe de comportement est différente entre les tests au laboratoire et les tests au porter
- Réduire l'influence des cas particuliers
- Simplifier la comparaison en l'effectuant sur les centres des classes obtenues en laboratoire et des classes obtenues au porter, et non plus en utilisant les cotations des pulls individuels
- Simplifier l'évaluation de la durée de vie des pulls

Le traitement de données permet d'obtenir à nouveau 3 classes de comportement dont on pouvait estimer l'existence graphiquement (voir Figure 48), nous les appelons également : « Fragile », « Moyen » et « Solide ». Les produits sont donc définis par leur appartenance à une classe définie en fonction de leur boulochage en laboratoire (L) et à une classe définie en fonction de leur boulochage au porter (P) :

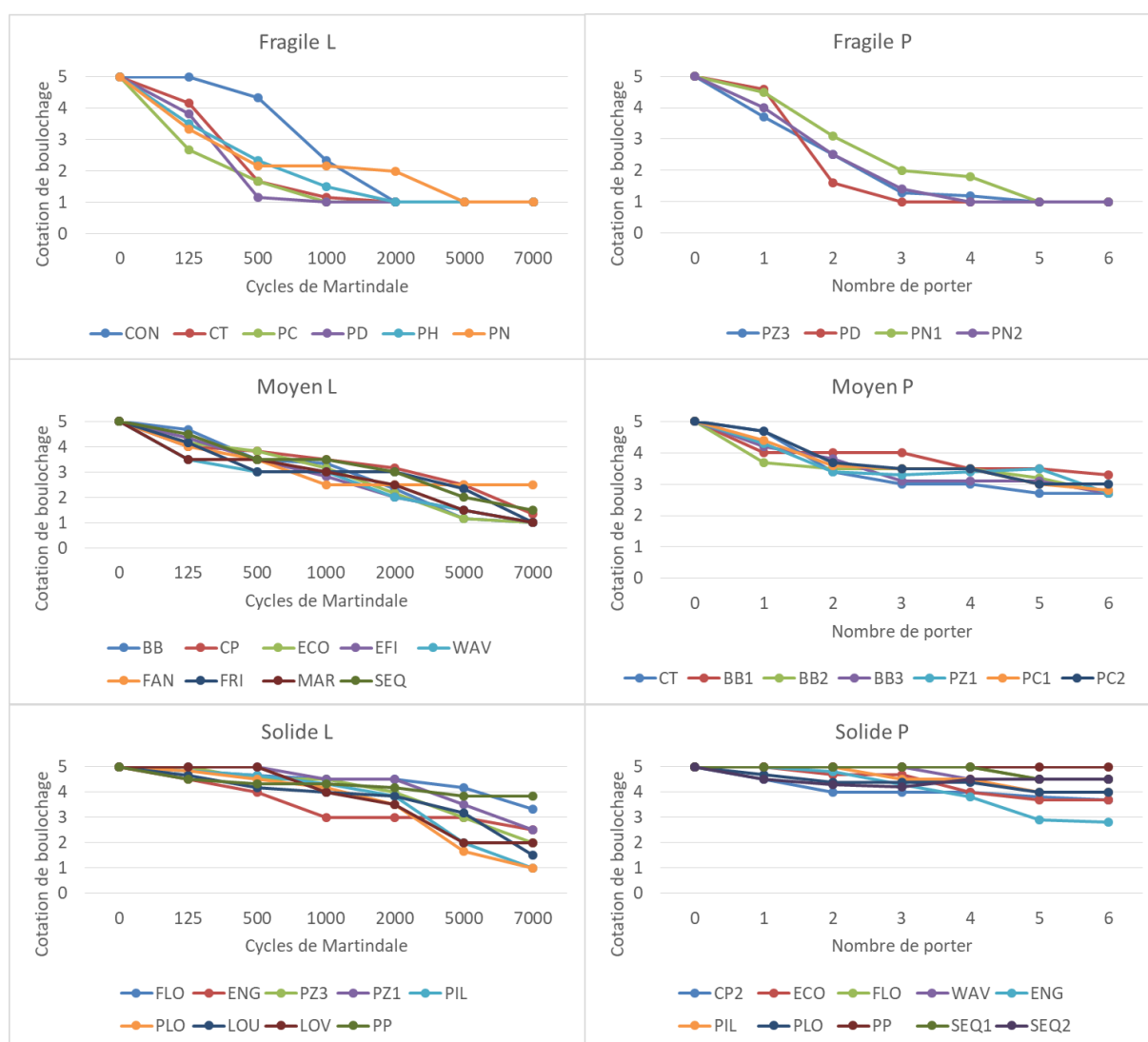


Figure 54 : Courbes de boulochage des classes Fragile, Moyen et Solide cas Laboratoire (L) et Porter (P).

En réalisant la même approche que dans les sections III.4.1 et III.4.2 précédentes sur les centres de classes des trois différentes classes obtenues, on obtient les équivalences suivantes entre porters et cycles de Martindale :

- 273 cycles de Martindale par porter pour les pulls « Fragile P »
- 167 cycles de Martindale par porter pour les pulls « Moyen P »
- 157 cycles de Martindale par porter pour les pulls « Solide P »

Les résultats avec ces valeurs sont présentés sur la Figure 55.

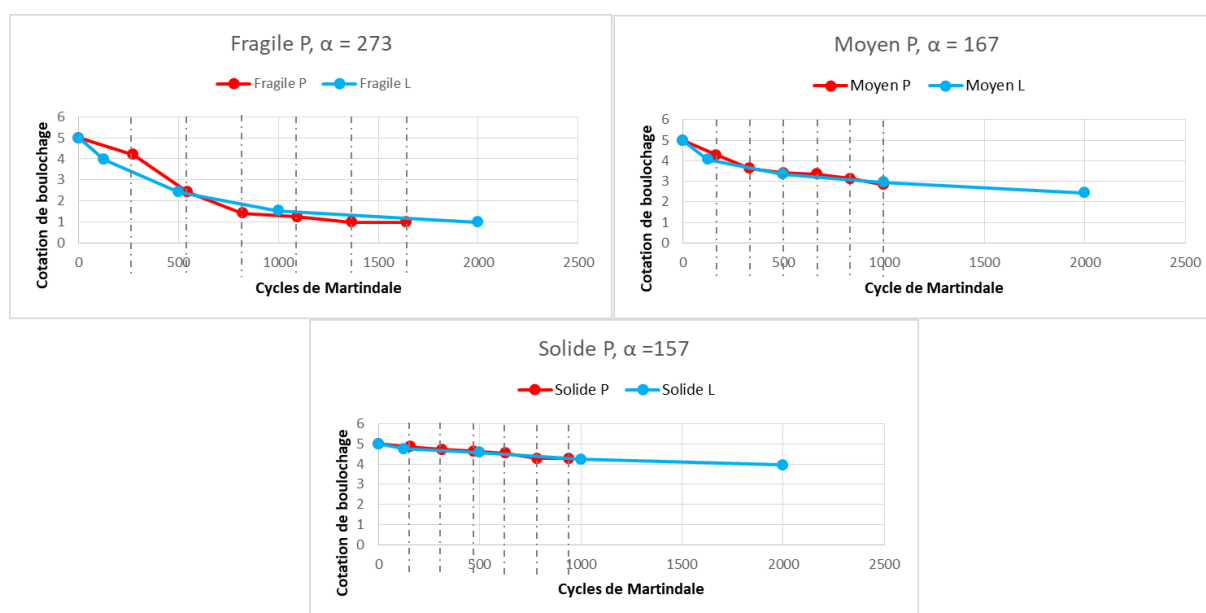


Figure 55 : Interpolation des courbes de boulochage des centres de classe des classes de boulochage en laboratoire et au porter

Cette méthode utilisant les centres des classes de comportement au boulochage permet d'obtenir une équivalence beaucoup plus précise entre les porters et les tests au Martindale. Lorsqu'on ajoute les courbes des pulls qui composent chaque classe de porter, on voit une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux des pulls individuels et les courbes d'interpolation (Figure 56). L'écart maximal entre les centres de classe et les individus de chaque classe est inférieur à une demi-cotation quel que soit le porter considéré à une seule exception : le pull ENG de la classe « Solide P ». Cette différence s'explique sans doute par sa particularité évoquée précédemment dans le Tableau 16 : une différence de boulochage par zone qui s'accroît au cours des porters qui fait baisser sa cotation moyenne comparée aux autres produits.

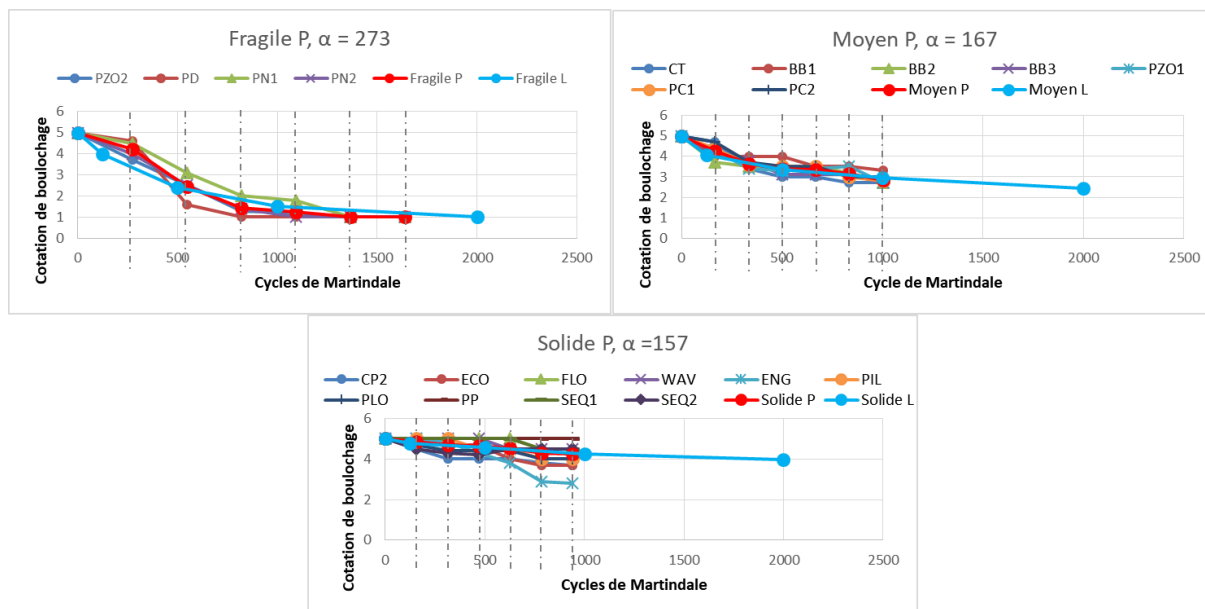


Figure 56 : Courbes de boulochage des produits portés

Cette démarche suppose que les produits ont le même comportement en laboratoire et au porter. Le Tableau 17 détaille les classes attribuées aux produits en fonction des tests de boulochages réalisés selon la norme (SELF), réalisés sur un abrasif normé (NORM) et les tests au porter (Porter). En excluant le cas particulier du pull PZO2 évoqué précédemment nous pouvons analyser la matrice de confusion entre les classes laboratoire et porter sur une quinzaine de références de pulls :

Tableau 17 : Matrice de confusion des classes SELF/Porter et NORM/Porter des pulls testés.

		PORTER						PORTER			
		Fragile	Moyen	Solide	Σ			Fragile	Moyen	Solide	Σ
SELF	Fragile	13%	13%	0%	4	NORM	Fragile	13%	13%	0%	4
	Moyen	0%	7%	27%	5		Moyen	0%	7%	27%	5
	Solide	0%	7%	33%	6		Solide	0%	7%	33%	6
Σ		2	4	9		Σ		2	4	9	

Dans notre étude, 53% (en bleu) des produits ont le même type de comportement en laboratoire et au porter. Dans 40% des cas (en vert), les produits ont été plus sensibles au boulochage lors des tests en laboratoire, et ont donc une classe de comportement plus résistante au boulochage lors du porter. Pour une entreprise, les pulls problématiques sont ceux dont les résultats en laboratoire montrent une plus grande résistance au boulochage en laboratoire que lors du porter ce qui est le cas de seulement 7% (en rouge) des références testées.

Or si l'on considère comme acceptable les produits dont le comportement au porter est plus solide que lors des tests au laboratoire, alors le pourcentage de fiabilité passe à 93% (en bleu et en vert sur la matrice de confusion.)

Les pulls PZO1 et PZO2 sont les seuls dont le comportement en laboratoire était plus solide qu'au porter, or ces pulls ont été portés par des personnels du laboratoire qui utilisaient quotidiennement et pendant de longue période une blouse de laboratoire. Ces blouses sont fabriquées dans des tissus épais et résistants et n'ont pas de doublure intégrée pour protéger les vêtements en-dessous. Il est donc probable que la différence constatée entre le comportement de ces pulls au laboratoire et au porter soit conditionnée à cet usage particulier.

Cette section a permis de déterminer de façon relativement fiable une correspondance entre le nombre de cycles de Martindale et un porter. Nous avons mis en évidence qu'il était possible d'établir une équivalence entre un nombre de cycles de Martindale et un porter, et que la valeur de cette équivalence dépend du type de produit considéré.

Cette correspondance est cruciale pour estimer la durée de vie des pulls décrite en section III.4.4.

III.4.4 Evaluation de la durée de vie des pulls en fonction du seuil de boulochage acceptable

L'objectif de toute la démarche décrite jusqu'ici est de pouvoir estimer la durée de vie des produits (Figure 57). A partir des caractéristiques techniques d'un pull, obtenues par mesure ou par un cahier des charges, un modèle de prédiction permet de définir le comportement au boulochage.

Pour associer l'aptitude au boulochage à la durée de vie du pull, il faut prendre en compte la sensibilité du consommateur à la présence de bouloches. Ainsi nous définissons la valeur limite du boulochage (selon la cotation du test au Martindale) à partir de laquelle le consommateur met son pull au rebut. Plus le consommateur est sensible à la présence de bouloches plus ce seuil de boulochage est élevé. Avec l'équivalence porter/Martindale définie dans la partie précédente, on déduit le nombre de porters pour lequel ce seuil de boulochage acceptable sera atteint, ce nombre de porters constituant l'estimation de la durée de vie du pull. Les entreprises peuvent également fixer ce seuil comme un critère de leur cahier des charges dans la conception de leurs produits.

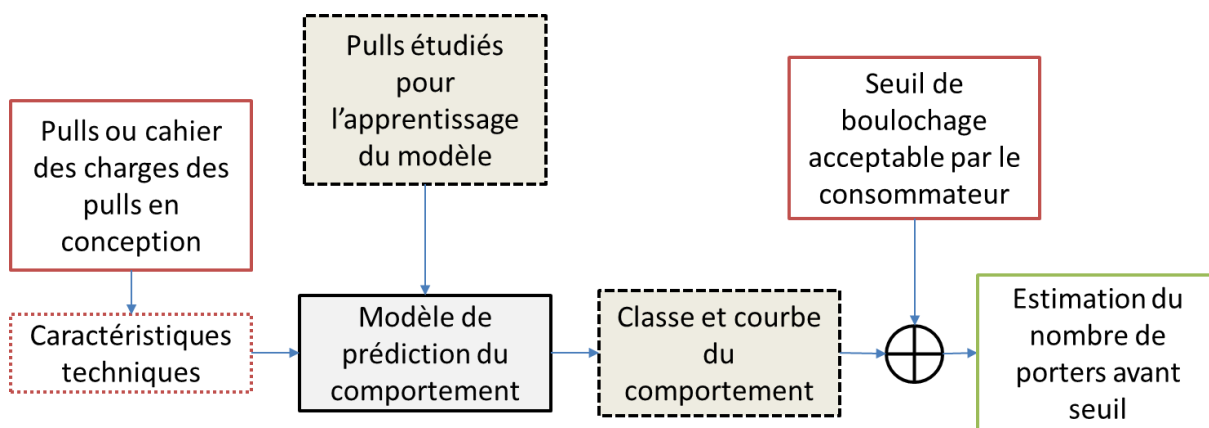


Figure 57 : Schéma de la démarche d'estimation de la durée de vie des pulls

En appliquant cette démarche à l'ensemble de données expérimentales récoltées pendant l'étude, on peut estimer les durées de vie des différentes classes de pulls en fonction du seuil de boulochage acceptable par le consommateur (Figure 58).

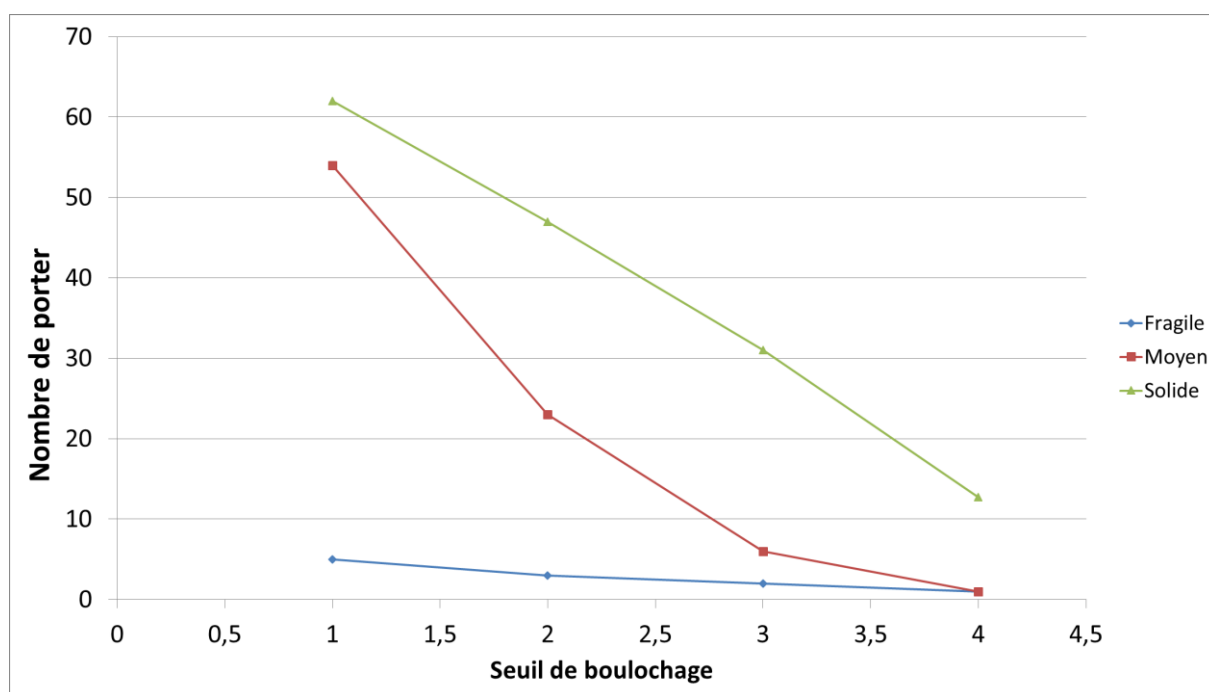


Figure 58 : Estimation des durées de vie des pulls en fonction de leur classe de comportement et du seuil de boulochage acceptable par le consommateur

La durée de vie des produits « Fragile » est très peu sensible au seuil de boulochage acceptable par le consommateur, ces pulls se dégradent si rapidement que même dans le cas extrême d'un seuil à 1 la durée de vie du produit ne dépasse pas 6 porters. Les produits de la classe « Solide » ont une durée de vie beaucoup plus sensible au seuil de boulochage ; en effet, cette durée de vie peut varier de 13 porters à 62 porters, soit une durée multipliée par 5. Le cas des produits « Moyen » est très

intéressant : comme pour les pulls « Solide », leur durée de vie est très sensible au seuil de boulochage et peut varier de 1 à 54 porters. Si le seuil de sensibilité au boulochage est élevé, par exemple à 4, la durée de vie est similaire à celle d'un pull « Fragile ». Si le seuil est faible, à 1, c'est-à-dire le consommateur est peu sensible au boulochage, alors le pull « Moyen » a une durée de vie du même ordre que celle d'un pull « Solide ».

Ces résultats introduisent une nouvelle composante dans l'étude de la durée de vie des produits : le seuil de tolérance aux défauts des produits. Cette information confirme les travaux antérieurs[41], qui introduisent la notion de « défaut acceptable par les consommateurs » pour estimer la durabilité du produit.

III.5 Bilan du chapitre

Dans ce chapitre nous avons décrit la mise en œuvre de l'étude de la durabilité des vêtements au travers du cas des pulls et l'estimation de leurs durées de vie par leur vieillissement au boulochage. Cette étude permet de définir des classes de produits en fonction de leur vieillissement et de prévoir l'appartenance à ces classes en fonctions des caractéristiques des produits. La courbe de vieillissement prédite avec cette méthode permet une estimation de la durée de vie du produit en fonction du seuil de défaut admis par le consommateur, ou par le seuil de défaut acceptable fixé par le cahier des charges du produit.

Dans un premier temps nous avons défini le boulochage comme défaut clé qui conditionne la mise au rebut des pulls et avons centré l'étude autour de ce défaut. Nous avons réalisé une étude en laboratoire pour qualifier les caractéristiques des pulls et quantifier leur vieillissement au boulochage. L'aspect vieillissement est obtenu en multipliant les relevés au cours du test de boulochage ce qui permet de définir une courbe du vieillissement du produit. Nous avons extrait 3 classes de comportement des pulls au boulochage en effectuant une classification par la méthode K-Moyennes sur l'ensemble des données de boulochage. À partir de ces classes de comportement des pulls au laboratoire (FragileL, MoyenL, SolideL) et des caractéristiques des produits nous avons construit un modèle de prédiction du comportement des produits, ce modèle est un modèle de prédiction probabiliste dit bayésien.

Nous avons complété notre étude laboratoire du vieillissement par une campagne de tests au porter de mêmes produits. Nous avons mis en lumière la faiblesse des écarts de boulochage entre les zones des pulls, bien que souvent notées par les consommateurs, la différence est souvent inférieure à une demi-cotation. Ces observations nous ont également indiqué que les premières zones à boulocher sur les pulls sont les aisselles et les manches qui sont sujettes à plus de sollicitations que les autres zones

telles que le ventre. Les résultats de ces tests ont également fait l'objet d'une classification non-supervisée en méthode K-Moyennes donnant à nouveau 3 classes de comportement des pulls au porter (FragileP, MoyenP, SolideP). Ces deux classifications nous ont permis de définir le nombre de cycles Martindale correspondant à un porter.

Nous avons aussi confirmé la très forte influence du consommateur sur le produit et sa durée de vie, au travers de la notion de boulochage acceptable par le consommateur que nous avons utilisé pour estimer la durée des pulls en fonction de leurs classes de comportement. Nous avons également illustré cette dépendance par des cas particuliers de pulls ayant manifesté des comportements différents de ceux qui étaient attendus à cause de leurs porteurs. Notamment pour deux pulls : l'un avait un boulochage par zone différent des autres causé par la morphologie particulière du porteur, en l'occurrence une forte poitrine, et l'autre se réfère à un usage particulier (sous une blouse de laboratoire) entraînant une très forte usure.

Nous avons introduit la notion de seuil de boulochage acceptable pour estimer la durée des pulls en fonction de leurs classes de comportement. La fiabilité de cette estimation de la durée de vie est dépendante de l'accord entre la classe de comportement en laboratoire et au porter qui est de 53% (8 produits sur 15 ont la même classe de comportement en laboratoire et au porter). Pour améliorer cette estimation, il serait nécessaire de tester plus de pulls (nous avons été limités par les contraintes de l'épidémie de Covid 19 nous empêchant d'augmenter le nombre de références que nous avons pu tester en laboratoire et au porter). Néanmoins, les ~38% restant (6 pulls sur 16) ont un comportement plus résistant lors du porter et seulement ~12% (2 pulls sur 16) ont un comportement moins résistant au boulochage au porter. L'étude en laboratoire peut éventuellement conduire à une production de surqualité en effet, notre modèle a tendance à sous-estimer la durée de vie des pulls qui auront probablement une durée de vie au porter supérieure.

Le niveau du seuil de boulochage acceptable a également un très fort impact sur l'estimation de la durée de vie des pulls, et nous avons trouvé que cette durée pouvait être multipliée par 5 dans certains cas.

Les résultats obtenus tout au long de cette étude indiquent qu'il est possible de prévoir le comportement typique des produits en fonction de leurs caractéristiques techniques. Ces comportements typiques en laboratoire peuvent être associés au comportement des produits lors du porter afin d'estimer la durée de vie des produits. Ces résultats pourraient être améliorés :

- en augmentant et en diversifiant les références de pulls étudiées afin d'augmenter la précision du modèle prédictif,

- en multipliant les porteurs afin de réduire l'influence des usages des vêtements sur l'estimation du nombre de cycles Martindale équivalent à un porter

Ces résultats sont très intéressants pour les entreprises de l'habillement qui pourront estimer la durée de vie de leurs pulls lors de la conception en fonction des caractéristiques souhaitée grâce à notre méthodologie en adaptant leur contrôle qualité en conséquence. L'estimation de la durée de vie pourra également être intégrée aux critères de l'affichage environnemental des vêtements, permettant aux marques de communiquer sur leurs performances et aux consommateurs d'être mieux informés sur la durabilité de leurs vêtements.

Dans le prochain chapitre nous allons décrire comment les résultats de cette étude sur la durée de vie des produits et les résultats de l'étude du comportement consommateur du chapitre précédent peuvent être utilisés pour améliorer et contribuer à la précision des ACV de vêtements.

Chapitre IV : Analyse du Cycle de vie, contribution du consommateur et du produit

Nous avons discuté au Chapitre 1 de la nécessité de mieux définir deux éléments essentiels de l'Analyse de Cycle de Vie : l'usage du produit par le consommateur et la durée de vie du vêtement. Ce dernier chapitre est donc consacré à l'intégration des résultats des Chapitres 2 & 3 au sein d'une ACV. Nous nous concentrerons d'abord sur la modélisation d'un pull simple et nous préciserons le contexte et les objectifs de l'étude.

Puis nous allons examiner plusieurs scénarios d'ACV afin d'analyser les contributions des résultats de nos travaux sur les impacts environnementaux. Finalement, nous allons examiner la sensibilité de l'ACV en fonctions de paramètres relatifs à l'usage et à l'usure et plus généralement à la durée de vie.

IV.1 Objectifs et choix du produit étudié

La durée de vie a déjà été identifiée comme l'un des paramètres les plus influents sur les impacts environnementaux des vêtements [18], [53], [55], [164]. L'usage est également une étape fondamentale dans la production des impacts environnementaux des vêtements d'après la littérature [55], [56], [64], [73], [74], [165]. Notre étude a pour objectif d'apporter une meilleure définition de ces paramètres et étapes essentielles, de définir et d'affiner l'utilisation de la durée de vie et la modélisation de la phase d'usage dans l'ACV de vêtements et d'en quantifier l'influence.

Nous comparerons des scénarios de durée de vie et de pratiques de consommateurs construits à partir des données étudiées dans les précédents chapitres. Afin de nous concentrer sur nos objectifs, nous n'avons pas associé les différents scénarios de durée de vie à des fabrications différentes, c'est pourquoi nous considérons un produit unique hypothétique comme base d'application de nos scénarios. Par conséquent, seules les phases d'usages sont modifiées par les scénarios de consommateurs, les autres phases du cycle de vie (fabrication, distribution et fin de vie) sont identiques pour chaque scénario.

IV.1.1 Logiciel d'ACV pour l'évaluation environnementale des produits et des profils de consommateurs.

La réalisation d'ACV est facilitée par l'utilisation de logiciels dont plus d'une vingtaine a été dénombrée par la plateforme AvniR (plateforme d'expertise sur l'intégration de l'ACV dans les démarches de

développement durable des acteurs économiques [166]) dont certains sont simplifiés comme par exemple EIME et d'autres sont qualifiés de logiciels d'experts tels que Simapro ou OpenLCA (ce dernier étant un logiciel libre).

Nous avons choisi de travailler avec le logiciel Simapro qui est l'un des plus utilisés dans le monde, à la fois par les industriels et par la communauté scientifique [167] parce qu'il offre de plus grandes possibilités de modélisation et de paramétrage que les logiciels sectoriels. Dans ce logiciel nous avons utilisé les bases de données Ecoinvent 3.6, ELCD et Swiss Input Output Database.

IV.1.2 Unité fonctionnelle, flux de référence et frontières du système

L'unité fonctionnelle (UF) quantifie la fonction rendue par un produit ou un service (dit système). Elle permet de cadrer la comparaison des produits entre eux. Ici nous allons utiliser une UF simple pour un pull :

« Porter un pull propre une fois par semaine pendant 6 mois. »

L'interaction du système et de l'UF permet le calcul du flux de référence, c'est-à-dire la quantité de produit pour répondre à l'UF. Dans notre cas, l'UF définit une durée d'étude : 6 mois ou 26 semaines (l'équivalent d'une saison dans le prêt-à-porter). Le flux de référence correspond au ratio entre la durée de vie du produit et la durée de l'étude. Pour commencer, nous posons l'hypothèse que le pull est entretenu après chaque porter, soit une fois par semaine.

Nous posons l'hypothèse que la durée de vie d'un pull est uniquement quantifiée par son boulochage en tant que raison principale de sa mise au rebut. Par conséquent, dans les scénarios nous allons considérer que le pull a une durée de vie correspondant à chacune des classes de comportement au boulochage identifiées au Chapitre 3 pour un seuil de boulochage acceptable de 2. Ce seuil de boulochage correspond à la cotation maximale acceptable pour un pull après 2000 cycles de Martindale, ce nombre de cycles est choisi dans les cahiers des charges de nombreuses entreprises de l'habillement et est mentionné dans la norme de test 12845-2. Cette hypothèse donne les durées de vie et flux de référence suivants :

Tableau 18 : Durées de vie et flux de référence des pulls considérés.

Classe de comportement : boulochage des pulls	Fragile	Moyen	Solide
Durée de vie (en nombre de porters)	3	23	47
Flux de référence (nombre de pulls)	8,7	1,13	0,55

Dans ces scénarios d'ACV nous considérons un pull produit en Chine et commercialisé en France. Si le secteur Textile a une activité globalisée [168], [169], la Chine reste l'un des principaux producteurs de vêtement du monde et l'un des fournisseurs principaux de la France [23]. Toutes les étapes de fabrication ont été modélisées avec le mix énergétique chinois.

Nous considérons le conditionnement du produit lors de la distribution, les étiquettes des pulls et la valorisation des déchets de fabrication comme hors du scope de notre étude. La distribution du pull, hors de la phase de fabrication, n'a pas été modélisée, nous considérons que le consommateur est aller acheter son pull à pied. La fin de vie du pull est traitée comme un déchet domestique et est traité à 52% par incinération et 48% par enfouissement.

IV.1.3 Inventaire des étapes de fabrication

Le pull que nous considérons dans ces ACV est commun à tous les scénarios étudiés. La modélisation de sa fabrication est principalement réalisée à partir de données secondaires issues de documentation technique, de rapports d'ACV et d'articles scientifiques sur l'ACV de vêtements. Nous utiliserons un pull « moyen » construit à partir des caractéristiques des différents pulls utilisés dans le Chapitre 3 (Tableau 19).

Tableau 19 : Compositions des pulls testés et du pull Moyen.

Ref	Acrylique	Polyamide	Laine	Elasthane	Coton	Viscose	Polyester	Mohair	Métallisé	Lin	Alpaga
LOU	21	12	5	2			52				8
LOB	41	28	9				9	9	4		
SEQ	53	10	15	2			15	3	2		
WAV	49		20	2			9				
PZO	65	27	6	2							
PFLO	60					40					
PZR	65	27	6	2							
PIL		20				48	32				
MAR					40					60	
FRI		30	0			70					
CT	48					52					
FAN					40	60					
ENG	85		15								
PLOV	57	43									
PH		20	80								
PD	50				50						
COL		37	21		10	32					
PC					96			4			
CON	70		30								
EFI	50				50						
CP		18			82						
FLO					100						
ECO	64	9	22								
PP		100									
BB		23				49	28				
PN	100										
Pull Moyen	34	16	9	0	18	14	6	1	0	2	0

La modélisation de la phase de fabrication de ce pull est synthétisée dans le Tableau 20 ci-après et détaillée dans les Annexes.

Nous posons certaines hypothèses relatives à la fabrication pour définir l'inventaire :

- La production des fils a lieu en Chine :
 - Les matières premières considérées sont 34% acrylique ; 16% polyamide ; 10% laine ; 18% coton ; 14% viscose ; 6% polyester ; 2% lin prêtes à être filées. Le coton

a été modélisé d'après les données de Cotton Incorporated [64], [67], [165] et le reste des matières ont été modélisées en choisissant les modules correspondant les plus proches dans les bases de données. La masse totale du pull est 400 grammes

- Compte tenu du mélange de fibres, nous n'avons pas modélisé les différentes techniques de filatures associées à chacune des natures de fibre différentes. Nous avons préféré modéliser la filature d'après une filature open end majoritairement utilisée pour le coton, dont la modélisation est basée sur les travaux de Larsen et al. [54]
- Le tricotage et la confection du pull ont également lieu en Chine :
 - Nous considérons que le tricotage est effectué sur métier circulaire, les étoffes de pulls étant habituellement réalisées sur ces métiers [32] et que le pull est ensuite confectionné en coupé cousu. [52] les données de la Fédération internationale des fabricants de machines textile ITMF ont été utilisées *International Textile Manufacturers Federation (ITMF)* [170]

Tableau 20 : Synthèse de l'inventaire de la phase de fabrication du pull.

Étape de fabrication	Pull	Source	Explication
Matière première	18% Coton	Cotton Incorporated [64], [67], [165]	Composition moyenne de l'échantillon de pulls étudiés au Chapitre 3
	34% Acrylique	Module le plus proche de la base de données Ecoinvent	
	16% Polyamide		
	10% Laine		
	14% Viscose		
	6% Polyester		
	2% Lin		
Fabrication du fil (Chine)	Filature open end (14,5% de pertes)	Larsen et al. [54]	filature majoritaire
Tricotage (Chine)	Tricotage circulaire (maille cueillie, liage jersey, sans pertes)	ITMF [170]	Technologie la plus utilisée sur le marché
Ennoblement	Pas d'ennoblement	-	-
Confection (Chine)	Découpe et assemblage par couture (13% de pertes)	ITMF [170]	Technologie la plus utilisée sur le marché
Transport pendant la fabrication	Chine vers France	Basé sur les données du site Ecotransit	

IV.1.4 Modélisation d'un cycle d'usage du pull

IV.1.4.1 Inventaires de la phase d'usage du cycle de vie

La phase d'usage du pull est caractérisée par une ou plusieurs des étapes suivantes : lavage, séchage, repassage qui forment un cycle d'entretien.

La modélisation du cycle d'entretien se base sur des données secondaires issues de documentation et de la littérature scientifique (les modules sont détaillés dans les Annexes) :

- Le lavage est caractérisé par 5 programmes et entre 3 et 4 températures de lavage pour chaque programme utilisé par le consommateur. Ces programmes de lavage et températures de

lavage ont été modélisés d’après la documentation technique des machines à laver utilisées pendant les tests au porter [171].

- Le séchage se distingue principalement par l’utilisation ou non d’un sèche-linge, ici il a été modélisé à partir de la documentation technique d’un sèche-linge de la même marque que le lave-linge [172] dont la consommation électrique correspond à la consommation moyenne des sèche-linge en Europe en 2011 d’après un rapport de l’ADEME [173]. Les autres méthodes de séchage sont la suspension et le séchage à plat qui ne demandent aucune consommation énergétique.
- Le repassage a été modélisé d’après les documents de la Commission Européenne émis dans le cadre du PEF (*Product Environmental Footprint*) [22] et celles de l’ADEME dans le cadre de l’affichage environnemental [21], soit un repassage de 3 minutes pour un pull avec une consommation électrique ~0.3 kWh.

Lors de l’étape du lavage, nous avons considéré que l’utilisateur n’ajoutait pas d’adoucissant ou de produits autres que la lessive nécessaire au lavage. La lessive utilisée dans les scénarios est modélisée d’après la composition définie dans les normes de tests de solidité au lavage NF EN ISO 6330.

Pour construire la phase d’utilisation et les étapes d’entretien nous considérons 5 programmes de lavages (Coton, Synthétique, Court/Mixte, Laine, Délicat) déclinés en 3 ou 4 températures possibles pour un total de 17 cycles de lavages (voir Tableau 21). Nous considérons également un module de séchage en sèche-linge et un module de repassage pour un total de 19 modules d’entretien susceptibles de composer la phase d’utilisation du vêtement. La totalité de ces 19 modules d’entretien pourront être appelés par les différents scénarios d’usage dont la définition est l’objet de la sous partie suivante.

Tableau 21 : Programmes et températures de lavage modélisés.

T°C	COTON	SYNTHETIQUE	LAINE	CYCLE COURT/ MIXTE	DELICAT
20	-	-	modélisé	-	modélisé
30	modélisé	modélisé	modélisé	modélisé	modélisé
40	modélisé	modélisé	modélisé	modélisé	modélisé
60	modélisé	modélisé	-	modélisé	-
90	modélisé	modélisé	-	-	-

IV.1.4.2 Scenarios d’usage associés à l’entretien des consommateurs

Dans le Chapitre 2 nous avons définis 3 typologies de consommateur qui le qualifient en fonction de sa sensibilité environnementale (ENV) : Insensibles, Eveillés, Hypersensibles, de ses pratiques d’achat

(ACH) : Minimalistes, Qualitatifs, Rationnels et Impulsifs et de ses pratiques d'entretien (ENT) : Conscientieux, Soigneux et Routinier.

Les habitudes d'achat sont souvent connues des marques d'habillement notamment par la définition de leur clientèle cible et l'analyse des données qu'elles peuvent récolter sur ceux-ci, alors qu'elles n'ont pas d'informations sur les pratiques d'entretien de leurs clients.

C'est pourquoi nous choisissons de définir des scénarios d'usages à partir des classes ENT, pour la comparaison des scénarios de consommateurs, nous associons les 3 classes de comportements d'entretien des consommateurs (ENT) avec 3 scénarios d'usage. Ces trois scénarios correspondent à l'usage et l'entretien des consommateurs de la typologie d'entretien définie précédemment à la section II.5.2.3 : Soigneux, Conscientieux, Occasionnels.

Ces scénarios d'usage font appel aux 19 modules d'entretien qui représentent chaque programme et température de lavage utilisables par le consommateur ainsi que les modules de repassage et d'utilisation du sèche-linge.

Les pourcentages d'utilisation des différents modules d'entretien (programmes de lavage et températures) sont définis à partir des 3 profils d'entretien et des réponses au sondage comme illustré en Figure 60.

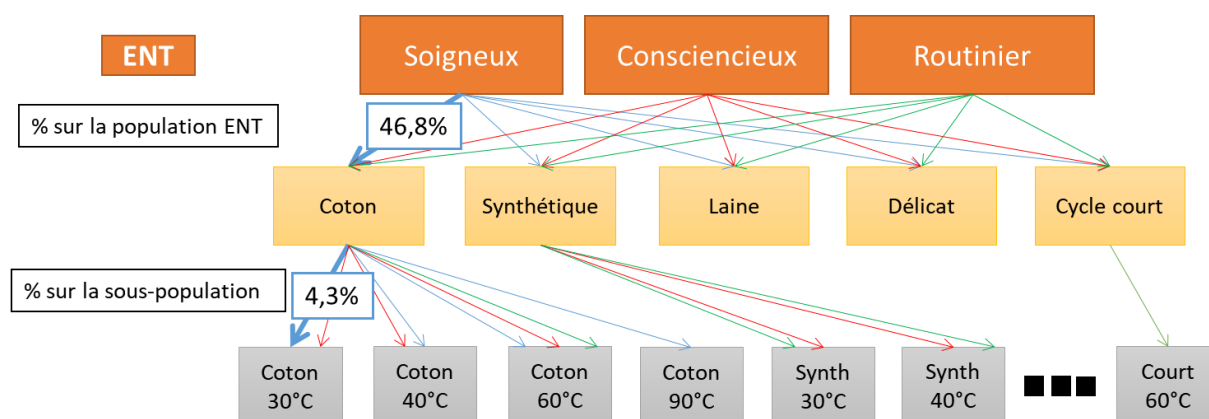


Figure 59 : Arbre de construction des scénarios d'usage.

Par exemple, 46,8% des consommateurs Soigneux utilisent le programme Coton, parmi ces consommateurs 4,3% utilisent une température de lavage de 30°C, 43,5% utilisent une température de lavage de 40°C etc. Le détail des différents taux d'utilisation des modules d'entretien qui constituent la phase d'usage dans l'ACV sont décrits dans le Tableau 22:

Tableau 22 : Taux d'utilisation des modules d'entretien par les scénarios d'usage pour l'ACV.

ROUTINIER						
	39,3%	29,9%	26,5%	2,6%	1,7%	% d'utilisation des programmes
T°C	Coton	Synthétique	Laine	Cycle court/ Mixte	Délicat	
20	0,0%	0,0%	41,9%	1,9%	5,9%	
30	19,6%	43,4%	51,6%	58,5%	88,2%	Taux d'utilisation Sèche-linge
40	35,3%	47,2%	6,4%	33,9%	5,9%	21,5%
60	39,2%	7,5%	0,0%	5,7%	0,0%	Repassage
90	5,9%	1,9%	0,0%	0,0%	0,0%	6,6%
CONSCIENCIEUX						
	62,6%	15,4%	14,29%	6,59%	1,1%	% d'utilisation des programmes
T°C	Coton	Synthétique	Laine	Cycle court/ Mixte	Délicat	
20	0,0%	0,0%	38,5%	9,5%	17,2%	
30	28,6%	62,5%	59,0%	61,9%	69%	Taux d'utilisation Sèche-linge
40	30,6%	32,5%	2,6%	28,6%	13,8%	25,0%
60	40,8%	5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Repassage
90	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	16,7%
SOIGNEUX						
	46,8%	21,3%	21,3%	6,4%	4,3%	% d'utilisation des programmes
T°C	Coton	Synthétique	Laine	Cycle court/ Mixte	Délicat	
20	0,0%	0,0%	18,7%	0,0%	17,6%	
30	4,3%	25,0%	75,0%	60,0%	70,6%	Taux d'utilisation Sèche-linge
40	43,5%	68,7%	6,2%	40,0%	11,8%	11,8%
60	39,1%	6,2%	0,0%	0,0%	0,0%	Repassage
90	13,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	82,3%

Ainsi, nous avons utilisé la typologie d'entretien (ENT) pour construire différents scénarios d'usage qui serviront à quantifier la phase d'usage dans nos ACV. Les deux typologies de consommateur ACH et ENV sont utilisées pour définir les profils de consommateurs que nous allons analyser et comparer dans les scénarios d'ACV. Le croisement de ces deux typologies identifie les consommateurs en 12 profils (voir II.6.1 – Figure 33), parmi lesquels nous sélectionnons les profils dont l'effectif représente plus de 3% de l'effectif de la population sondée, soit 9 profils ACH/ENV :

- Impulsif – Eveillé

- Impulsif – Insensible
- Minimaliste – Eveillé
- Minimaliste – Hypersensible
- Minimaliste – Insensible
- Qualitatif – Eveillé
- Qualitatif – Hypersensible
- Rationnel – Eveillé
- Rationnel – Insensible

À chacun de ces profils est associé un scénario d'usage particulier, modélisé selon la répartition de son effectif entre les 3 profils d'entretien définis à la sous partie précédente : Soigneux, Conscientieux, Occasionnels (Tableau 23).

Tableau 23 : Répartition des effectifs des profils de consommateurs entre les profils d'entretien.

	Routinier	Conscientieux	Soigneux
Impulsif	47,1%	43,1%	9,8%
Eveillé	50%	50%	0%
Insensible	46,7%	36,7%	16,7%
Minimaliste	50%	40,2%	9,8%
Eveillé	38,1%	42,9%	19,1%
Hypersensible	54,6%	45,5%	0%
Insensible	53,9%	35,9%	10,3%
Qualitatif	25,5%	47,3%	27,3%
Eveillé	24%	48%	28%
Hypersensible	33,3%	33,3%	33,3%
Rationnel	63,5%	19,1%	17,5%
Eveillé	65,5%	20,7%	13,8%
Insensible	51,9%	22,2%	25,9%
Total général	47,4%	37,1%	15,5%

IV.1.4.3 Prise en compte de la réparation dans le cycle de vie

La réparation est une pratique très courante dans l'entretien des vêtements, cependant elle occupe une place particulière dans l'ACV. C'est une étape de maintenance qui agit également sur la phase d'utilisation et le flux de référence des scénarios d'ACV par l'augmentation de la durée de vie du produit et de son nombre d'utilisations.

La réparation des vêtements est un sujet peu exploré dans la littérature, si la plupart des chercheurs s'accordent sur le fait que c'est une pratique bénéfique par l'extension de durée de vie qui en résulte,

il n'existe pas de recherche pour définir la quantité de durée de vie produite par la réparation, les différents types de réparation possibles et en faire l'inventaire de cycle de vie (ICV).

Les données récoltées au Chapitre 2 nous ont permis de définir un taux de réparation pour chaque sous profil qui correspond au pourcentage de l'effectif qui a déclaré réparer leurs vêtements (II.5.2.4-Figure 34). Compte tenu de ces données, nous avons choisi de modéliser la réparation dans l'ACV avec les hypothèses suivantes :

- Nous posons l'hypothèse que la réparation est effectuée à la main, et que les flux nécessaires à la réparation sont négligeables.
- Nous posons l'hypothèse que le produit est réparé une unique fois par cycle de vie et que la durée de vie supplémentaire créée par cette réparation est de 25% de la durée de vie du produit (Tableau 24).

Tableau 24 : Durées de vie des produits et flux de référence de l'ACV en fonction de la classe de produit après ajout de la réparation.

Classe de comportement au boulochage des pulls	Fragile	Moyen	Solide
Durée de vie (nombre de porters)	3	23	47
Durée de vie supplémentaire (nombre de porters)	1	6	12
Flux de référence avec réparation	6,5	0,9	0,44
Profils de consommateurs	Fragile	Moyen	Solide
Impulsif – Eveillé	6,50	0,93	0,46
Impulsif – Insensible	6,50	1,04	0,51
Minimaliste – Eveillé	6,50	0,90	0,44
Minimaliste – Hypersensible	6,50	0,93	0,46
Minimaliste – Insensible	6,50	1,00	0,50
Qualitatif – Eveillé	6,50	0,96	0,48
Qualitatif – Hypersensible	6,50	0,90	0,44
Rationnel – Eveillé	6,50	0,90	0,45
Rationnel – Insensible	6,50	1,04	0,51

IV.2 Analyse des impacts environnementaux

Les différents flux définis lors de l'inventaire de cycle de vie sont traduits en impacts environnementaux potentiellement générés. Pour cela, nous avons choisi la méthode de calcul *ILCD 2011 Midpoint+*, selon les recommandations de l'ADEME et de la Commission Européenne [174]–[176]. Les seize catégories d'impacts considérées par la méthode de calcul sont répertoriées dans le Tableau 25. Toutes ne sont pas pertinentes pour notre étude, nous avons réduit cette liste par la suite.

Tableau 25 : Catégories d'impacts considérés par la méthode de calcul ILCD.

CATÉGORIES D'IMPACTS	UNITÉ	CORRESPONDANCE
Changement climatique (CC)	Kg CO2 eq	Estimation de l'augmentation de l'effet de serre
Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (OA)	Kg CFC-11 eq	Estimation de la dégradation de la couche d'ozone stratosphérique par les émissions de substances telles que les gaz chlorés et bromés à longue durée de vie
Toxicité humaine – cancers (THC)	CTUh (unité de toxicité comparative pour l'Homme)	Rends 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 autre que cancers (TH)	CTUh	
Particules inorganiques respiratoires (P)	Kg PM2.5 eq	Rends compte des effets nocifs pour la santé humaine des émissions de particules (PM)
Rayonnements ionisants sur la santé humaine (RIS)	kBq U235 eq	Représente les effets néfastes des rejets radioactifs
Rayonnements ionisants sur les écosystèmes (RIE)	CTUe	
Formation photochimique d'ozone (OP)	Kg NMVOC eq	Estimation de la formation d'ozone au niveau du sol, dans la troposphère
Acidification de l'air (A)	Molc H+ eq	Estimation des effets des substances acidifiantes
Eutrophisation terrestre (ET)	Molc N eq	
Eutrophisation aquatique (eau douce) (Ead)	kg P eq	Estimation de la quantité de nutriments émis, qui atteignent ce compartiment final d'eau douce
Eutrophisation marine (EM)	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)
Écotoxicité aquatique (EA)	CTUe	Estimation de la fraction potentielle d'espèces touchées, intégrées dans le temps et l'espace par unité de masse d'une substance chimique émise
Occupation des sols (OS)	kg C deficit	Variation du taux de matière organique du sol
Épuisement des ressources en eau (ERE)	M3 water eq	Rareté de l'eau douce
Épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables (ERMFR)	kg Sb eq	Quantité de ressources disponibles pour un citoyen du monde

IV.2.1 Choix des catégories d'impacts

Pour choisir les catégories d'impact que nous allons illustrer dans l'étude, nous suivons les recommandations de l'Agence Européenne pour l'Environnement EEA [22] sur la prise en compte

d'impacts représentatifs de la consommation en ressource (eau et ressources primaires), de l'utilisation des sols, de l'émission de gaz à effet de serre et des effets de divers polluants chimiques (Composés Organiques Volatiles, Phosphore, etc.). Nous choisissons les catégories d'impacts de la méthode *ILCD 2011 Midpoint+*, qui classe les catégories d'impacts en fonction de leur qualité et de leur robustesse en quatre niveaux :

- Le niveau « I » : recommandé ou satisfaisant
- Le niveau « II » : recommandé mais a besoin d'amélioration
- Le niveau « III » : recommandé mais à appliquer avec prudence
- Le niveau « interim » : la méthode de calcul de l'impact est la meilleure actuellement disponible mais il faut plus de recul pour pouvoir la recommander fermement.

Les impacts pertinents que nous avons choisis pour comparer nos scénarios d'ACV sont :

- Changement climatique (CC) : recommandé l' EEA [177] , indice I
- Appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (OA) : un des impacts les plus robustes de la méthode, indice I
- Rayonnements ionisants sur les écosystèmes (RIE) : le mix énergétique français est composé en grande partie du nucléaire, cet impact met en évidence l'effet de l'utilisation d'électricité française, indice interim.
- Occupation des sols (OS), recommandé par l'Agence Environnementale Européenne (EEA) dans un rapport de 2019, l'industrie textile étant l'industrie qui utilise le plus de surface dans sa chaîne de valeur, après l'agro-alimentaire [177], indice III.
- Épuisement des ressources en eau (ERE) : l'entretien est un grand consommateur d'eau, cet impact est donc pertinent pour comparer les scénarios d'usages de nos travaux, recommandé par l'EEA [177], indice III.
- Épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables (ERMFR), recommandé par l'EEA [177] indice II.

IV.2.2 Résultats d'analyses environnementales

Les scénarios d'ACV possibles sont les combinaisons de 9 profils de consommateurs définis par la combinaison entre un profil d'achat et un profil environnemental, chacun étant associé à un scénario d'usage particulier (voir section IV.1.4.2). À ces 9 profils de consommateurs s'ajoutent 3 profils de produits possibles (Fragile, Moyen, Solide), ce qui représente 27 scénarios différents.

IV.2.2.1 ACV cradle to grave, profil moyen

Dans un premier temps nous souhaitons illustrer les résultats d'ACV sur un unique scénario de consommateur : le profil Rationnel – Insensible avec un pull Moyen. Nous avons choisi ce profil de consommateur parce qu'il correspond à un profil qui peut être considéré comme moyen ou médian (Figure 60).

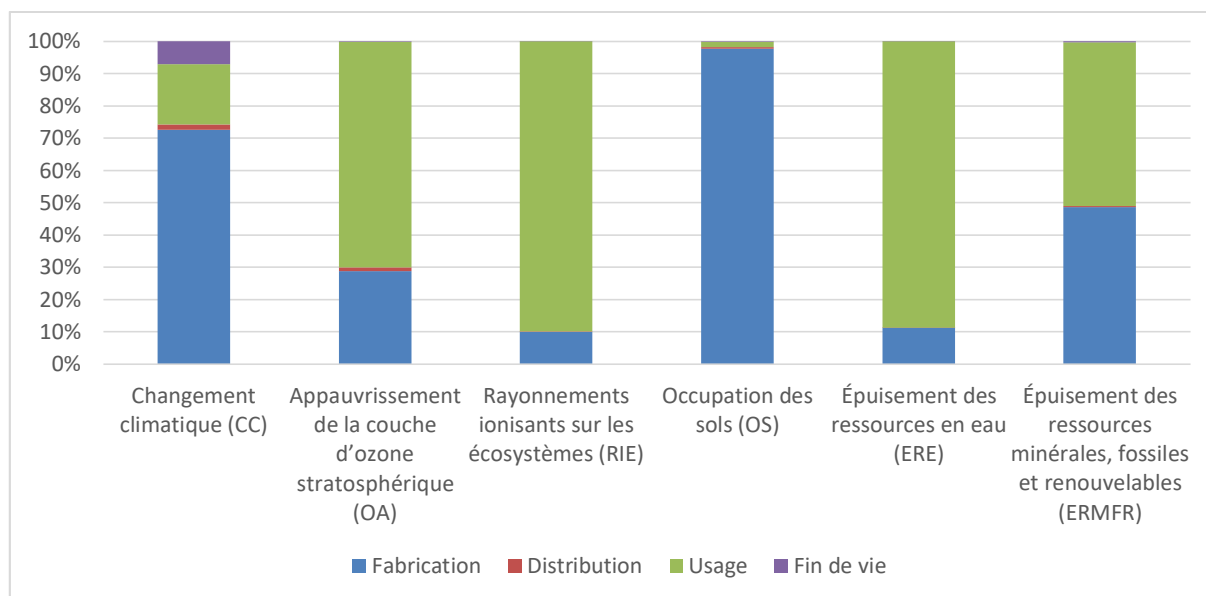


Figure 60 : Impacts environnementaux d'un pull moyen porté par un consommateur Rationnel – Insensible.

Dans nos travaux nous ne nous intéressons pas à la fabrication du pull qui est une étape commune à tous les scénarios que nous avons étudiés. Cependant, on peut noter que la fabrication est la plus grande source d'impact pour 3 catégories d'impacts : CC ~73%, OS ~98%. La phase d'usage quant à elle est la cause majoritaire d'impacts pour les catégories d'impacts suivants : OA ~70%, RIE ~90%, ERE ~89% et ERMFR ~51%. Ce dernier impact est intéressant parce qu'il représente les consommations du système en matières premières, en minéraux, en ressources non-renouvelables et en ressources renouvelables comme le bois ou l'eau. Cet impact est alimenté à la fois par les phases de fabrication et d'usage qui y contribuent presque à hauteur égale 49% et 51%.

En dissociant les contributions relatives des différents scénarios d'usages (Routinier, Conscientieux et Soigneux) on observe que le scénario d'usage « Soigneux » est celui qui produit le plus d'impact sur l'environnement sauf pour les impacts CC et OS (Figure 61).

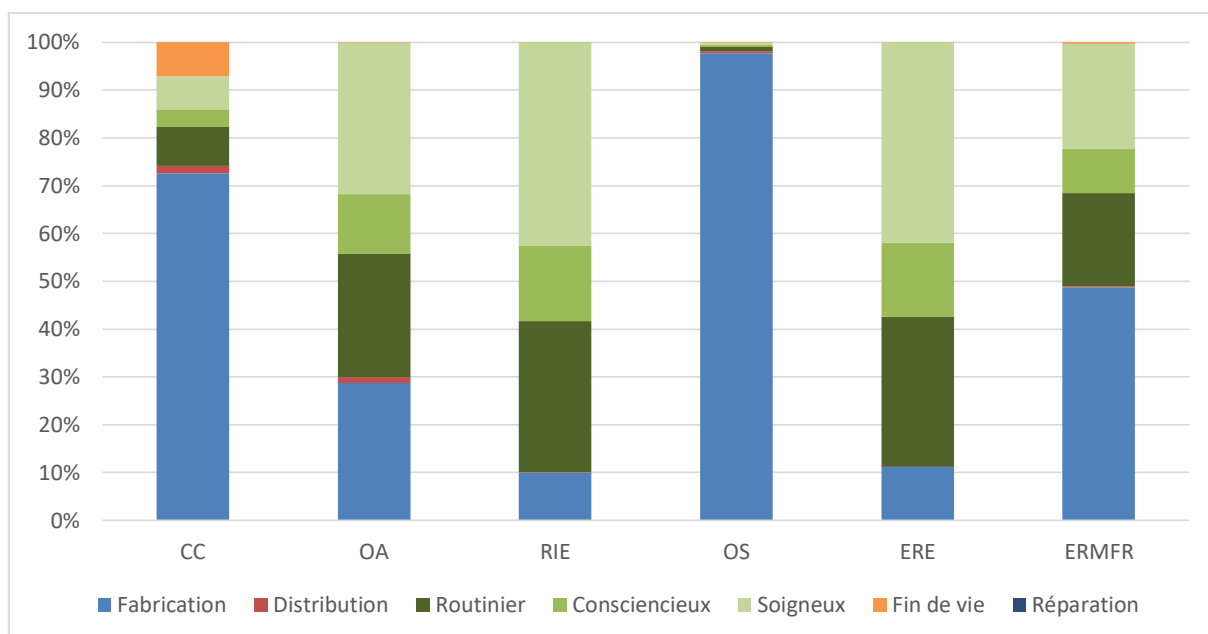


Figure 61 : Impacts environnementaux d'un pull Moyen porté par un consommateur Rationnel – Insensible avec le détail des scénarios d'usage utilisés par ces consommateurs.

Tableau 26 : Taux d'utilisation des scénarios d'usage par le consommateur Rationnel - Insensible et impacts environnementaux associés.

RATIONNEL - INSENSIBLE	ROUTINIER	CONSCIENCIEUX	SOIGNEUX
TAUX D'UTILISATION	51,85%	22,22%	25,93%
CC	8%	4%	7%
OA	26%	13%	32%
RIE	32%	16%	43%
OS	1%	0,39%	0,46%
ERE	31%	16%	42%
ERMFR	19%	9%	22%

Bien que son taux d'utilisation par les consommateurs Rationnel – Insensible ne soit que de ~26% (Tableau 26), le profil ENT « Soigneux » est le profil ENT qui produit le plus d'impact des trois profils d'entretien. La différence significative entre ce profil « Soigneux » et les autres est l'utilisation conséquente du fer à repasser (Taux d'utilisation du repassage de 82,3%). Cette étape de repassage représente une dépense énergétique supplémentaire totalement allouée au produit qui vient intensifier les impacts environnementaux de la phase d'utilisation.

IV.2.2.2 Comparaisons des scénarios selon les profils de consommateurs

Dans un premier temps, nous avons comparé entre eux les impacts environnementaux des 12 profils de consommateurs sur un pull avec une durée de vie de 26 porters et relevé quels étaient les profils qui produisaient le maximum (qui correspond à 100% des impacts de la catégorie considérée) et le minimum d'impacts pour chaque catégorie d'impacts (Tableau 27). Les scénarios d'ACV diffèrent uniquement en fonction de l'usage et du taux de réparation associé aux sous profils.

Tableau 27 : Scénarios correspondant aux extremums pour chaque impact environnemental pour un pull Moyen.

CATEGORIE D'IMPACT	SCENARIO MINIMUM	%	SCENARIO MAXIMUM	%
CC	Minimaliste - Hypersensible	90%	Rationnel - Insensible	100%
OA	Minimaliste - Hypersensible	78%	Qualitatif - Hypersensible	100%
RIE	Minimaliste - Hypersensible	69%	Qualitatif - Hypersensible	100%
OS	Qualitatif - Hypersensible	87%	Rationnel - Insensible	100%
ERE	Minimaliste - Hypersensible	70%	Qualitatif - Hypersensible	100%
ERMFR	Minimaliste - Hypersensible	84%	Rationnel - Insensible	100%

On constate que selon son comportement d'achat et sa sensibilité environnementale, le consommateur influe sur les résultats d'impacts environnementaux de son pull (Tableau 27). La variation peut atteindre 31% (entre 69 et 100%). Le consommateur qui émet le moins d'impact est celui du profil Minimaliste – Hypersensible (M-H) sauf pour l'impact Occupation des Sols (Qualitatif-Hypersensible). Les consommateurs du sous profil M-H ont le plus faible taux de repassage de tous les sous profils, ce qui est la principale cause de ce résultat.

Parmi les 8 sous profils restant, ceux qui émettent le plus d'impacts sont Qualitatif – Hypersensible (Q-H) pour une moitié des six catégories d'impacts étudiés et Rationnel – Insensible (R-I). Le premier sous profil a un taux de repassage plus important que le second, alors que le sous profil Rationnel – Insensible est celui qui a le plus petit taux de réparation : 29%. Le flux de référence de ce scénario est 0,98 contre 0,76 pour le scénario Q-H. Cette différence de flux de référence engendre une

augmentation significative sur les impacts « Changement Climatique », « Occupation des sols » et « Épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables » principalement issus de la phase de fabrication et de distribution du produit.

Il est néanmoins intéressant de noter que, même si la durée de vie est généralement un paramètre très influent, notamment par son action sur le flux de référence, ici la différence de flux de référence ne suffit pas pour déterminer le scénario le plus impactant entre les scénarios de consommateur. Le scénario de consommateur Q-H a le plus petit flux de référence, grâce à son fort taux de réparation, pourtant il est le scénario le plus polluant sur la moitié des impacts considérés (Tableau 27).

En comparant les scénarios de consommateurs entre eux on remarque que le fort taux de réparation et l'augmentation de durée de vie qui en résulte ne suffisent pas à compenser l'accumulation des impacts d'une phase d'usage plus polluante :

- Le scénario minimum Minimaliste-Hypersensible (M-H) combine une phase d'usage moins polluante et un taux de réparation dans la moyenne haute comparativement aux autres sous profils de consommateurs (voir graphiques des taux de réparation des sous profils Figure 34, section II.6.1).
- Le scénario Rationnel-Insensible (R-I) pour un pull Moyen, avec le flux de référence le plus élevé, n'est le plus impactant que sur 3 des 6 impacts, ceux principalement issus de la phase de fabrication et de distribution.

Ces résultats nous permettent de conclure qu'une part non négligeable des impacts de la phase d'utilisation dépend principalement de l'utilisation du repassage au travers du profil d'entretien « Soigneux ». Le repassage est néanmoins une pratique présente dans les autres profils dans une plus faible mesure. Les programmes et températures de lavage utilisés ne génèrent pas de différence significative sur les impacts environnementaux des scénarios. Cela peut s'expliquer par la faible différence entre tous ces modules et par les taux d'utilisation de ces modules par les sous profils assez peu différenciés pour créer une variation de résultat significative.

Dans cette section nous avons défini une méthodologie pour mieux inclure le comportement du consommateur dans l'ACV en construisant la phase d'utilisation des vêtements à partir de profils de consommateurs. Nous avons montré qu'il existait un écart de 10% à 30% entre les impacts environnementaux des pulls en fonction des profils de consommateurs qui les portaient et de la catégorie d'impact considérée. L'analyse des résultats d'ACV des différents profils de consommateurs a corroboré la conclusion initiale émise au Chapitre 2 : un profil de consommateur vertueux (en terme d'achat ou de sensibilité environnementale) n'implique pas de plus faibles impacts environnementaux,

en effet, les sous profils de consommateurs qui produisent le plus et le moins d'impacts environnementaux appartiennent tous deux à la typologie de consommateur Hypersensible.

Le repassage, pratique qui indique une forte implication du consommateur dans l'entretien de ses vêtements et qui est souvent associée aux soins des vêtements par ceux-ci, est une source importante d'impacts environnementaux

La réparation par son action sur la durée de vie du produit est une pratique permettant de réduire les impacts environnementaux des vêtements. Sa prise en compte dans la définition de l'usage par la construction des profils de consommateur à montrer qu'il s'agissait également d'un paramètre qui différenciait beaucoup les consommateurs. Cependant il est très difficile de qualifier ce gain de durée de vie et cela fait l'objet de peu de recherches.

Finalement, le paramètre qui distingue le plus les sous profils entre eux est leur taux de réparation et l'augmentation de durée de vie résultante. Cela confirme et renforce encore que la durée de vie est l'un des paramètres les plus influents sur les impacts environnementaux des vêtements.

IV.2.2.3 Comparaison des scénarios selon la qualité des pulls

Nous allons maintenant examiner les impacts environnementaux des sous profils de consommateurs extrêmes avec un impact maximum (Qualitatif – Hypersensible (Q-H), Rationnel – Insensible (R-I)) et minimum (Minimaliste – Hypersensible (M-H)). Nous faisons varier la classe du produit : Fragile, Moyen, Solide. Le Tableau 28 suivant récapitule les durées de vie et flux de références pour chaque scénario étudié :

Tableau 28 : Durées de vie et flux de référence des scénarios.

	TYPE DE PRODUIT	MINIMALISTE – HYPERSENSIBLE	QUALITATIF - HYPERSENSIBLE	RATIONNEL - INSENSIBLE
TAUX DE RÉPARATION		70,83%	91,67%	29,63%
DURÉE DE VIE DU PRODUIT	Fragile	3		
	Moyen	23		
	Solide	47		
DURÉE DE VIE SUPPLÉMENTAIRE D'UNE RÉPARATION	Fragile	1		
	Moyen	6		
	Solide	12		
DURÉE DE VIE DANS LE SCÉNARIO	Fragile	4	4	3
	Moyen	27	29	25
	Solide	55	58	51
FLUX DE RÉFÉRENCE DANS LE SCÉNARIO	Fragile	7,01	6,64	7,89
	Moyen	0,95	0,91	1,05
	Solide	0,47	0,45	0,51

Notre objectif est d’observer et quantifier les variations d’impacts induites par les différents profils de consommateurs en fonction du type des produits.

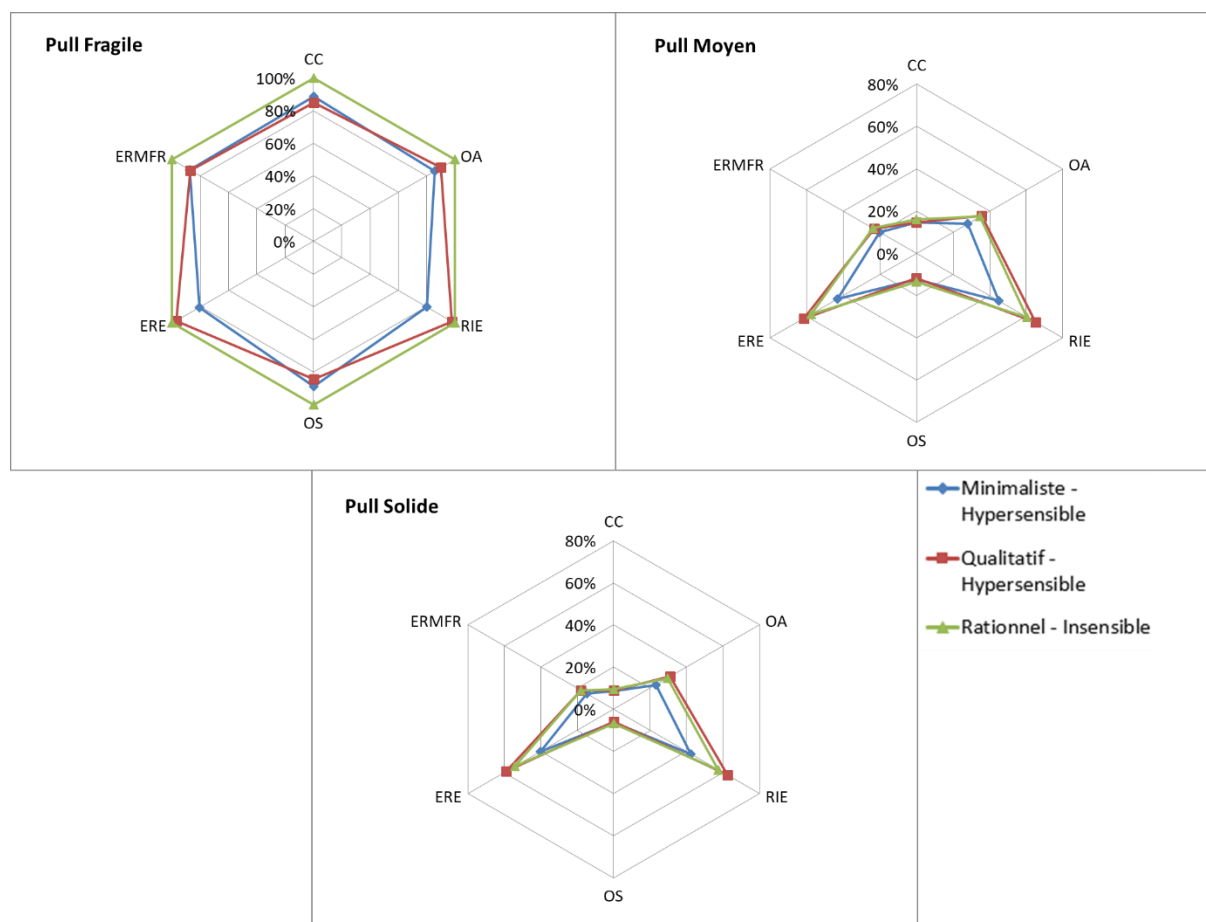


Figure 62 : Impacts environnementaux des scénarios de produits et de consommateurs.

Ces résultats (Figure 62) montrent que la qualité du pull est un paramètre plus important que le comportement du consommateur.

Cette conclusion se confirme aussi dans le cas des produits appartenant à la classe Solide. Dans ces cas l'influence de la réparation s'estompe bien que la « quantité » de durée de vie ajoutée soit supérieure et c'est la phase d'usage qui devient prépondérante par effet d'accumulation pour déterminer le scénario qui produit le plus d'impact. Dans le cas des produits Solide, le sous profil Qualitatif-Hypersensible (Q-H) génère le plus d'impact sur 4 des 6 impacts environnementaux considérés (Tableau 29). Dans le cas des produits Fragile, l'influence de la réparation et du flux de référence est au contraire magnifiée par la faible durée de vie des produits. C'est le sous profil de consommateur R-I avec le plus faible taux de réparation qui produit le plus d'impact. Au contraire, plus un produit a une longue durée de vie plus les effets de la réparation sont dilués.

Tableau 29 : Comparaison des impacts environnementaux des différents scénarios.

CATEGORIE D'IMPACT	PRODUIT FRAGILE - SCENARIO MAXIMUM	PRODUIT MOYEN - SCENARIO MAXIMUM	PRODUIT SOLIDE - SCENARIO MAXIMUM
CC	Rationnel - Insensible	Rationnel - Insensible	Rationnel - Insensible
OA	Rationnel - Insensible	Qualitatif - Hypersensible	Qualitatif - Hypersensible
RIE	Rationnel - Insensible	Qualitatif - Hypersensible	Qualitatif - Hypersensible
OS	Rationnel - Insensible	Rationnel - Insensible	Rationnel - Insensible
ERE	Rationnel - Insensible	Qualitatif - Hypersensible	Qualitatif - Hypersensible
ERMFR	Rationnel - Insensible	Rationnel - Insensible	Qualitatif - Hypersensible

La Figure 62 illustre également que selon notre modélisation même si un consommateur adopte un usage très responsable de son pull, ce comportement ne modifie pas significativement l'impact environnemental du vêtement. La qualité reste le critère dominant. Pour quantifier ce phénomène nous avons calculé la différence d'impacts entre les scénarios de consommateurs pour chacun des types de pulls et la différence d'impacts entre les scénarios de produits quel que soit le consommateur (Tableau 30). Ainsi on voit que l'écart maximal moyen entre les profils de consommateur est de 22% tandis que le minimum d'écart moyen entre les types de pulls est de 23%.

Tableau 30 : Comparaison entre le potentiel de gain entre différents scénarios consommateurs et produits

CATEGORIE D'IMPACT	ECART MAXIMAL ENTRE LES SCENARIOS CONSOMMATEUR POUR CHAQUE TYPE DE PULLS :			ECART MOYEN ENTRE LES TYPES DE PULLS QUEL QUE SOIT LE CONSOMMATEUR :		
	FRAGILE	MOYEN	SOLIDE	FRAGILE-MOYEN	FRAGILE-SOLIDE	MOYEN-SOLIDE
CC	15%	10%	10%	76%	82%	40%
OA	14%	22%	25%	59%	64%	15%
RIE	20%	31%	32%	36%	39%	5%
OS	16%	13%	12%	78%	85%	50%
ERE	19%	30%	32%	38%	42%	6%
ERMFR	13%	16%	19%	69%	75%	25%
MOYENNE	16%	20%	22%	60%	64%	23%

Compte tenu de ces résultats, nous pouvons conclure que :

- Le comportement au boulochage d'un pull a un effet direct sur l'impact environnemental parce qu'il modifie sa durée de vie et donc le flux de référence. La qualité du pull reste un facteur primordial pour déterminer les impacts environnementaux d'un vêtement.
- Dans notre modélisation, la durée de vie dépend uniquement du type de pull et du taux de réparation du sous profil considéré. Le consommateur peut également influencer sur la durée de vie de ses vêtements au travers de ses pratiques d'entretien, en effet ici nous avons illustré les impacts environnementaux des différentes pratiques d'entretien des consommateurs mais nous n'avons pas considéré l'usure engendrée par ces pratiques et ses conséquences sur la durée de vie des pulls.
- Dans cette modélisation, bien qu'en ayant affiné et précisé de nombreux points relatifs au consommateur, à son attitude et à ses pratiques, nous ignorons les conséquences sur la durée de vie des vêtements de nombreuses décisions prise par le celui-ci : renouvellement prématuré du produit, customisation et réparations lourdes, changement de fonction, etc.

Dans la prochaine section nous allons nous intéresser aux sensibilités du consommateur sur les différents paramètres qui peuvent influencer sur la durée de vie de ses pulls et sur leurs impacts environnementaux.

IV.3 Analyse de sensibilités

Dans cette partie nous allons examiner la sensibilité des scénarios selon plusieurs paramètres. Dans la construction des scénarios précédemment étudiés, nous avons posé des hypothèses sur certaines décisions ou sensibilités du consommateur dans son usage et son rapport au produit notamment le nombre de porters effectués avant lavage du vêtement et la sensibilité du consommateur au

boulochage. Ces hypothèses ont été posées en conséquence d'une absence de littérature précise à ces sujets, ce qui motive notre choix d'examiner la sensibilité de nos scénarios en fonctions de ces paramètres.

IV.3.1 Sensibilité au nombre de porters avant lavage

Parmi les hypothèses posées concernant la phase d'usage des pulls, nous avons fixé la fréquence des cycles d'entretien à un cycle par porter. Cette hypothèse d'« un porter pour un lavé » est la plus simple représentation du porter, elle permet d'éviter de poser la question de la source de l'usure du vêtement : l'usure du vêtement vient-elle majoritairement du lavage ou du porter lors de l'usage ?

Pour de nombreux types de vêtements, notamment les couches « extérieures » comme les pulls ou les pantalons, il n'est pas rare que le vêtement soit entretenu après plusieurs porters par les consommateurs [56], [57], [70], [108], de nombreux consommateurs avec lesquelles nous nous sommes entretenus ont mentionné cette pratique :

- Valérie, 54 ans : « *Je lave systématiquement après l'avoir porté pour les hauts, les jeans je ne les laves pas tous les jours.* »
- Julie, 24 ans : « *Selon ce que c'est comme vêtements je le porte plusieurs fois avant de le laver.* »
- Manon, 26 ans : « *un t-shirt je vais le garder deux jours sans le laver enfin, il va faire 2 utilisations. Un jean, à moins que je me tâche, il va faire beaucoup plus d'utilisations tu vois, ça dépend des fringues.* » ; « *Sauf si c'est en plein été et que j'ai vraiment transpiré mais un jeans, en hiver si tu te salis pas, [...] il peut tenir 15 jours sans être lavé. Alors bien sûr je le mets pas 15 jours d'affilés [...].* »
- François, 49 ans : « *Un vêtement où je suis à l'arrêt, et que je suis au repos dedans et qu'au point de vue transpiration dedans il y a pas grand-chose, je vais le remettre sur un cintre, je vais l'aérer une journée ou 2, je vais le remettre une fois, 2 fois et ensuite, il passe à la lessive. On va dire que les fringues, en moyenne une fois et demie, elles sont portées une fois et demie ou 2 fois.* »

IV.3.1.1 Source de l'usure : le porter ou le lavage

Dans la section III.1.1 nous avons évoqué le mécanisme du boulochage et les paramètres impliqués dans ce mécanisme. Le boulochage est une manifestation de la capacité des fibres à migrer vers la surface de l'étoffe et à s'enchevêtrer entre elles. Cette capacité des fibres à migrer vers la surface de l'étoffe est une donnée très importante dans l'étude du relargage des microfibres textiles lors du lavage, sujet qui fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années. À ce sujet, la littérature indique que l'agitation des vêtements lors du lavage et l'action de la lessive pourraient favoriser la

mobilité des fibres dans les structures textiles et leur extraction [178], [179]. Les travaux d'Agarwal et al. [180] ont montré que le lavage avait une influence sur les propriétés mécaniques des étoffes parmi lesquelles des caractéristiques influençant le boulochage. Ces éléments nous amènent à penser que si les bouloches ne sont pas causées par le lavage, le lavage contribue à favoriser leur apparition lors du porter en facilitant la circulation des fibres au sein de la structure textile. Cependant, lors des tests au porter, la cotation au boulochage des produits était majoritairement identique juste avant et juste après lavage ce qui nous permet de conclure qu'à priori le boulochage n'était pas causé par le lavage pour la série de pulls étudiés (Tableau 31).

Tableau 31 : Différences de cotation moyenne de boulochage avant et après le lavage pour différents nombre de porter.

	Porter 2	Porter 3	Porter 4	Porter 5	Porter 10
PC1	0,1	0	0	0	0
PC2	0	0	0	0	0
EFI	0,5				
PZ1	0,3	0	0	0	0
ECO	0	0,6	0	0	
PD	0,6				
BB1	0	0	0	0,2	
WAV	0	0	0	0	
PN1	0,6	0	0	0	0
PN2	0,4	0,3	0	0	
CP1	0				
CP2	0	0	0	0	
PP1	0	0	0	0	
PP2	0	0			
ENG	0,3	0	0	0	0
BB2	0	0	0	0	0,2
BB3	0,3	0	0	0	0
SEQ1	0	0	0	0	
SEQ2	0	0,2	0	0	
FRI	0				
PZ2	0,2	0	0		
PZ3	0,5	0	0	0	0
CT	0	0	0	0	
PIL	0,5	0	0	0	
LOU	0	0	0		
LOB	0				
FLO	0	0	0	0	0
CON	0,5				

Sachant que nous ne sommes pas capables de quantifier les contributions respectives des lavages et des porters au boulochage, nous avons choisi de comparer deux cas extrêmes dans lesquels l'usure proviendrait exclusivement soit du porter soit de l'entretien ce qui nous permet de borner les

conséquences sur les impacts environnementaux de l'augmentation du nombre de porter avant lavage.

IV.3.1.2 Description des scénarios

Nous reprenons les éléments de bases des scénarios étudiés précédemment que nous avons définis dans la section IV.2.2. L'unité fonctionnelle considérée est la suivante :

« Porter un pull propre une fois par semaine pendant 6 mois. »

Et nous gardons les paramètres suivants :

- Soit D_{UF} le nombre de semaines dans une saison : 26
- Soit DV la durée de vie du pull
- Soit FR , le flux de référence, $FR = D_{UF}/DV$
- Soit N le nombre de porters avant que le seuil de tolérance soit atteint et le produit soit mis au rebut

Dans l'hypothèse où l'on porte X fois avant de laver le pull, on considère que les deux cas extrêmes identifiés induisent les changements suivants dans les paramètres au sein des scénarios :

- Soit le cas **UsP**, où l'usure est uniquement issue du porter, dans ce cas la durée de vie $DV = N$
- Soit le cas **UsL**, où l'usure est uniquement issue du lavage, dans ce cas la durée de vie est égale au nombre de lavages avant dégradation, $DV = N*X$
- Soit N_{ENT} , le nombre d'entretiens réalisés au cours de l'étude, $N_{ENT} = D_{UF}/X$

A partir de ces paramètres, nous avons comparé 7 scénarios, basés sur le profil de consommateur « Minimaliste – Hypersensible » et un pull « Moyen » :

- Scénario **1P:L** : scénario de base avec $X=1$ qui correspond au scénario étudié en section 2.
- Scénarios **2P:L UsP** et **2P:L UsL** : les deux cas extrêmes avec $X = 2$ (2 porters avant lavage).
- Scénarios **5P:L UsP** et **5P:L UsL**, les deux cas extrêmes avec $X = 5$.
- Scénarios **10P:L UsP** et **10P:L UsL**, les deux cas extrêmes avec $X = 10$.

Le Tableau 32 illustre les différents paramètres considérés pour les scénarios 1P:L, 2P:L UsP et 2P:L UsL. L'ensemble des paramètres de l'ACV pour les 7 scénarios appliqués aux trois classes de pulls est mentionné en Annexe.

Tableau 32 : Comparaison des paramètres entre les scénarios 1P:L, 2P:L UsP et 2P:L UsL

2 PORTER AVANT ENTRETIEN (2P:1L)		BASE (1P:1L)	USP	USL
DUF (SEMAINES)		26		
MOYEN	DV	23	23	46
	FR	1,1	1,1	0,413
	N _{ENT}	26	13	13

5 PORTER AVANT ENTRETIEN (5P:1L)		Base (1P:1L)	USP	USL
MOYEN	DV	23	23	115
	FR	1,1	1,1	0,6
	N _{ENT}	26	13	13

10 PORTER AVANT ENTRETIEN (10P:1L)		Base (1P:1L)	USP	USL
MOYEN	DV	23	23	230
	FR	1,1	1,1	0,6
	N _{ENT}	26	13	13

Les différentes valeurs des paramètres nous permettent une première conclusion sur les résultats que nous pouvons attendre de ces scénarios :

- Dans tous les cas l'augmentation du nombre de porters avant lavage a un impact positif sur les impacts environnement puisqu'elle permet une réduction du nombre de cycles d'entretien tout au long du cycle de vie du produit ($N_{ENT} = D_{UF}/X$).
- Ce gain sera d'autant plus fort que l'usure proviendra du cycle d'entretien, en effet dans ce cas l'augmentation de la durée de vie ($DV = N \cdot X$) permettra une forte réduction des impacts environnementaux

IV.3.1.3 Analyse des impacts environnementaux

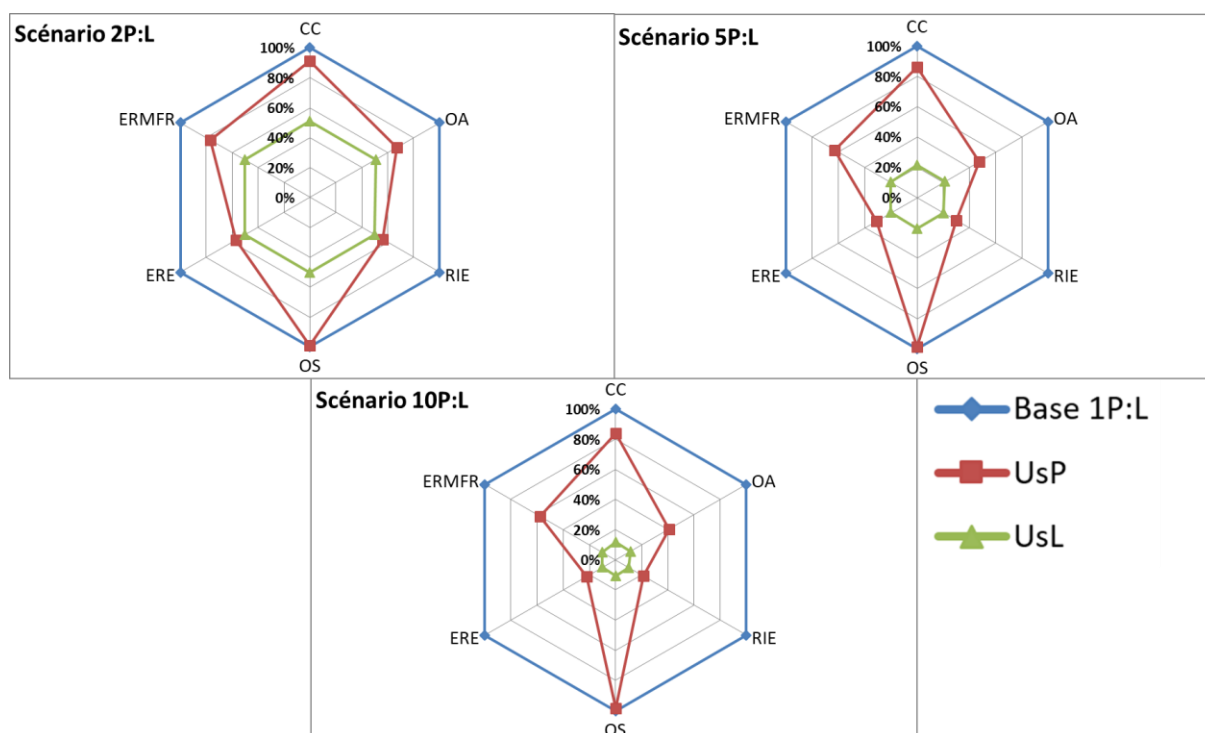


Figure 63 : Évaluation des impacts environnementaux des consommateurs Minimalistes - Hypersensibles pour différents porters avant lavage.

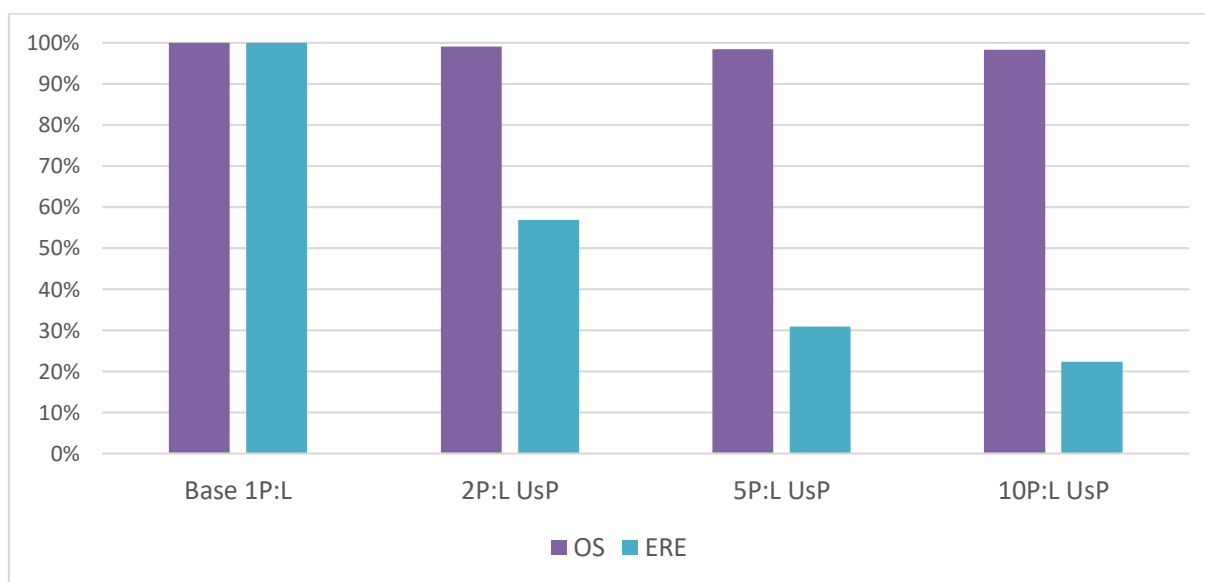


Figure 64 : Evaluation des impacts environnementaux des consommateurs Minimalistes - Hypersensibles sur les impacts OS et ERE pour différents porters avant lavage cas UsP.

Dans le cas 2P:L UsP (2 porters avant lavage) où l'usure du produit serait uniquement issue du porter on constate une réduction des impacts environnementaux de 9% à 44% en fonction de l'impact considéré (Figure 63). Les réductions les plus fortes concernent les impacts liés à la phase d'usage du produit que sont les rayons ionisants sur les écosystèmes (44%) et l'épuisement des ressources en

eau (43%). Pour les autres impacts plus sensibles à la phase de production du produit, on constate une réduction des impacts environnementaux entre 8% pour le changement climatique et 33% pour l'appauvrissement de la couche d'ozone. Dans le cas USP, les variations d'impacts environnementaux sont liées à la phase du cycle de vie dont l'impact est majoritairement issu, par exemple l'impact OS majoritairement issu de la phase de fabrication varie très peu quel que soit le nombre de porter avant lavage. Tandis que les impacts tels que ERE (Epuisement des Ressources en Eau) majoritairement issus de la phase d'usage varient beaucoup en fonction du nombre de porter avant lavage (Figure 64).

Dans le second cas UsL (Figure 65), le nombre de lavages devient le facteur limitant de la durée de vie ce qui induit une augmentation de la durée de vie du produit si on augmente le nombre de porter avant lavage. L'augmentation de la durée de vie diminue également fortement la valeur du flux de référence ce qui provoque la diminution de tous les impacts environnementaux. Cette réduction s'ajoute à celle issue de la diminution du nombre d'entretiens pour donner ces résultats. Dans ce cas, augmenter le nombre de porter avant lavage revient à diviser les impacts environnementaux par ce nombre.

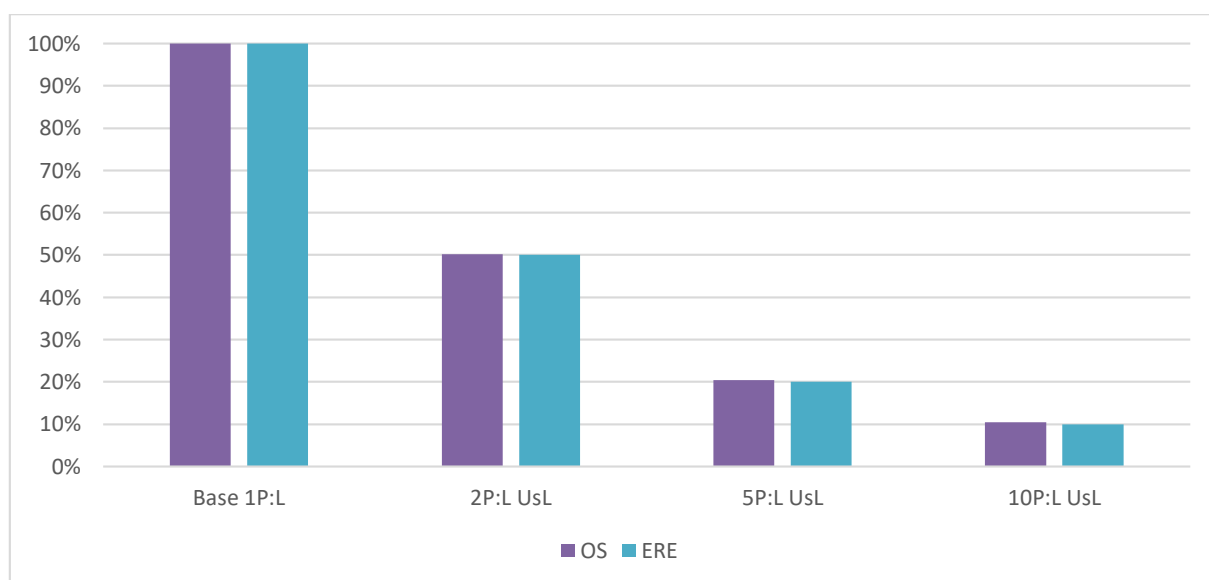


Figure 65 : Evaluation des impacts environnementaux des consommateurs Minimalistes - Hypersensibles focus sur les impacts OS et ERE pour différents porters avant lavage cas UsL.

Nous avons également comparé la sensibilité à ce paramètre des différents scénarios de consommateurs et de produits étudiés en section IV.2.2.3 précédente (Figure 66).

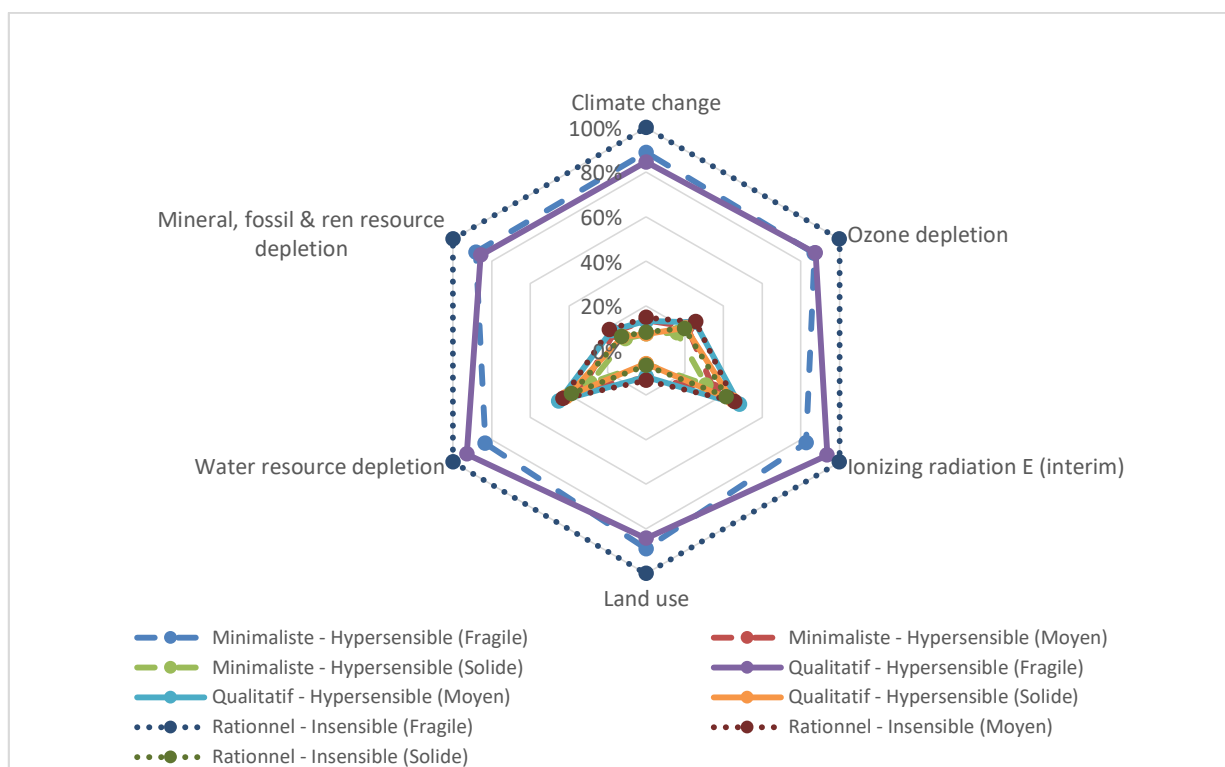


Figure 66 : Comparaison des impacts environnementaux des scénarios de consommateur et classes de produits pour un pull porté 2 fois avant lavage.

Nous avons constaté que la variation du nombre de porter avant lavage ne fait pas varier les positions relatives des différents scénarios de consommateurs et de produits les uns par rapport aux autres. En effet les Figure 62 (section IV.2.2.3) et Figure 66 montrent que les positions relatives des différentes courbes n'a pas été modifiée par ce changement de variable.

Ces résultats confirment que dans tous les cas l'augmentation du nombre de porter avant lavage est un levier conséquent pour réduire les impacts environnementaux du cycle de vie d'un vêtement. D'autant plus que ce gain est potentiellement sous-estimé puisque nous ne sommes à l'heure actuelle pas capable de quantifier l'usure uniquement issue du lavage. Ces deux paramètres sont encore des sujets peu étudiés dans la littérature scientifique et mériteraient une attention particulière, notamment au regard des gains environnementaux possibles.

Précédemment, nous avons comparé les scénarios en variant uniquement le nombre de porter avant lavage pour un même scénario de produit. Lorsqu'on croise les scénarios de produits avec plusieurs valeurs de nombre de porter avant lavage on constate qu'il est possible par exemple pour un pull « Moyen » avec 2 porter avant lavage de produire moins d'impacts qu'un pull « Solide » avec un porter avant lavage (

Figure 67).

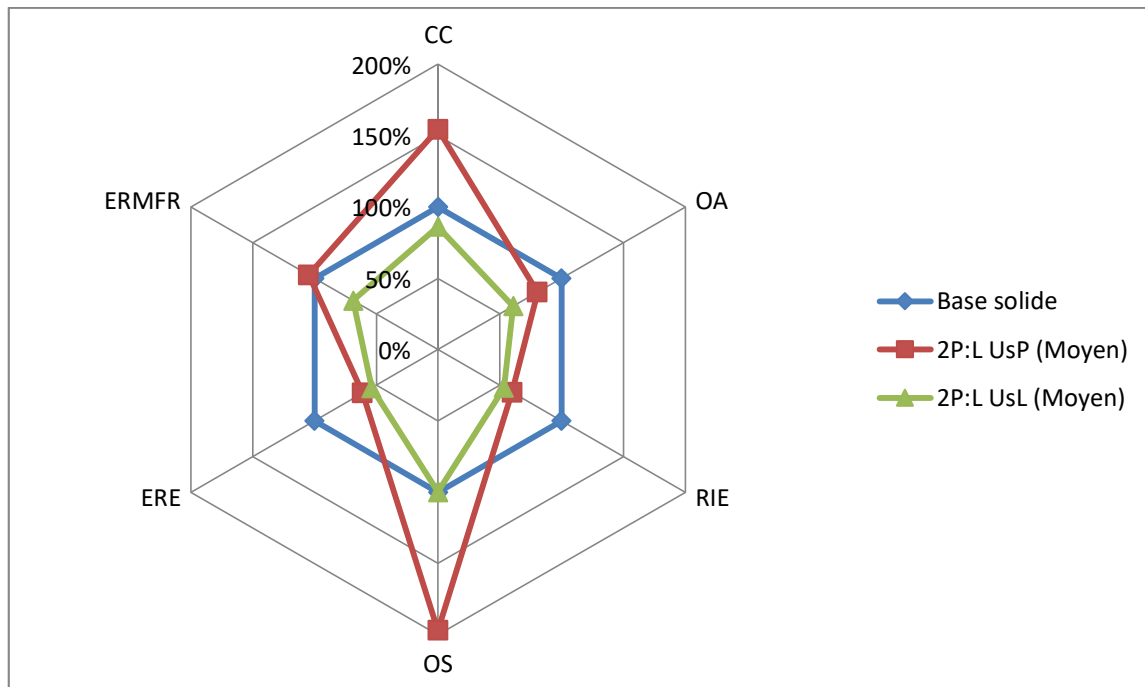


Figure 67 : Comparaison pour un pull Solide lavé après chaque porter et un produit Moyen porter 2 fois avant chaque entretien.

Dans le cas UsP le pull « Moyen » est meilleur que le produit « Solide » sur 3 des 6 impacts considérés (les impacts majoritairement issus de la phase d'usage) et est presque équivalent sur l'impact ERMFR. Dans le cas UsL le produit « Solide » produit plus d'impact sur l'environnement que le produit « Moyen ».

Ce cas reste théorique puisqu'ici les deux produits ont la même fabrication et cela suppose une usure majoritairement issue du cycle d'entretien pour maximiser la réduction des impacts, cependant cela illustre le fort potentiel d'une pratique d'usage qui paraît pourtant anodine. Ces résultats quantifient également les réductions d'impacts environnementaux d'une pratique (l'augmentation du nombre de porters avant lavage) déjà relativement répandue chez les consommateurs d'après la littérature [56], [57], [70], [108] que nous avons illustré au travers de nos verbatim et qui fait partie des conseils d'usage mentionnés par certaines marques sur leurs sites tels que Petit Bateau ou Jules.

IV.3.2 Sensibilité au seuil de boulochage accepté par le consommateur

Comme nous l'avons montré dans les chapitres précédents le consommateur est souvent déterminant pour la durée de vie du produit qu'il utilise et notamment parce qu'il détermine le niveau de défaut du produit qui déclenche sa mise au rebut. Nous avons comparé les scénarios de consommateurs et

de produits en modifiant ce seuil et déterminé son influence sur les impacts environnementaux des pulls.

IV.3.2.1 Description

En section IV.1.2, nous avons fixé comme base un seuil de boulochage acceptable par le consommateur à 2. Ceci nous a permis d'estimer la durée de vie des produits à partir des courbes obtenues à la fin du chapitre III (section III.4.4- Figure 58). Nous allons considérer les deux cotations les plus proches 1 et 3 comme seuil acceptable afin d'illustrer l'influence de la sensibilité aux défauts par le consommateur sur les impacts environnementaux de ses vêtements.

En suivant la même méthodologie que celle utilisée dans la section IV.1.2 précédente, nous avons calculé les nouvelles durées de vie associées à ces seuils pour chaque type de produit : Fragile, Moyen, Solide.

Tableau 33 : Durées de vie des pulls selon différents seuils de boulochage acceptables par les consommateurs.

DURÉE DE VIE DU PULL (EN NOMBRE DE PORTER)	FRAGILE	MOYEN	SOLIDE
SEUIL = 1	5	54	62
SEUIL = 2 (SCÉNARIO DE BASE)	3	23	47
SEUIL = 3	2	6	31

On remarque que pour les produits « Fragile » et « Solide » le passage d'un seuil de boulochage acceptable de 3 à 1 a augmenté la durée de vie du pull respectivement par un facteur 2.5 et 2. Cependant, dans le cas des pulls « Moyen », la durée de vie est multipliée par 9.

IV.3.2.2 Analyse des impacts environnementaux

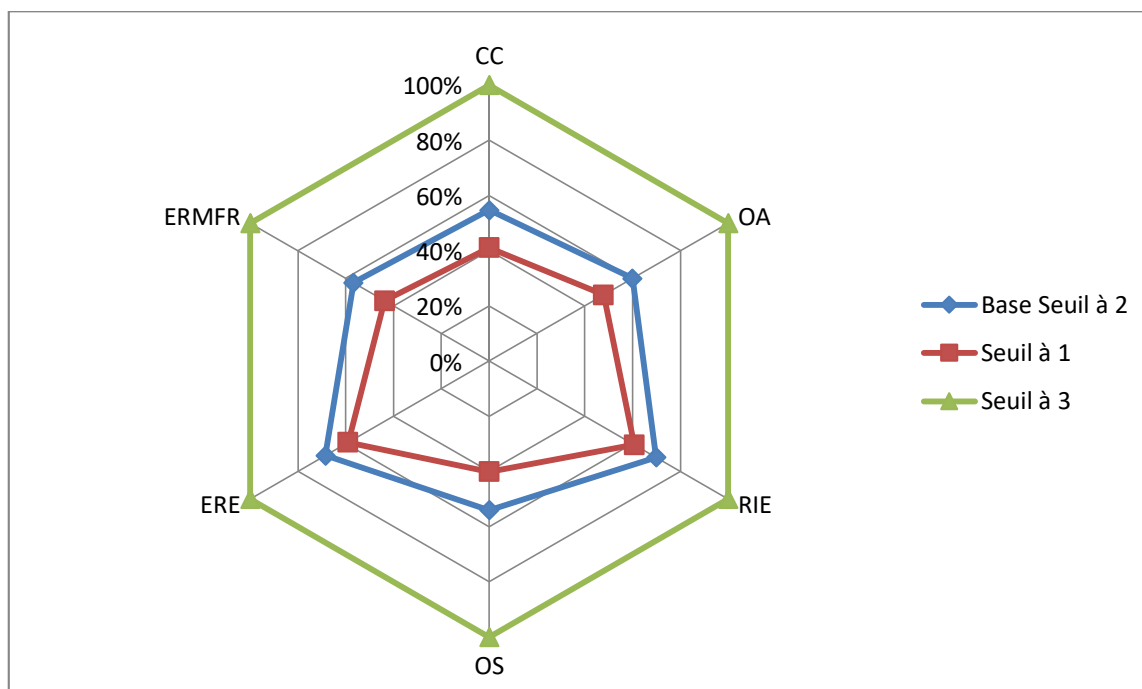


Figure 68 : Comparaison des impacts environnementaux pour plusieurs valeurs de seuil de boulochage acceptable par le consommateur Minimaliste – Hypersensible pour un pull Moyen.

L'intérêt de l'étude de cette sensibilité est de comparer la sensibilité des différentes classes de pulls au seuil de boulochage acceptable. Le consommateur avec le plus faible seuil de boulochage acceptable gardera son pull plus longtemps quel que soit sa qualité intrinsèque. Dès lors, pour un même produit, le consommateur peu sensible au boulochage produira moins d'impacts sur l'environnement. En effet on voit qu'un consommateur avec un seuil à 2 dégage entre 30 et 46% d'impacts en moins qu'un consommateur avec un seuil de boulochage acceptable à 3 suivant la catégorie d'impact considérée.

Nous avons constaté que la durée de vie des pulls Moyen pouvait sensiblement se rapprocher des durées de vie des pulls Fragile ou Solide en fonction du seuil de boulochage. En comparant les impacts environnementaux de différents scénarios de pulls et en faisant varier le seuil de boulochage (Figure 69) on constate que :

- les impacts environnementaux d'un pull Moyen avec un seuil de boulochage de 3 sont très proches de ceux du pull Fragile avec un seuil de boulochage de 1
- les impacts environnementaux d'un pull Moyen avec un seuil de boulochage de 1 sont très proches de ceux du pull Solide avec un seuil de boulochage de 1
- les impacts environnementaux d'un pull Moyen avec un seuil de boulochage de 1 sont inférieurs à ceux du pull Solide avec un seuil de boulochage de 3 (Figure 70)

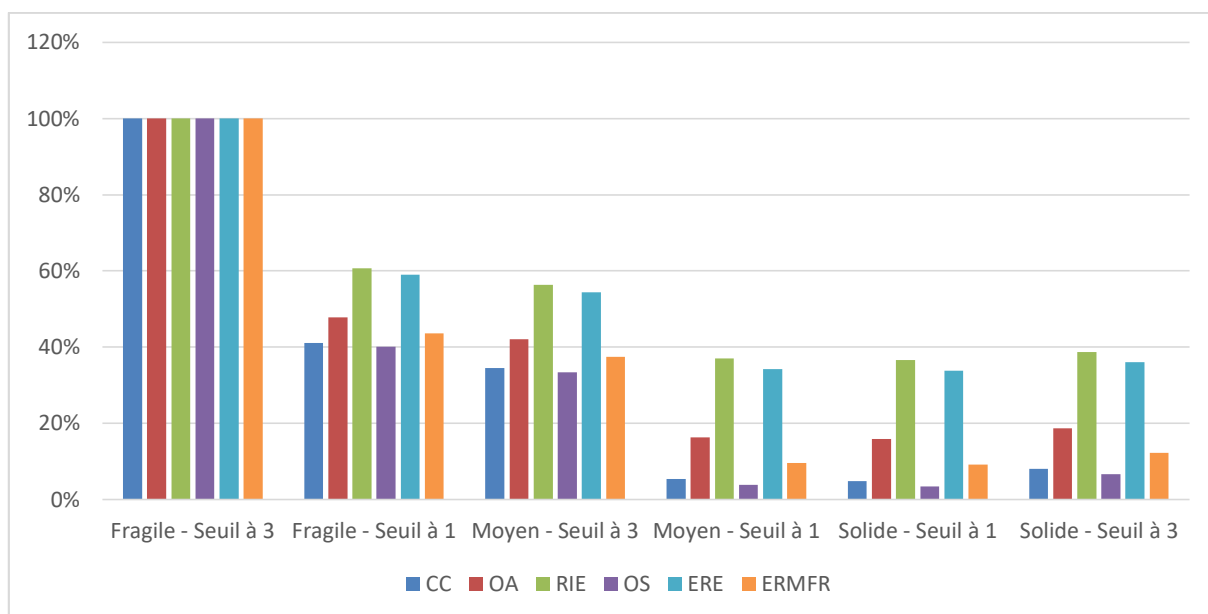


Figure 69 : Comparaison des impacts environnementaux pour plusieurs valeurs de seuil de boulochage acceptable par le consommateur Minimaliste – Hypersensible pour chaque classe de pulls.

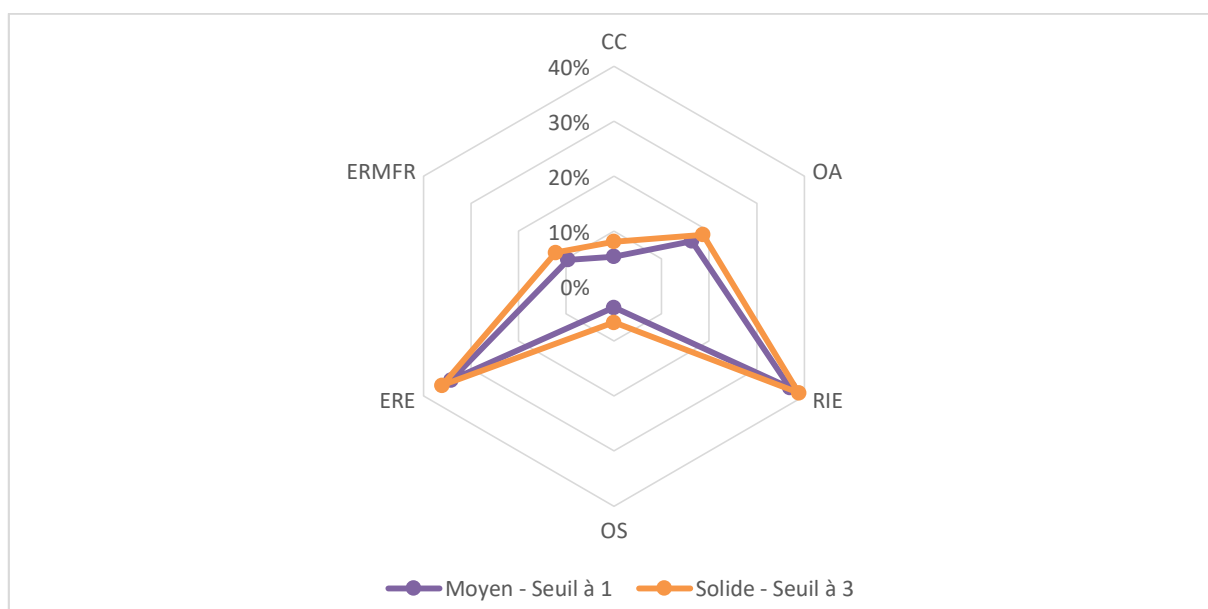


Figure 70 : Comparaison des impacts environnementaux du consommateur Minimaliste – Hypersensible pour un pull Moyen avec un seuil de boulochage à 1 et un pull Solide avec un seuil de boulochage à 3.

Compte tenu de la forte sensibilité au seuil de boulochage des durées de vie des pulls Moyen, démontrée à la section III.4.4 - Figure 58 et des impacts environnementaux du pull Moyen par rapport aux autres pour les différents seuils de boulochage (Figure 69 et Figure 70), il serait intéressant d'attribuer une fabrication différente et appropriée à chacun des types de pull. Ainsi nous pourrions confirmer ou infirmer les tendances mise en avant ici et illustrer le potentiel environnemental d'un

changement de nombre de porter avant lavage ou de seuil de boulochage sur des cas de pulls plus proches du réel.

IV.3.3 Conclusion sur les sensibilités

Nous avons précédemment montré que les choix du consommateur en terme d'entretien, même les plus vertueux, ne représentent qu'une réduction potentielle des impacts d'environ 22% (Section IV.2.2.3 - Tableau 30). Cependant, au travers de l'analyse de ces sensibilités nous montrons que le consommateur peut avoir par ses décisions une influence beaucoup plus importante que la simple réduction des impacts lié à l'entretien de ses vêtements.

En portant une fois supplémentaire un pull avant de le laver, nous avons montré qu'il était possible de réduire ses impacts environnementaux jusqu'à 49% selon la catégorie d'impact considérée. De plus, cette réduction correspond au scénario d'usure minimal provenant uniquement du porter. Dans le cas maximal où l'usure serait attribuable uniquement à l'entretien, un porter supplémentaire avant lavage peut amener à une réduction de 49% à 50% des impacts environnementaux toutes catégories confondues. Dans ce cas, au cours de sa vie, un pull de qualité « Moyen » produirait moins d'impact qu'un pull de qualité « Solide » lavé après chaque porter.

Nous avons également montré que par sa sensibilité aux défauts le consommateur influence très fortement la durée de vie de ses vêtements, à tel point que dans certains cas les pulls de qualité « Moyen » avaient des impacts environnementaux proches des produits « Fragile » ou au contraire meilleur que les produits « Solide ».

Cela confirme à nouveau qu'il est essentiel s'intéresser aux consommateurs dans l'étude des impacts environnementaux des vêtements. En effet, les décisions du consommateur peuvent rendre complètement inefficace ou au contraire magnifier les efforts d'écoconception et le travail que les entreprises effectuent sur leurs produits pour en réduire les impacts environnementaux.

IV.3.4 Autres paramètres sensibles

Dans la section IV.1.4.3, nous avons évoqué la prise en compte de la réparation au sein du cycle de vie des vêtements. Cette pratique vertueuse est difficilement modélisable : elle peut prendre différentes formes, être effectuée avec des outils qui nécessitent de l'énergie et des apports de matières, être effectuée pour allonger la durée de vie du produit en corrigeant les premiers signes d'usure. Une grande difficulté dans la modélisation de la réparation est que bien qu'elle soit théorisée comme une prolongation de la durée de vie, elle est souvent effectuée en réponse à un défaut à caractère accidentel plutôt qu'en réponse à une usure prévisible du produit.

Dans ces travaux, nous avons choisi de la modéliser simplement comme une étape permettant la prolongation de la durée de vie en lui attribuant un gain de durée de vie équivalent à un pourcentage de la durée de vie du produit. Cette hypothèse forte que nous avons posée fait ici l'objet d'une analyse de sensibilité dans laquelle nous allons varier cette quantité de durée de vie supplémentaire.

Dans le scénario de base sur lequel nous avons travaillé, nous avons émis l'hypothèse que la réparation produisait une quantité de durée de vie supplémentaire équivalente à 25% de la durée de vie du produit. Pour examiner la sensibilité des scénarios à ce paramètre nous allons comparer les impacts environnementaux des scénarios pour une quantité de durée de vie supplémentaire équivalente à 10% et 50% de la durée de vie du pull (Tableau 34.)

Tableau 34 : Durées de vie supplémentaire produite par la réparation.

Taux de durée de vie supplémentaire issue de la réparation	Fragile	Moyen	Solide
10%	1	3	5
25%	1	6	12
50%	2	12	24

Afin de mettre en avant les différences entre les scénarios nous avons comparé les impacts environnementaux des scénarios de consommateur Qualitatif-Hypersensible (Q-I) et Rationnel-Insensible (R-I) qui adoptent respectivement les taux de réparation le plus élevé (~96%) et le plus faible (~29%) (Section II.5.2.4 - Figure 34).

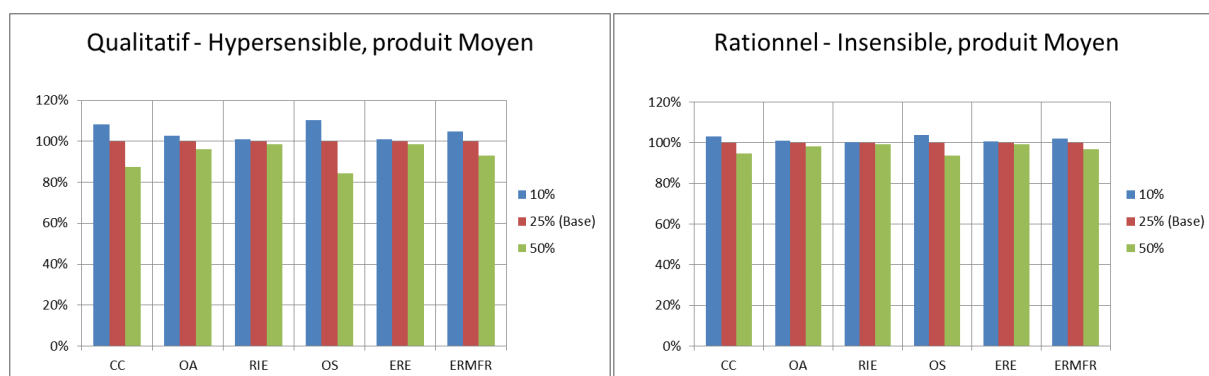


Figure 71 : Sensibilité des scénarios de consommateur en fonction du gain de durée de vie issue de la réparation.

Pour le consommateur Q-H, le gain environnemental provoqué par une augmentation de la durée de vie obtenue par réparation de 25% à 50% de la durée de vie du produit entraîne un gain environnemental de 1% à 16% en fonction de la catégorie d'impact considérée. Dans le cas des consommateurs R-I le gain environnementale est de 1 à 7%. La différence de taux de réparation entre ces profils de consommateur est de 67%. Ces résultats montrent que bien que la réparation soit

intéressante du point de la durée de vie du vêtement, le gain environnemental engendré par la réparation est faible quel que soit le consommateur considéré.

Il est également intéressant de comparer la sensibilité des différentes classes de produit à la quantité de durée de vie issue de la réparation (Tableau 34). Cette comparaison met en avant l'importance de la réparation pour les pulls à faible durée de vie. En effet, le gain environnemental est plus grand pour les pulls à faible durée de vie que pour les autres pulls : lorsqu'on double le pourcentage de durée de vie supplémentaire issue de la réparation (de 25% à 50%), le potentiel de réduction des impacts environnementaux est compris entre 8% et 16% pour un pull Fragile et entre 1% et 13% pour les pulls Moyen et Solide (Figure 72).

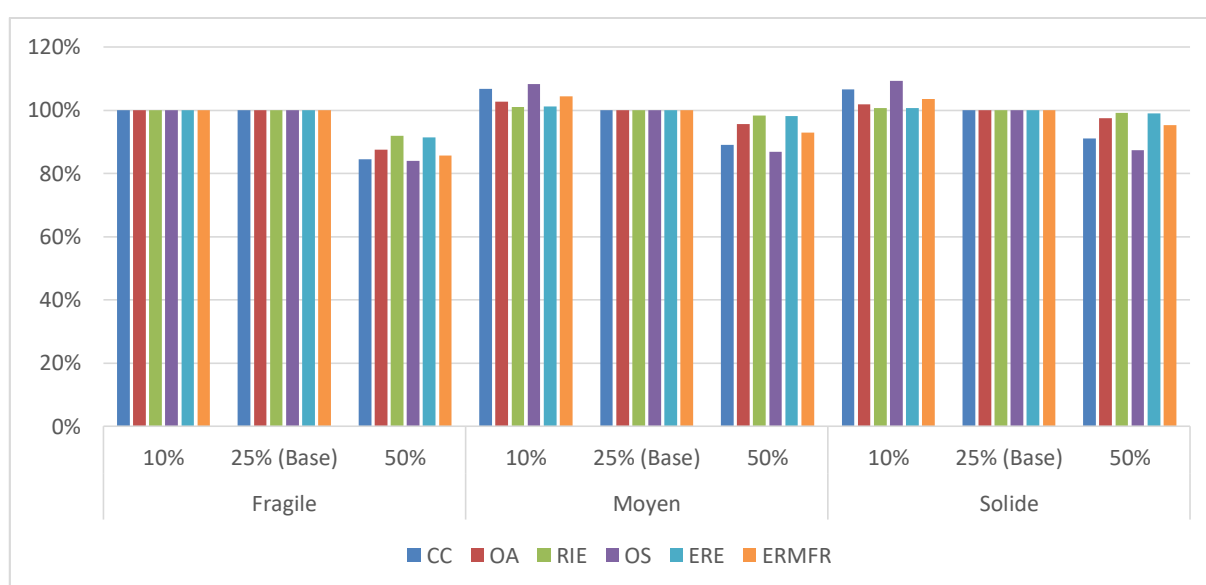


Figure 72 : Sensibilité des scénarios de produit en fonction du gain de durée de vie issue de la réparation

Nous arrivons aux mêmes conclusions en comparant les types de pulls qu'en comparant les types de consommateurs : la réparation est une pratique vertueuse cependant le gain environnemental qu'elle provoque reste relativement faible comparativement aux autres leviers évoqués précédemment.

De plus, dans notre modélisation la réparation n'engage pas de dépense énergétique supplémentaire, elle est donc dans tous les cas bénéfique. Cependant, dans les cas où l'acte de réparer engage une dépense énergétique et matérielle supplémentaire, quantifier le gain de durée de vie est d'autant plus important. En effet, dans certains cas, l'effet bénéfique de l'augmentation de la durée de vie du produit ne compensera pas les impacts supplémentaires nécessaires à la réparation d'autant plus que la réduction d'impact obtenue est relativement faible même en considérant le cas parfait que nous avons illustré.

La réparation est difficile à modéliser dans le cadre d'une ACV et de plus amples recherches sont nécessaires pour mieux la définir, la modéliser et évaluer le gain de durée de vie qui en résulte. Dans notre cas nous avons exclu le caractère accidentel de la réparation pour la modéliser comme une pratique permettant par exemple de compenser l'usure du vêtement pendant un certain temps. La durée de vie supplémentaire obtenue par réparation n'est pas définie, est-ce la durée de vie de la réparation en tant que telle ? C'est-à-dire jusqu'à l'apparition du même défaut au même endroit. Ou est-ce la durée de vie jusqu'à l'apparition du prochain défaut qu'il s'agisse du même ou pas ? Dans le cas de ces définitions, comment la durée de vie est-elle évaluée ? Comme un nombre de porters qui correspondrait à la durée de vie de la réparation en tant que telle ? Ou comme une augmentation de la durée de vie indexée sur celle du produit comme nous l'avons choisi ici.

La réparation est très souvent présentée comme une pratique nécessaire et essentielle chez beaucoup de consommateurs responsables, cependant aucune étude à ce jour ne permet de conclure fermement sur les bénéfices de la réparation. Elle reste pour les chercheurs un sujet complexe à modéliser et à évaluer, autant par la diversité des pratiques de réparations, des défauts auxquels la réparation répond et de la difficulté à la conceptualiser.

La réparation n'est pas la seule pratique du consommateur pouvant faire l'objet d'une étude de sensibilité. Dans la section 3 nous avons rapidement évoqué le repassage dont la dépense énergétique supplémentaire le disqualifiait des pratiques d'entretien « responsable ». Cependant, étant donné que cette pratique est associée empiriquement au soin et à l'esthétique du linge, il est légitime de se poser la question suivante : quelle est l'influence du repassage sur la durée de vie des vêtements ? D'autant plus que le repassage a un impact direct sur les caractéristiques techniques des étoffes [181], [182]. Si le repassage augmente cette durée de vie, il est possible que le surplus d'impact environnemental soit compensé par l'augmentation de la durée de vie. Nous n'avons pas traité cette sensibilité dans nos travaux cependant elle constitue un sujet intéressant pour des travaux futurs.

IV.4 Bilan du chapitre et conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit la modélisation et l'évaluation par Analyse de Cycle de Vie des impacts environnementaux générés tout au long de leur cycle de vie par des pulls de qualités différentes et portés par différents profils de consommateurs, selon les catégories définies précédemment aux chapitres 2 et 3. La phase d'usage produit des impacts environnementaux d'amplitude similaire à la phase de fabrication (sauf pour la catégorie d'impact Occupation des Sols). Nous avons identifiés deux leviers principaux pour baisser cet impact : l'augmentation de la durée de vie et les pratiques d'entretien.

La qualité des pulls et leur aptitude à générer des bouloches est le premier paramètre qui va influencer les impacts. Sur l'ensemble des pulls étudiés, des écarts de l'ordre de 60% ont été évalués (entre 20 et 80%). Cela montre l'importance de la prédiction du vieillissement des pulls par boulochage.

De ces évaluations, nous réaffirmons l'importance et l'influence de la durée de vie des vêtements sur leurs impacts environnementaux, notamment au travers de l'étude des impacts des trois scénarios de pulls de qualité Fragile, Moyen et Solide. Cette étude nous a également permis de conclure que l'étude du consommateur, de ses pratiques et de ses sensibilités était une contribution non négligeable à l'ACV. En effet, le consommateur est un sujet complexe et central de l'ACV des vêtements. La prise en compte d'une définition sociologique du consommateur en plus de ses pratiques au sein de l'ACV permet d'apporter un nouveau point de vue sur sa participation aux impacts environnementaux de ses vêtements. Nous avons montré qu'il existait entre les différents profils de consommateurs un différentiel d'impact environnemental de 10% à 32% en fonction de l'impact considéré, quel que soit le type de pull porté.

Cela permet également de confronter les attitudes des consommateurs aux conséquences de leurs pratiques et de prendre du recul vis-à-vis de ce que constitue un entretien durable du vêtement. Par exemple, nous avons montré que dans certains cas, les consommateurs présentant un profil « vertueux », tel que le profil Qualitatif – Hypersensible, produisaient plus d'impact que certains profils moins sensibles aux thématiques environnementales, comme le profil Rationnel - Insensible sur certaines catégories d'impacts.

Finalement, nous avons étudié les sensibilités des scénarios au nombre de porters avant lavage, au seuil de boulochage acceptable par le consommateur et à la durée de vie supplémentaire accordée par la réparation.

La première sensibilité nous a permis de définir le nombre de porters X avant lavage comme un paramètre très influent sur les impacts environnementaux des vêtements. En effet, il permet de fortement réduire les impacts environnementaux du cycle de vie des vêtements pour tous les impacts majoritairement issus de la phase d'usage du vêtement (de 20 à 49%), en réduisant le nombre de cycles d'entretien d'un facteur X. Cela nous a également permis de poser la question de la source de l'usure pendant l'usage, entre le porter et le lavage notamment. En effet en modélisant des cas extrêmes nous avons observé que les gains potentiels issus de l'augmentation du nombre de porters avant lavage étaient sans doute plus importants que l'unique réduction du nombre de cycles d'entretien. Dans le cas d'une réduction d'impacts maximale les impacts environnementaux du cycle de vie du pull étaient divisés par deux. Pour aller plus loin et explorer les possibilités qu'offrait cette sensibilité, nous avons

démontré l'existence d'un cas dans lequel un produit « Moyen » porté deux fois avant d'être lavé produisait moins d'impacts sur l'environnement qu'un produit « Solide » lavé après chaque porter.

La seconde sensibilité - au seuil de boulochage acceptable par le consommateur - nous a permis de montrer son importance lors de l'évaluation de la durée de vie d'un vêtement. Nous avons quantifié le gain environnemental provoqué par la sensibilité au défaut d'un consommateur. En effet, nous avons illustré que pour les pulls Moyen, une variation de deux cotations dans le seuil de boulochage acceptable par le consommateur produisait des impacts environnementaux similaires à ceux des produits Solide.

Pour finir, nous avons étudié la sensibilité des scénarios à la quantité de durée de vie ajoutée par la réparation. Nous avons également montré que la réparation est une pratique d'autant plus importante que la durée de vie du produit réparée est faible. Cette dernière sensibilité nous a également permis de questionner la modélisation et la définition de la réparation en tant que pratique positive pour l'environnement. La réparation et le repassage soulèvent la question d'une étude plus approfondie de la manifestation de l'usure et du vieillissement des vêtements pendant leur usage, notamment au cours des étapes d'entretien : usure au lavage, au séchage, au repassage etc.

Conclusion générale

Les questions de recherches développées dans ces travaux résultent de la convergence d'intérêts de la part des industriels, des distributeurs, des scientifiques et des consommateurs portés à la durée de vie des vêtements. Cette notion déjà identifiée dans la littérature comme l'un des paramètres centraux de l'ACV des vêtements reste en pratique sujet à hypothèses. Les travaux actuels sur l'affichage environnemental à l'échelle nationale et européenne ont mis en avant un fort besoin quant à l'évaluation, la prédiction ou la mesure de ce paramètre. À ce besoin s'ajoutent les volontés industrielles de pouvoir mieux estimer la qualité de leurs vêtements et le souhait émis par les consommateurs d'avoir accès à des informations concernant la durée de vie des vêtements.

Un état de l'art sur la durabilité et la durée de vie des vêtements nous a permis de mettre en lumière un facteur essentiel et incontournable de la durabilité des vêtements : le consommateur. Il détermine d'une part, par ses décisions, et d'autre part, par ses pratiques, la fin de la durée de vie des vêtements ainsi qu'une part non négligeable des impacts environnementaux générés lors de la phase d'utilisation. Cependant, dans la plupart des études et des ACV textiles, le consommateur et la phase d'usage sont souvent uniquement réduits à une pratique moyenne d'entretien évaluée sur une population et une géographie donnée. Cette modélisation ne tient pas compte de la grande diversité des attitudes et des comportements constatée chez les consommateurs, diversité qui constitue un sujet très étudié dans la littérature de sociologie et de marketing.

Le travail réalisé au cours de cette thèse consiste à s'appuyer sur les précédents travaux de chercheurs et à apporter des solutions nouvelles, grâce à une approche transversale entre l'ingénierie textile et la sociologie de la consommation, dans le but de permettre l'optimisation et la modélisation de la durée de vie et de l'usage des vêtements pour l'Analyse de Cycle de Vie. Ces recherches ont été conduites en trois actes.

Le premier acte est centré sur l'étude des consommateurs, de leurs attitudes et de leurs comportements. À partir d'un état de l'art du « consommateur responsable », nous avons défini les questions et paramètres à rechercher au sein d'une population pour en extraire des typologies selon les axes Achats et Environnement. Nous avons complété cette étude quantitative par une liste d'items relatifs à l'entretien des vêtements, étude qui a été enrichie par une étude qualitative basée sur des entretiens semi-directifs avec des consommateurs. Ces éléments nous ont permis de lier les typologies de consommateurs à la modélisation des phases d'usage des ACV de vêtements et d'extraire les conclusions suivantes :

- La sensibilité environnementale influence l'acte d'achat, mais un comportement d'achat vertueux n'est pas forcément la résultante d'une conscience environnementale particulière.
- Les consommateurs se différencient très peu par leurs pratiques d'entretien, même en considérant des sensibilités environnementales et des pratiques d'achats très discriminantes. Le taux de réparation est le seul paramètre d'entretien des vêtements selon lequel les typologies de consommateurs ont des différences notables.

Dans le second acte de ces travaux, nous nous sommes intéressés à l'estimation et à la prédiction de la durée de vie des vêtements. Nous avons conçu et illustré notre méthodologie sur le cas des pulls et de leur boulochage. Des tests en laboratoire ont été adaptés pour étudier le vieillissement au boulochage des tricotés. Avec un échantillon de pulls du commerce, nous avons extrait un ensemble de classes de vieillissement typiques. Ces classes décrivent la dynamique suivant laquelle le produit bouloche. Nous avons ensuite établi un modèle de prédiction statistique d'appartenance des pulls à ces classes en fonction de leurs caractéristiques techniques. Pour compléter cette étude, nous avons réalisé une campagne de tests au porter des références de pulls étudiés précédemment. Ces deux points de vue sur le vieillissement des pulls au boulochage nous ont permis, par un travail d'interpolation et d'optimisation, de déterminer une équivalence entre un nombre de cycles de test en laboratoire et un porter. Nous avons ensuite défini une valeur de boulochage à partir de laquelle le consommateur met son pull au rebut : le seuil acceptable de boulochage, qui associé à cette équivalence nombre de cycles/porter, a permis l'estimation du nombre de porters avant mise au rebut du pull, autrement dit, sa durée de vie. Notre méthodologie de prédiction du vieillissement a l'avantage d'être applicable sur de plus petits ensembles de données et sur des ensembles de données composés de références différentes contrairement aux modèles issus de la littérature. Cela permet d'envisager une application d'un modèle plus simple pour les entreprises du secteur de la mode et d'inclure ces mesures pour l'affichage environnemental actuellement en étude au niveau français et européen.

Dans le troisième acte de ces recherches, nous avons contextualisé les éléments des parties précédentes, typologies de consommateurs et estimation de la durée de vie des pulls, au sein de scénarios d'Analyses de Cycle de Vie. L'objectif de ces ACV n'était pas de reconfirmer l'influence de la durée de vie comme levier de réduction des impacts environnementaux mais de comparer les potentielles réductions issues du choix des produits et des comportements d'usage des consommateurs. Notamment en explorant l'influence des pratiques d'usages et d'entretien au-delà de l'utilisation de divers modules de lavage par la prise en compte de décisions telles que l'augmentation du nombre de porter avant lavage ou l'évolution du seuil de défaut acceptable.

En accord avec la littérature, la phase d'usage des vêtements représente une part non négligeable des impacts environnementaux générés pendant leurs cycles de vie. Ainsi selon la qualité des étoffes et les catégories d'impact, elle varie de 20 à 80%. Cette phase du cycle de vie nous paraît être une source importante potentielle de réduction des externalités environnementales négatives. Toutefois, les résultats de nos travaux prouvent que l'information et l'éducation des consommateurs sur les bonnes pratiques d'usage et d'entretien ne semblent pas si aisées. En effet, nous avons montré que même si le consommateur était très attentif à l'environnement dans ses pratiques d'entretien, le caractère vertueux de ses pratiques ne modifiait pas significativement les impacts environnementaux de ses pulls, les différences d'impacts environnementaux entre les profils de consommateurs variaient entre 10% et 30% en fonction des catégories d'impacts considérés. Cette conclusion porte uniquement sur l'influence que le consommateur a sur le contenu de la phase d'usage. Or le consommateur a également une influence beaucoup plus importante sur le cycle de vie des vêtements, notamment par des pratiques que nous n'avons malheureusement pas pu lier à nos typologies de consommateurs : l'augmentation du nombre de porter avant lavage ou encore la diminution de la sensibilité aux défauts des vêtements.

Notre étude a montré qu'il existait des cas où par ses comportements le consommateur permettait à un pull à faible durée de vie d'émettre moins d'impacts environnementaux qu'un pull à plus forte durée de vie. Ce dernier point est particulièrement intéressant parce qu'il nous a permis d'illustrer l'importance du consommateur et de ces décisions dans l'émission des impacts environnementaux des vêtements. Ainsi informer les consommateurs des bonnes pratiques d'entretien et de porter devient un levier de réduction des impacts environnementaux des vêtements. Certaines marques de vêtements ont d'ailleurs développé une communication axée sur ces bonnes pratiques pour leurs consommateurs, afin de les impliquer dans le soin de leurs vêtements et la réduction de l'impact environnemental issu de l'utilisation de ces derniers. On peut notamment citer les marques comme Jules, Petit Bateau ou encore Loom qui en particulier ont développé un onglet sur leur site internet dédié aux bonnes pratiques d'entretien des vêtements ou envoient systématiquement des courriels préconisant des bonnes pratiques en matière de soin du linge.

Ces travaux et études de cas nous ont permis d'illustrer la mise en place des méthodologies de prédiction de la durée de vie des pulls et de définition des attitudes et comportements des consommateurs. Bien que les modèles puissent être affinés par l'utilisation de plus grands ensembles de données, tant sur la partie produit que sur la partie consommateur, la démarche est opérationnelle et les méthodes adaptées.

Le principal défi auquel fait face notre méthodologie de prédiction de la durée de vie est la généralisation à d'autres typologies de produits. En effet, nous appuyons notre démarche sur notre capacité à quantifier le vieillissement du vêtement en laboratoire et au porter. Le boulochage se prête facilement à l'exercice par le caractère non destructif du test métrologique qui y est associé. Cependant, les tests de laboratoire associés à la résistance aux autres défauts susceptibles de déclencher la mise au rebut des vêtements peuvent être destructifs comme par exemple les tests d'éclatométrie, de glissement couture ou de résistance à la déchirure. Ces cas devront faire l'objet de futures investigations afin de rendre applicable la méthodologie à tous types de vêtements et de défauts.

Notre démarche a bien évidemment un caractère exploratoire, compte tenu de la diversité des paramètres influençant la durée de vie des vêtements. Qu'ils s'agissent de paramètres liés aux produits ou de paramètres liés aux consommateurs, certains aspects restent à préciser ou sont encore à explorer parmi lesquels on peut citer :

- Une meilleure connaissance du consommateur en complétant le questionnaire préétabli par des items portant entre autres sur le nombre de porter avant lavage pour chaque catégorie de vêtements ainsi que le seuil acceptable de défaut pour chaque catégorie de vêtements ;
- Un questionnement sur la représentativité des tests métrologiques par rapport à l'usage pouvant mener à la création de procédures de test plus représentatives ;
- Une étude plus approfondie de l'usure provoquée par les différentes étapes de l'entretien des vêtements (lavage, essorage, séchage, repassage, etc.)

Pour conclure, par l'ensemble de ces travaux, nous apportons à nos partenaires financeurs les réponses suivantes :

- Une méthodologie d'estimation de la durée de vie des pulls par l'étude de leurs caractéristiques techniques et de leurs vieillissements applicable sur un ensemble de données composées de pulls très divers. Si l'ensemble des données utilisées pour l'apprentissage du modèle de prédiction est suffisant, cette méthodologie peut se transformer en un outil d'aide à la décision et à l'écoconception puisqu'elle permettra de prédire la durée de vie d'un pull à partir de son cahier des charges.
- Une méthode de qualification des attitudes et comportements du consommateur pour mieux définir la phase d'usage de ses vêtements dans l'ACV. Cette méthode permet de mettre en perspective le profil du consommateur et notamment les aspects « vertueux » de celui-ci par rapport aux impacts environnementaux qu'ils produisent.

- Une réflexion sur les interactions possibles entre l'ingénierie et la sociologie pour préciser et affiner les Analyse de Cycle de Vie des vêtements et plus précisément sur l'influence des actions et décisions du consommateur sur la durée de vie et les impacts environnementaux des vêtements.

Références

- [1] Ellen Mac Arthur Foundation, "a New Textiles Economy: Redesigning Fashion'S Future." 2017, [Online]. Available: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/A-New-Textiles-Economy_Full-Report.pdf.
- [2] W. Kilbourne, P. McDonagh, and A. Prothero, "Sustainable consumption and the quality of life: A macromarketing challenge to the dominant social paradigm," *J. Macromarketing*, vol. 17, no. 1, pp. 4–24, 1997, doi: 10.1177/027614679701700103.
- [3] J. Fiske, "Shopping for pleasure: Malls, power, and resistance.," in *The Consumer Society Reader*, The New Pr., J. B. Schor and D. B. Holt, Eds. 1997, pp. 306–328.
- [4] K. Fletcher, *Sustainable Fashion and Textiles: Design Journeys*, Routledge. 2004.
- [5] V. Bhardwaj and A. Fairhurst, "Fast fashion: Response to changes in the fashion industry," *Int. Rev. Retail. Distrib. Consum. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 165–173, 2010, doi: 10.1080/09593960903498300.
- [6] S. Donald and S. Turconi, "Fast Fashion Lessons," *Bus. Strateg. Rev.*, vol. 18, no. 2, pp. 4–11, 2008.
- [7] D. Turker and C. Altuntas, "Sustainable supply chain management in the fast fashion industry: An analysis of corporate reports," *Eur. Manag. J.*, vol. 32, no. 5, pp. 837–849, 2014, doi: 10.1016/j.emj.2014.02.001.
- [8] L. Barnes and G. Lea-Greenwood, "Fast fashioning the supply chain: Shaping the research agenda," *J. Fash. Mark. Manag. An Int. J.*, vol. 10, no. 3, pp. 259–271, 2006, doi: 10.1108/13612020610679259.
- [9] M. P. de Brito, V. Carbone, and C. M. Blanquart, "Towards a sustainable fashion retail supply chain in Europe: Organisation and performance," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 114, no. 2, pp. 534–553, 2008, doi: 10.1016/j.ijpe.2007.06.012.
- [10] L. Mcneill and R. Moore, "Sustainable fashion consumption and the fast fashion conundrum: Fashionable consumers and attitudes to sustainability in clothing choice," *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 39, no. 3, pp. 212–222, 2015, doi: 10.1111/ijcs.12169.

- [11] B. L. MacCarthy and P. G. S. A. Jayarathne, "Fast Fashion: Achieving Global Quick Response (GQR) in the Internationally Dispersed Clothing Industry," *Innov. Quick Response Programs Logist. Supply Chain Manag.*, pp. 37–60, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-04313-0_3.
- [12] Commission mondiale sur l'environnement et le développement, "Rapport Brundtland - Avant-propos," 2000.
- [13] Z. Ozdamar Ertekin, D. Atik, and J. B. Murray, "The logic of sustainability: institutional transformation towards a new culture of fashion," *J. Mark. Manag.*, vol. 36, no. 15–16, pp. 1447–1480, 2020, doi: 10.1080/0267257X.2020.1795429.
- [14] S. Sauvé, S. Bernard, and P. Sloan, "Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research," doi: 10.1016/j.envdev.2015.09.002.
- [15] ADEME, "Economie Circulaire : Notions," *Ademe*. pp. 1–10, 2014, [Online]. Available: <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/fiche-technique-economie-circulaire-oct-2014.pdf>.
- [16] ADEME, "Nos expertises : Economie Circulaire." <https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire> (accessed Nov. 15, 2021).
- [17] A. McLaren, L. Oxborrow, T. Cooper, H. Hill, and H. Goworek, "Clothing longevity perspectives: exploring consumer expectations, consumption and use," *Prod. Lifetimes Environ. Conf. Proc.*, no. June, pp. 229–235, 2015.
- [18] United Nations Environment Programme, C. BAKKER, and C. S. SCHUIT, *The long view : Exploring Product Lifetime Extension*, vol. 154, no. 3. 2017.
- [19] E. FANGEAT, C. CHAUVIN, and Pôle usage et durée de vie, "L'allongement de la durée de vie des produits." ADEME, pp. 1–5, 2016.
- [20] European Commission, "Flash Eurobaromètre, 'Instaurer le marché unique des produits verts,'" 2012. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commfrontoffice/publicopinion/flash/fl_367_fact_fr_fr.pdf.
- [21] ADEME, "Principes généraux pour l'affichage environnemental des produits de grande consommation - Partie 23 : méthodologie d'évaluation des impacts environnementaux des articles d'habillement.," p. 47, 2016.

- [22] European Commission, "Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) T shirt, version 1," 2015.
- [23] Union des Industries Textiles, "Rapport d'activité.," 2020. [Online]. Available: <https://www.textile.fr/documents/1601482518 UIT-rapport-activite-web-09-2020.pdf>.
- [24] AFNOR, "NF EN ISO 2076 'Textiles - Fibres chimiques - Noms génériques.'" AFNOR, 2014.
- [25] R. Sinclair, *Understanding Textile Fibres and Their Properties: What is a Textile Fibre?* Elsevier Ltd, 2015.
- [26] J. Gordon Cook, *Handbook of Textile Fibres : Natural Fibers*. 1984.
- [27] International Organization for Standardization, "ISO/TR 11827:2012 Textiles — Composition testing — Identification of fibres," 2012. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/50853.html>.
- [28] H. Eberle, H. Hermeling, M. Hornberger, D. Menzer, and W. Ring, *La technologie du vêtement*. 1999.
- [29] R. Alagirusamy and A. Das, *Conversion of Fibre to Yarn: An Overview*. Elsevier Ltd, 2015.
- [30] I. A. Elhawary, *Fibre to Yarn: Staple-Yarn Spinning*. Elsevier Ltd, 2015.
- [31] G. Castelli, S. Maietta, G. Sigrisi, and I. M. Slaviero, *Reference Books of Textile Technologies - Weaving*. ACIMIT Fondazione, 2000.
- [32] E. J. Power, *Yarn to Fabric: Knitting*. Elsevier Ltd, 2015.
- [33] C. Mazza and P. Zonda, *Reference Books of Textile Technologies Knitting*. 2001.
- [34] T. L. Vigo, "Preparatory Processes," in *Textile Processing and Properties Preparation, Dyeing, Finishing and Performance*, Elsevier, 1994, pp. 1–51.
- [35] T. L. Vigo, "Fundamentals of Dyes and Dyeing Processes for Textiles," in *Textile Processing and Properties Preparation, Dyeing, Finishing and Performance*, Elsevier, 1994, pp. 52–111.
- [36] T. L. Vigo, "Methods of Applying Dyes to Textiles," in *Textile Processing and Properties Preparation, Dyeing, Finishing and Performance*, Elsevier, 1994, pp. 112–192.
- [37] T. L. Vigo, "Fabrics with Improved Aesthetic and Functional Properties," in *Textile Processing and Properties Preparation, Dyeing, Finishing and Performance*, Elsevier, 1994, pp. 193–291.

- [38] J. McLoughlin and A. Mitchell, "Fabric Finishing: Joining Fabrics Using Stitched Seams," *Text. Fash. Mater. Des. Technol.*, pp. 379–411, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-1-84569-931-4.00016-7.
- [39] 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, doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00250.x.
- [40] T. Cooper, C. Coggins, A. Davies, J. Davis, J. Hanna, and A. Moore, "Beyond Recycling: the longer life option.," *The new Economic foundation*. London, p. 24, 1994.
- [41] R. Benkirane, A. Perwuelz, and S. Thomassey, "De l'importance de la durée de vie pour l'écoconception des textiles : contribution méthodologique," 2019.
- [42] N. Beganovic and D. Söffker, "Remaining lifetime modeling using State-of-Health estimation," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 92, pp. 107–123, 2017, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.01.031.
- [43] D. Zhu, X. Zhang, and H. Ding, "Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 64, pp. 60–77, 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001.
- [44] P. Yi, X. Li, L. Yao, F. Fan, L. Peng, and X. Lai, "A lifetime prediction model for coated metallic bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells," *Energy Convers. Manag.*, vol. 183, no. December 2018, pp. 65–72, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.092.
- [45] E. Labouze, Y. Le Guern, and C. Petiot, "Analyse du Cycle de Vie comparée d'une chemise en lin et d'une chemise en coton," *Bio Intell. Serv.*, vol. 33, no. 0, pp. 1–117, 2007.
- [46] 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, no. 2, pp. 331–356, 2014, doi: 10.1007/s11367-013-0626-9.
- [47] D. M. M. Yacout, M. A. Abd El-Kawi, and M. S. Hassouna, "Cradle to gate environmental impact assessment of acrylic fiber manufacturing," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 3, pp. 326–336, 2016, doi: 10.1007/s11367-015-1023-3.
- [48] V. Castellani, S. Sala, and N. Mirabella, "Beyond the throwaway society: A life cycle-based assessment of the environmental benefit of reuse," *Integr. Environ. Assess. Manag.*, vol. 11, no. 3, pp. 373–382, 2015, doi: 10.1002/ieam.1614.

- [49] R. Frischknecht, S. Büsser, and W. Krewitt, "Environmental assessment of future technologies: How to trim LCA to fit this goal?," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 14, no. 6, pp. 584–588, 2009, doi: 10.1007/s11367-009-0120-6.
- [50] A. C. Hetherington, A. L. Borrión, O. G. Griffiths, and M. C. McManus, "Use of LCA as a development tool within early research: Challenges and issues across different sectors," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 1, pp. 130–143, 2014, doi: 10.1007/s11367-013-0627-8.
- [51] I. 14040, "Environmental management–Life Cycle Assessment– principles and framework. European Committee for Standardization (CEN)." 2006.
- [52] I. Boufateh ben Arari, "Contribution à l'évaluation de la supply chain pour la filière textile : définition des critères de développement durable.," 2011.
- [53] K. Leffland, H. Kaersgaard, and I. Andersson, "Comparing environmental impact data on cleaner technologies," no. 1, pp. 1–109, 1998, [Online]. Available: <http://library.wur.nl/WebQuery/clc/960915>.
- [54] S. Ellebæk Larsen, J. Hansen, H. H. Knudsen, H. Wenzel, H. F. Larsen, and F. M. Kristensen, "EDIPTX – Environmental assessment of textiles," 2007. [Online]. Available: <http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/2007/978-87-7052-515-2/pdf/978-87-7052-516-9.pdf>.
- [55] J. Allwood, S. Laursen, C. Rodriguez, and N. Bocken, *Well dressed ? The present and future sustainability of clothing and textiles in the United Kingdom*. 2006.
- [56] J. K. Steinberger, D. Friot, and O. Jolliet, "CASE STUDY A spatially explicit life cycle inventory of the global textile chain," pp. 443–455, 2009, doi: 10.1007/s11367-009-0078-4.
- [57] T. Cooper, S. Claxton, H. Hill, K. Holbrook, M. Hughes, and L. Oxborrow, "Clothing longevity protocol," no. October 2012, pp. 1–11, 2014.
- [58] 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, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.08.007.
- [59] S. Roos, G. Sandin, B. Zamani, G. Peters, and M. Svanström, "Will Clothing Be Sustainable? Clarifying Sustainable Fashion," in *Textile Science and Clothing Technology*, Springer., 2017, pp. 1–45.

- [60] S. Roos, G. Sandin, B. Zamani, and G. Peters, "Environmental assessment of Swedish fashion consumption. Five garments - sustainable futures.," 2015, doi: 10.13140/RG.2.1.3084.9120.
- [61] J. Strand, "Environmental Impact of the Swedish Textile Consumption -a general LCA study Jelina Strand," p. 98, 2015, [Online]. Available: http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Jelina_Strand.pdf.
- [62] Y. Zhang, X. Liu, R. Xiao, and Z. Yuan, "Life cycle assessment of cotton T-shirts in China," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, no. 7, pp. 994–1004, 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0889-4.
- [63] J. Lhotellier, E. Less, E. Bossanne, and S. Pesnel, "Impacts Environnementaux De Produits De Consommation Et Biens D ' Équipement," 2018.
- [64] Cotton Incorporated, "Lca Update of Cotton Fiber and Fabric Life Cycle Inventory," 2017.
- [65] E. Labouze, Y. Le Guern, and C. des Abbayes, "Analyse de Cycle de Vie d ' un Pantalon en Jean Sommaire," 2006.
- [66] J. Cox, S. Griffith, S. Giorgi, and G. King, "Consumer understanding of product lifetimes," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 79, pp. 21–29, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.resconrec.2013.05.003.
- [67] Cotton Incorporated, "The Life Cycle Inventory & Life Cycle Assessment of Cotton Fiber & Fabric Executive Summary," 2011.
- [68] A. Beton *et al.*, *Environmental Improvement Potential of textiles (IMPRO Textiles)*, no. January. 2014.
- [69] The Nielsen Company, "The dirt on cleaning. Home cleaning/laundry attitudes and trends around the world." [Online]. Available: <https://www.nielsen.com/wp-content/uploads/sites/3/2019/04/global-home-care-report-april-2016.pdf>.
- [70] W. Gwozdz, K. S. Nielsen, and T. Müller, "An environmental perspective on clothing consumption: Consumer segments and their behavioral patterns," *Sustain.*, vol. 9, no. 5, 2017, doi: 10.3390/su9050762.
- [71] K. Laitala and I. G. Klepp, "What affects garment lifespans? International clothing practices based on a wardrobe survey in China, Germany, Japan, the UK, and the USA," *Sustain.*, vol. 12, no. 21, pp. 1–47, 2020, doi: 10.3390/su12219151.
- [72] I. G. Klepp, K. Laitala, and S. Wiedemann, "Clothing lifespans: What should be measured and how," *Sustain.*, vol. 12, no. 15, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/su12156219.

- [73] K. Laitala and C. Boks, "Sustainable clothing design: use matters," *J. Des. Res.*, vol. 10, no. 1/2, p. 121, 2012, doi: 10.1504/JDR.2012.046142.
- [74] S. Yasin, N. Behary, G. Rovero, and V. Kumar, "Statistical analysis of use-phase energy consumption of textile products," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, no. 12, pp. 1776–1788, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1129-2.
- [75] K. Laitala, S. Profile, and B. K. Henry, *Use phase of apparel: A literature review for Life Cycle Assessment with focus on wool Seasonal Pacific Ocean Temperature Analysis version 1 View project Inclusive consumption View project*, no. March. 2018.
- [76] J. Daystar, L. Chapman, M. Moore, S. Pires, and J. Golden, "Quantifying Apparel Consumer Use Behavior in Six Countries: Addressing a Data Need in Life Cycle Assessment Modeling," vol. 11, no. 1, 2019.
- [77] K. Laitala, C. Boks, and I. G. Klepp, "Potential for environmental improvements in laundering," *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 35, no. 2, pp. 254–264, 2011, doi: 10.1111/j.1470-6431.2010.00968.x.
- [78] K. Laitala, I. G. Klepp, and B. Henry, "Use phase of wool apparel: a literature review for improving LCA," *Prod. Lifetimes Environ.*, pp. 202–207, 2017, doi: 10.3233/978-1-61499-820-4-202.
- [79] K. Laitala and I. G. Klepp, "Wool wash: Technical performance and consumer habits," *Tenside, Surfactants, Deterg.*, vol. 53, no. 5, pp. 458–469, 2016, doi: 10.3139/113.110457.
- [80] S. G. Wiedemann, L. Biggs, Q. V. Nguyen, S. J. Clarke, K. Laitala, and I. G. Klepp, "Reducing environmental impacts from garments through best practice garment use and care, using the example of a Merino wool sweater," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, no. 6, pp. 1188–1197, 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01909-x.
- [81] C. Pakula and R. Stamminger, "Electricity and water consumption for laundry washing by washing machine worldwide," *Energy Effic.*, vol. 3, no. 4, pp. 365–382, 2010, doi: 10.1007/s12053-009-9072-8.
- [82] Master of Linen, "Eco-profile of a linen shirt," 2008.
- [83] A.-H. Arild, R. Brusdal, J. T. Halvorsen-Gunnarsenz, P. M. J. Terpstra, and I. A. C. van Kessel, *Hygiene effects of laundry processes in Europe*. 2003.
- [84] G. G. Smith and R. H. Barker, "Life cycle analysis of a polyester garment," *Resour. Conserv.*

Recycl., vol. 14, no. 3–4, pp. 233–249, 1995.

- [85] M. Peterson, M. Wallace, E. Barnes, V. Martin, and J. Reed, “The future of sustainable laundry practices,” *AATCC Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 38–44, 2014, doi: 10.14504/ar.14.3.3.
- [86] S. Gupta, W. Gwozdz, and J. Gentry, “The Role of Style Versus Fashion Orientation on Sustainable Apparel Consumption,” *J. Macromarketing*, vol. 39, no. 2, pp. 188–207, 2019, doi: 10.1177/0276146719835283.
- [87] M. Giesler and E. Veresiu, “Creating the responsible consumer: Moralistic governance regimes and consumer subjectivity,” *J. Consum. Res.*, vol. 41, no. 3, pp. 840–857, 2014, doi: 10.1086/677842.
- [88] Z. Ozdamar Ertekin and D. Atik, “Sustainable Markets: Motivating Factors, Barriers, and Remedies for Mobilization of Slow Fashion,” *J. Macromarketing*, vol. 35, no. 1, pp. 53–69, 2015, doi: 10.1177/0276146714535932.
- [89] F. E. Webster, “Determining the Characteristics of the Socially Conscious Consumer,” vol. 2, no. December, 1975.
- [90] N. Özçağlar-Toulouse, “Quel sens les consommateurs responsables donnent-ils à leur consommation? Une approche par les récits de vie,” *Rech. Appl. en Mark. (French Ed.)*, vol. 24, no. 3, pp. 3–23, 2009, doi: 10.1177/076737010902400306.
- [91] S. Bly, W. Gwozdz, and L. A. Reisch, “Exit from the high street: An exploratory study of sustainable fashion consumption pioneers,” *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 39, no. 2, pp. 125–135, 2015, doi: 10.1111/ijcs.12159.
- [92] T. Fisher, T. Cooper, T. Woodward, S. Hiller, and H. Goworek, “Public Understanding of Sustainable Clothing. A report to the Department for Environment, Food and Rural Affairs,” London, 2008.
- [93] L. Lundblad and I. A. Davies, “The values and motivations behind sustainable fashion consumption,” *J. Consum. Behav.*, vol. 15, no. 2, pp. 149–162, Mar. 2016, doi: 10.1002/cb.1559.
- [94] K. Jacobs, L. Petersen, J. Hörisch, and D. Battenfeld, “Green thinking but thoughtless buying? An empirical extension of the value-attitude-behaviour hierarchy in sustainable clothing,” *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 1155–1169, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.320.
- [95] A. Legere and J. Kang, “The role of self-concept in shaping sustainable consumption: A model

- of slow fashion," *J. Clean. Prod.*, vol. 258, p. 120699, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120699.
- [96] A. Kollmuss and J. Agyeman, "Mind the Gap: Why do people act environmentally and what are the barriers to pro-environmental behavior?," *Environ. Educ. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 239–260, 2002, doi: 10.1080/13504620220145401.
- [97] S. McDonald, C. J. Oates, P. J. Alevizou, C. W. Young, and K. Hwang, "Individual strategies for sustainable consumption," *J. Mark. Manag.*, vol. 28, no. 3–4, pp. 445–468, 2012, doi: 10.1080/0267257X.2012.658839.
- [98] F. Harris, H. Roby, and S. Dibb, "Sustainable clothing: Challenges, barriers and interventions for encouraging more sustainable consumer behaviour," *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 40, no. 3, pp. 309–318, 2016, doi: 10.1111/ijcs.12257.
- [99] N. Lazaric, F. Le Guel, J. Belin, V. Oltra, S. Lavaud, and A. Douai, "Determinants of sustainable consumption in France: the importance of social influence and environmental values," *J. Evol. Econ.*, vol. 30, no. 5, pp. 1337–1366, 2020, doi: 10.1007/s00191-019-00654-7.
- [100] A. Prothero *et al.*, "Sustainable consumption: Opportunities for consumer research and public policy," *J. Public Policy Mark.*, vol. 30, no. 1, pp. 31–38, 2011, doi: 10.1509/jppm.30.1.31.
- [101] J. Thøgersen, "How may consumer policy empower consumers for sustainable lifestyles?," *J. Consum. Policy*, vol. 28, no. 2, pp. 143–177, 2005, doi: 10.1007/s10603-005-2982-8.
- [102] "Giannelloni 1998pdf.pdf." .
- [103] A. Rodhain, "« J ’ aimerais bien , mais j ’ peux point ... » : exploration des écarts entre attitude et com- portement en consommation alternative.," *Manag. Avenir*, vol. 3, no. 61, pp. 50–70, 2013.
- [104] I. Zaiem, "Le comportement écologique du consommateur : Modélisation des relations et déterminants," *La Rev. des Sci. Gest. Dir. Gest.*, no. 214–215, pp. 75–88, 2005, doi: 10.1051/larsg:2005032.
- [105] N. Onel *et al.*, "Tell me your story and I will tell you who you are: Persona perspective in sustainable consumption," *Psychol. Mark.*, vol. 35, no. 10, pp. 752–765, 2018, doi: 10.1002/mar.21132.
- [106] M. Koszewska, "A typology of polish consumers and their behaviours in the market for sustainable textiles and clothing," *Int. J. Consum. Stud.*, vol. 37, no. 5, pp. 507–521, 2013, doi:

10.1111/ijcs.12031.

- [107] S. S. Muthu, *Environmental impacts of the use phase of the clothing life cycle*. Elsevier Ltd, 2015.
- [108] S. Granello, J. Ak, R. S. Johansson, and Granberg H, "Consumer behaviour on washing," [Online]. Available: <http://mistrafuturefashion.com/wp-content/uploads/2015/12/D4.5-MiFuFa-Report-P4-Consumer-behaviour-on-washing.pdf>.
- [109] A. E. Scheepens, J. G. Vogtländer, and J. C. Brezet, "Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable," *J. Clean. Prod.*, vol. 114, pp. 257–268, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.075.
- [110] INSEE, "Population selon le sexe et la catégorie socioprofessionnelle Données annuelles de 2014 à 2020," 2021. [Online]. Available: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381478>.
- [111] INSEE, "Pyramide des âges interactive," 2021. <https://www.insee.fr/fr/outil-interactif/5014911/pyramide.htm#!v=2&g&c=0> (accessed Aug. 11, 2021).
- [112] C. H. Schwepker and T. B. Cornwell, "An Examination of Ecologically Concerned Consumers and Their Intention to Purchase Ecologically Packaged Products," *J. Public Policy Mark.*, vol. 10, no. 2, pp. 77–101, 1991, doi: 10.1177/074391569101000205.
- [113] J. H. Ward, "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 58, no. 301, pp. 236–244, 1963, doi: 10.1198/016214503000000468.
- [114] J.-C. Combessie, "II. L'entretien semi-directif," in *La méthode en Sociologie*, La Découverte, Ed. 2007, p. 128.
- [115] Ipsos and Ariel (P&G), "Les Français et le partage des tâches ménagères." p. 5, 2018.
- [116] L. Bardin, *L'analyse de contenu*, Quadrige. 2013.
- [117] INSEE, "Pyramide des âges. Bilan démographique 2019." .
- [118] J. R. Quinlan, "Induction of decision trees," *Mach. Learn.*, vol. 1, no. 1, pp. 81–106, 1986, doi: 10.1007/bf00116251.
- [119] K. Laitala, I. G. Klepp, and B. Henry, "Global laundering practices Alternatives to machine washing," vol. 12, no. October, pp. 1–5, 2017.
- [120] O. N. Sustainability and W. Habits, "PAN-EUROPEAN CONSUMER SURVEY," 2014.

- [121] S. Pesnel, A. Perwuelz, and V. Pasquet, "Résultats du sondage sur l'entretien et la fin de vie des articles textiles," 2012.
- [122] D. Gintis and E. J. Mead, "The Mechanism of Pilling," pp. 578–585, 1958.
- [123] R. Beltran, L. Wang, and X. Wang, "Predicting the Pilling Propensity of Fabrics through Artificial Neural Network Modeling," *Text. Res. J.*, vol. 75, no. 7, pp. 557–561, 2005, doi: 10.1177/0040517505056872.
- [124] W. D. Cooke, "2-The influence of fibre fatigue on the pilling cycle part I: Fuzz fatigue," *J. Text. Inst.*, vol. 73, no. 1, pp. 13–19, 1982, doi: 10.1080/00405008208658905.
- [125] W. D. Cooke, "FATIGUE ON THE PILLING CYCLE PART II : FIBRE ENTANGLEMENT," vol. 74, no. 3, pp. 101–108, 1983.
- [126] W. D. Cooke, "21—Fibre fatigue and the pilling cycle part III: Pill wear-off and fabric attrition," *J. Text. Inst.*, vol. 75, no. 3, pp. 201–211, 1984, doi: 10.1080/00405008408658483.
- [127] M. E. Baird, P. Hatfield, and G. Morris, "Pilling of fabrics a study of nylon and nylon blended fabrics," *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 47, no. 4, pp. T181–T201, 1956, doi: 10.1080/19447027.1956.10750392.
- [128] A. Iredale and Y. W. Wan, "29—the Influence of Fibre Length and Yarn Twists on the Performance of Certain Coarse-Gauge Weft-Knitted Fabrics," *J. Text. Inst.*, vol. 68, no. 8, pp. 249–256, 1977, doi: 10.1080/00405007708631390.
- [129] Westenberg, "Some Measurements and Observations on Pilling," Delft, 1963.
- [130] K. Millington, "Using Ultraviolet Radiation to Reduce Pilling of Knitted Wool and Cotton," *Text. Res. J.*, vol. 68, no. 6, pp. 413–421, 1998.
- [131] M. Haigh and G. Robinson, "Tailor Wool Crimp Frequency to Fabric Needs," *Farming Ahead*, vol. 121, pp. 64–65, 2002.
- [132] B. A. McGregor and Rural Industries Research and Development Corporation (Australia), "Corporation, Australian cashmere : attributes and processing : a report for the Rural Industries Research and Development," 2002.
- [133] P. V. Alston, "Pilling of Sweatshirts That Are a 50 / 50 Blend of Polyester and Cotton," *Text. Res. J.*, vol. 64, no. 10, pp. 592–596, 1994, doi: 10.1177/004051759406401007.

- [134] R. Beltran, L. Wang, and X. Wang, "Predicting the pilling tendency of wool knits," *J. Text. Inst.*, vol. 97, no. 2, pp. 129–136, 2006, doi: 10.1533/joti.2005.0135.
- [135] P. H. Yap, X. Wang, L. Wang, and K. L. Ong, "Prediction of Wool Knitwear Pilling Propensity using Support Vector Machines," *Text. Res. J.*, vol. 80, no. 1, pp. 77–83, 2010, doi: 10.1177/0040517509102226.
- [136] N. Richards, "The pilling of plain- and rib-knit wool fabric," *J. Text. Inst. Trans.*, vol. 53, no. 8, pp. T357–T369, 1962, doi: 10.1080/19447026208659882.
- [137] E. K. Brickenden, "Pilling—Its Control and Laboratory Measurement," in *Canadian Textile Seminar 6*, 1958, pp. 91–95.
- [138] International Wool Secretariat, "Wool Science Review," 1972.
- [139] A. Barella, X. Bardi, and L. Castro, "Hairiness modification by yarn/yarn and yarn/metal friction," *Mellian Textilberichte*, vol. 72, no. 1, pp. E3–E4, 1991.
- [140] J. O. Ukponmwan, A. Mukhopadhyay, and K. N. Chatterjee, "Pilling," *Text. Prog.*, vol. 28, no. 3, pp. 1–57, 1998, doi: 10.1080/00405169808688874.
- [141] J. B. Timmis, "How to live with Pilling," *Knitt. Int.*, vol. 83, no. 9, pp. 82–86, 1976.
- [142] W. Conti and E. Tassinari, "A Simplified Kinetic Model for the Mechanism of Pilling," *J. Text. Inst.*, vol. 65, no. 3, pp. 119–125, 1974, doi: 10.1080/00405007408630358.
- [143] R. Beltran, L. Wang, and X. Wang, "Measuring the influence of fibre-to-fabric properties on the pilling of wool fabrics," *J. Text. Inst.*, vol. 97, no. 3, pp. 197–204, 2006, doi: 10.1533/joti.2005.0142.
- [144] C. Candan and L. Önal, "Dimensional, pilling, and abrasion properties of weft knits made from open-end and ring spun yarns," *Text. Res. J.*, vol. 72, no. 2, pp. 164–169, 2002, doi: 10.1177/004051750207200213.
- [145] A. M. Coldea and D. Vlad, "Study regarding the physical-mechanical properties of knits for garments-pilling performance," *MATEC Web Conf.*, vol. 121, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201712101002.
- [146] M. Rejali, H. Hasani, S. Ajeli, and M. Shanbeh, "Optimization and prediction of the pilling performance of weft knitted fabrics produced from wool/acrylic blended yarns," *Indian J. Fibre Text. Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 83–88, 2014.

- [147] Ruhul and M. R. I. Rana, "Analysis of Pilling Performance of Different Fabric Structures With Respect To Yarn Count and Pick Density," *Ann. Univ. Oradea, Fascicle Text. Leatherwork*, vol. XVI, no. 1, pp. 9–14, 2015, [Online]. Available: <http://textile.webhost.uoradea.ro/Annals/Contents 13.html>.
- [148] G. Ö. Kayseri and E. Kirtay, "Part I. Predicting the pilling tendency of the cotton interlock knitted fabrics by artificial neural network," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 10, no. 4, pp. 62–71, 2015, doi: 10.1177/155892501501000417.
- [149] G. Ö. Kayseri and E. Kirtay, "Part II. Predicting the pilling tendency of the cotton interlock knitted fabrics by artificial neural network," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 10, no. 4, pp. 62–71, 2015, doi: 10.1177/155892501501000417.
- [150] R. Furferi, L. Governi, and Y. Volpe, "Machine Vision-Based Pilling Assessment: A Review," *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 10, no. 3, p. 155892501501000, 2018, doi: 10.1177/155892501501000320.
- [151] COFREET, "Que signifient les symboles présents sur mes étiquettes?" https://www.lavermonlinge.com/FR/symboles_d_entretien/signification_des_symboles.asp (accessed Aug. 11, 2021).
- [152] B. Chen, P. C. Tai, R. Harrison, and Y. Pan, "Novel hybrid hierarchical-K-means clustering method (H-K-means) for microarray analysis," *2005 IEEE Comput. Syst. Bioinforma. Conf. Work. Poster Abstr.*, pp. 105–108, 2005, doi: 10.1109/CSBW.2005.98.
- [153] O. Abu Abbas, "Comparison between data clustering algorithms.," *Int. Arab J. Inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 320–325, 2008, [Online]. Available: <https://iajit.org/PDF/vol.5,no.3/15-191.pdf>.
- [154] J. A. Hartigan and M. A. Wong, "A K-Means Clustering Algorithm," *J. R. Stat. Soc. Ser. C (Applied Stat.)*, vol. 28, no. 1, pp. 100–108, 1979.
- [155] L. Yang and M. Deng, "Based on k-Means and Fuzzy k-Means Algorithm Classification of Precipitation," in *Proceedings - 2010 International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2010*, 2010, vol. 1, pp. 218–221, doi: 10.1109/ISCID.2010.72.
- [156] Y. Hu and C. X. Zhao, "Unsupervised texture classification by combining multi-scale features and K-means classifier," in *Proceedings of the 2009 Chinese Conference on Pattern Recognition, CCPR 2009, and the 1st CJK Joint Workshop on Pattern Recognition, CJKPR*, 2009, pp. 364–368, doi: 10.1109/CCPR.2009.5344087.

- [157] A. Clement and B. Vigouroux, "Unsupervised classification of pixels in color images by hierarchical analysis of bi-dimensional histograms," in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2002, pp. 85–89, doi: 10.4135/9781412939591.n1179.
- [158] M. J. Li, M. K. Ng, Y. M. Cheung, and J. Z. Huang, "Agglomerative fuzzy K-Means clustering algorithm with selection of number of clusters," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 20, no. 11, pp. 1519–1534, 2008, doi: 10.1109/TKDE.2008.88.
- [159] D. M. Rice, "Causal Reasoning," *Calc. Thought*, pp. 95–123, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-410407-5.00004-0.
- [160] P. Ambika, *Machine learning and deep learning algorithms on the Industrial Internet of Things (IIoT)*, 1st ed., vol. 117, no. 1. Elsevier Inc., 2020.
- [161] P. J. Rousseeuw, "Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 20, pp. 53–65, 1987, doi: 10.1016/0377-0427(87)90125-7.
- [162] SciPy, "scipy.interpolate.interp1d." <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.interp1d.html#scipy.interpolate.interp1d> (accessed Oct. 01, 2021).
- [163] SciPy, "Interpolation (scipy.interpolate)." <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/interpolate.html#d-interpolation-interp1d> (accessed Oct. 01, 2021).
- [164] R. Benkirane, S. Thomassey, L. Koehl, and A. Perwuelz, "Influence of lifetime on textile product LCA," *2016 [avniR] Conf.*, p. 59100, 2016, [Online]. Available: http://avnir.org/documentation/Recherche/ECLin_Poster_Congres_Avnir.pdf.
- [165] Cotton Incorporated and Cotton Incorporated and PE International, "The Life Cycle Inventory & Life Cycle Assessment of Cotton Fiber & Fabric Executive Summary," vol. 2, 2012.
- [166] Plateforme AvniR, "Les logiciels ACV et bases de données." .
- [167] É. Péchenart and A. Roquesalane, "SimaPro : logiciel d ' analyse de cycle de vie," *Tech. L'Ingénieur*, vol. 33, no. 0, p. 24, 2014.
- [168] 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, doi:

10.1016/j.tre.2005.06.003.

- [169] 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, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.07.018.
- [170] ITMF, "International Production Cost Comparison. Spinning/Texturing/Weaving/Knitting," 2010.
- [171] Miele, "Mode d'emploi Lave-linge W3268." p. 68, 2012.
- [172] "Miele T8722." <http://www.secheling.eu/miele-t8722/> (accessed Oct. 13, 2021).
- [173] ADEME, "Efficacité énergétique des produits blancs en Europe : suivi du marché basé sur l'analyse des ventes Version résumée," 2016. [Online]. Available: <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/1799/efficacite-energetique-produits-blancs-europe-2016-rapport.pdf?modal=false>.
- [174] ADEME, "Modélisation et évaluation des impacts environnementaux de produits de consommation et biens d'équipement," pp. 1–188, 2018.
- [175] JRC European commission, *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. 2011.
- [176] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, "International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment," *Eur. Comm.*, p. 115, 2010, doi: 10.2788/38479.
- [177] EEA/Eionet, "Textiles and the environment in a circular economy. Retrieved 5 December 2020," 2019. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/resource-efficiency/textiles-in-europe-s-circular-economy>.
- [178] I. E. Napper and R. C. Thompson, "Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 112, no. 1–2, pp. 39–45, 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.025.
- [179] F. S. Cesa, A. Turra, H. H. Checon, B. Leonardi, and J. Baroque-Ramos, "Laundering and textile parameters influence fibers release in household washings," *Environ. Pollut.*, vol. 257, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113553.

- [180] G. Agarwal, L. Koehl, A. Perwuelz, and K. S. Lee, "Interaction of textile parameters, wash-ageing and fabric softener with mechanical properties of knitted fabrics and correlation with textile-hand. I. Interaction of textile parameters with laundry process," *Fibers Polym.*, vol. 12, no. 5, pp. 670–678, 2011, doi: 10.1007/s12221-011-0670-7.
- [181] F. Wu, S. Liang, and X. Ding, "Study on the mechanism of woven cotton fabric during steam ironing," *Key Eng. Mater.*, vol. 671, pp. 179–185, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.671.179.
- [182] S. Liang, N. Pan, X. Wu, and X. Ding, "Effects of pressure-free steam ironing on cotton fabric surfaces and wrinkle recovery," *Text. Res. J.*, vol. 88, no. 22, pp. 2532–2543, 2018, doi: 10.1177/0040517517725124.

Annexes

MODULE		QUANTITES	UNITE
FIL		1	kg
MATIERE			
EAU	Tapwater{CN} market for APOS, S	2,2	kg
COTON	Cotton fibre {CN} cotton production APOS, S	1/1-0,145)*0,18	kg
ACRYLIQUE	Fibre Acrylique	1/1-0,145)*0,34	kg
POLYAMIDE	Polyamide 6,6 fibres (PA 6,6), from adipic acid and hexamethylene diamine (HMDA), prod. Mix	1/1-0,145)*0,16	kg
LAINE	Sheep fleece in the grease {RoW} sheep production, for wool APOS, S	1/1-0,145)*0,10	kg
VISCOSE	Fibre, viscose {GLO} fibre production, viscose APOS, S	1/1-0,145)*0,14	kg
POLYESTER	Fibre, polyester {GLO} market for fibre, polyester APOS, S	1/1-0,145)*0,06	kg
LIN	Fibre, flax {GLO} market for fibre, flax APOS, S	1/1-0,145)*0,02	kg
ENERGIE			
ELECTRICITE	Electricity, high voltage {CN} market for APOS, S	4,15	kWh
SOURCE	Larsen et al. (2007) [54]		

Annexe 1 : Modélisation du fil sur Simapro.

MODULE		QUANTITES	UNITE
TRICOT		1	kg
MATIERE			
FIL		1	kg
ENERGIE			
ELECTRICITE	Electricity, high voltage {CN} market for APOS, S	0,16	kWh
CHALEUR	Heat, district or industrial, other than natural gas {CN} heat production, light fuel oil	0,19	MJ
SOURCE	ITMF (2010) International production cost coparison. International Manufacturers Federation, Zürich [170]		

Annexe 2 : Modélisation du tricotage.

MODULE		QUANTITES	UNITE
PULL CONFECTIONNE		1	kg
MATIERE			
TRICOT		1/(1-0,13)	kg
SOURCE	ITMF (2010) International production cost coparison. International Manufacturers Federation, Zürich [170]		

Annexe 3 : Modélisation de la confection du pull.

PROGRAMME	TEMPERATURE	CAPACITE (KG)	QUANTITE DE LESSIVE	CONSOMMATION D'EAU (KG)	CONSOMMATION D'ENERGIE (KWH)
COTON	30	3	0,0216*3	49	0,3
	40	10	0,0216*10	90	0,95
	60	10	0,0216*10	90	1,7
	90	10	0,0216*10	90	2,8
SYNTHETIQUE	40	3,5	0,0216*3,5	45	0,95
	60	3,5	0,0216*3,5	48	0,95
LAINE	20	2	0,0216*2	45	0,45
	30	2	0,0216*2	39	0,23
	40	2	0,0216*2	45	0,6
COURT/MIXTE	20	3	0,0216*3	34	0,3
	30	3	0,0216*3	34	0,3
	40	3	0,0216*3	34	0,3
	60	3	0,0216*3	39	0,7
DELICAT	30	2,5	0,0216*2,5	70	0,45
	40	2,5	0,0216*2,5	70	0,45
SOURCES	Miele W3268 [171]				
MODULES					
ELECTRICITE	Electricity grid mix, AC, consumption mix, at consumer, 230V FR S				
EAU	Tap water {Europe without Switzerland} market for APOS, S				

Annexe 4 : Modélisation des programmes et températures de lavage.

MODULE		QUANTITES	UNITE
SECHE-LINGE		7	kg
ENERGIE			
ELECTRICITE	Electricity grid mix, AC, consumption mix, at consumer, 230 FR S	3,8	kWh
SOURCE	Miele T8722 [172]		

Annexe 5 : Modélisation du sèche-linge d'une capacité de 7 kg.

MODULE		QUANTITES	UNITE
REPASSAGE		1	pièce
ENERGIE			
ELECTRICITE	Electricity grid mix, AC, consumption mix, at consumer, 230 FR S	0,285	kWh
SOURCE	PEF et Affichage environnemental ADEME [21], [22]		

Annexe 6 : Modélisation du repassage d'un pull.

Entrées connues de la technosphère (matériaux/carburants)	Quantité	Unité
Ethoxylated alcohol (AE11) {RER} ethoxylated alcohol (AE11) production, palm oil APOS, S	30	g
Ethoxylated alcohol (AE7) {RER} ethoxylated alcohol (AE7) production, palm kernel oil APOS, S	50	g
Alkylbenzene sulfonate, linear, petrochemical {RER} production APOS, S	80	g
Acetic acid, without water, in 98% solution state {RER} acetaldehyde oxidation APOS, S	60	g
Layered sodium silicate, SKS-6, powder {RER} production APOS, S	40	g
Zeolite, powder {RER} production APOS, S	210	g
Sodium percarbonate, powder {RER} production APOS, S	180	g
Sodium perborate, monohydrate, powder {RER} production APOS, S	90	g
Sodium perborate, tetrahydrate, powder {RER} production APOS, S	120	g
Sodium sulfate, anhydrite {RER} sodium sulfate production, from natural sources APOS, S	10	g
Process water, ion exchange, production mix, at plant, from groundwater RER S	130	g

Annexe 7 : Modélisation de la lessive normée NF EN ISO 6330.

MODULE		QUANTITES	UNITE
DISTRIBUTION	Chine -> France	1	kg
TRANSPORT			
USINE -> PORT	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {GLO} market for APOS, S	22	kgkm
PORT -> PORT	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for APOS, S	19122	kgkm
PORT -> ENTREPOT	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3 {GLO} market for APOS, S	191,8	kgkm
SOURCE	Trajet Chine – France modélisé sur le site Ecotransit.		

Annexe 8 : Modélisation de la phase de distribution du pull.

2 PORTER AVANT ENTRETIEN (2P:1L)		BASE (1P:1L)	USP	USL
DUF (SEMAINES)		26		
FRAGILE	DV	3	3	6
	FR	8,7	8,7	2,94
	N _{ENT}	26	13	13
MOYEN	DV	23	23	46
	FR	1,1	1,1	0,413
	N _{ENT}	26	13	13
SOLIDE	DV	47	47	94
	FR	0,6	0,6	0,203
	N _{ENT}	26	13	13
5 PORTER AVANT ENTRETIEN (5P:1L)		Base (1P:1L)	USL	USL
DUF (SEMAINES)		26		
FRAGILE	DV	3	3	6
	FR	8,7	8,7	4,3
	N _{ENT}	26	13	13
MOYEN	DV	23	23	115
	FR	1,1	1,1	0,6
	N _{ENT}	26	13	13
SOLIDE	DV	47	47	235
	FR	0,6	0,6	0,1
	N _{ENT}	26	5,2	5,2
10 PORTER AVANT ENTRETIEN (10P:1L)		Base (1P:1L)	USL	USL
DUF (SEMAINES)		26		
FRAGILE	DV	3	3	6
	FR	8,7	8,7	4,3
	N _{ENT}	26	13	13
MOYEN	DV	23	23	230
	FR	1,1	1,1	0,6
	N _{ENT}	26	13	13
SOLIDE	DV	47	47	470
	FR	0,6	0,6	0,1
	N _{ENT}	26	2,6	2,6

Annexe 9 : Récapitulatif des paramètres d'ACV des scénarii X porter avant lavage pour X = 2,5,10 et pour chaque type de pulls.

METHODOLOGIE DE PREDICTION DE LA DUREE DE VIE DES VETEMENTS SELON LA QUALITE DES TEXTILES ET LE COMPORTEMENT DES CONSOMMATEURS - CONTRIBUTION A LA REDUCTION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Résumé

La durée de vie des produits est un facteur important dans l'évaluation des impacts environnementaux. Cependant, la durée de vie des articles textiles est très difficile à évaluer notamment à cause de la variété des usages par les consommateurs (entretien, porté) et de la nature des textiles (fibres et structures textiles).

L'objectif de cette thèse est de mettre en place une méthodologie de prédiction de la durée de vie des vêtements en prenant en compte leur qualité, les usages et les sensibilités des consommateurs.

Cette méthodologie, construite dans un cadre transdisciplinaire, met en interaction l'étude du vieillissement des vêtements en laboratoire avec l'étude du comportement des consommateurs.

Ainsi, nous avons adapté un test de laboratoire pour évaluer le vieillissement de pulls-overs sous l'effet de frottements répétés. Ce protocole a été mis en place sur une série de pulls et validé par une campagne de tests au porter réalisé sur les mêmes vêtements. Les dégradations observées sont des bouloches, qui sont similaires dans les deux cas. Nous avons classé les pulls suivant leurs typologies de comportement à la dégradation avec une méthode de classification dites des K-moyennes. A partir de ces résultats, nous proposons un modèle de prédiction du vieillissement des pulls en fonction de leurs caractéristiques techniques. En définissant un seuil de défaut acceptable par les consommateurs, il est possible d'estimer la durée de vie des vêtements à partir des comportements prédits par ce modèle.

Parallèlement, un sondage auprès d'un échantillon de consommateurs a été réalisé. Les résultats ont été exploités et classifiés selon une méthode de classification hiérarchique non-supervisée. Nous avons défini 4 typologies de consommateurs selon leur comportement d'achats, 3 typologies pour leur rapport à l'environnement, et 3 selon les pratiques d'entretien de leur linge. Cette étude conclue sur une modélisation de l'usage d'un vêtement prenant en compte la diversité des profils de consommateurs et leurs usages

Enfin nous avons évalué l'influence sur les impacts environnementaux des résultats précédents grâce à l'Analyse de Cycle de Vie. En intégrant à des scénarios d'ACV les comportements de vieillissement des vêtements et les comportements d'usages associés aux différentes typologies de consommateurs nous avons montré les potentielles réductions d'impacts environnementaux possibles par l'augmentation de la durée de vie d'un vêtement et le choix de bonnes pratiques d'usage.

Mots clés : Comportement consommateur, Qualité textile, Durée de vie, Vieillessement

METHODOLOGY FOR PREDICTING THE LIFE SPAN OF CLOTHING ACCORDING TO QUALITY OF TEXTILES AND CONSUMER BEHAVIOR - CONTRIBUTION TO THE REDUCTION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS

Abstract

The life span of products is an important factor in the evaluation of environmental impacts. However, the lifetime of textile articles is very difficult to evaluate, especially because of the variety of uses by consumers (maintenance, wear) and the nature of textiles (fibers and textile structures).

The objective of this thesis is to develop a methodology for predicting the life span of garments by taking into account their quality, uses and consumer sensitivities.

This methodology, built in a transdisciplinary framework, interacts the study of clothing aging in the laboratory with the study of consumer behavior.

Thus, we have adapted a laboratory test to evaluate the aging of pullovers under the effect of repeated rubbing. This protocol was implemented on a series of pullovers and validated by a campaign of wear tests performed on the same garments. The observed degradation is pilling, which is similar in both cases. We have classified the pullovers according to their typologies of degradation behavior with a classification method called K-means. We have classified the pullovers according to their typologies of degradation behavior with a classification method called K-means. From these results, we propose a model to predict the aging of the pullovers according to their technical characteristics. By defining a threshold of defect acceptable by consumers, it is possible to estimate the life span of the clothes from the behaviors predicted by this model.

In parallel, a survey of a sample of consumers was conducted. The results were analyzed and classified using an unsupervised hierarchical classification method. We defined 4 typologies of consumers according to their purchasing behavior, 3 typologies for their relationship to the environment, and 3 according to their laundry care practices. This study concludes with a model of the use of a garment taking into account the diversity of consumer profiles and their uses.

Finally, we evaluated the influence on the environmental impacts of the previous results thanks to the Life Cycle Assessment. By integrating into LCA scenarios the aging behavior of clothing and the usage behavior associated with different consumer typologies, we have shown the potential reductions in environmental impacts possible by increasing the life span of a garment and choosing good usage practices.

Keywords: Lifespan, Textile Quality, Consumer behavior, Ageing