

Thèse de doctorat

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Lille

spécialité : Mécanique énergétique, Génie des procédés, Génie civil

présentée par

Antoine COSNE

Éco-conception d'étoffes en polyester pour limiter le relargage de fragments de fibres microplastiques lors du premier lavage.

soutenue publiquement le 20/11/2025 devant la Commission d'examen composée de :

Nawar KADI	Dir. de recherche, University of Borås	Rapporteur
Florence DELOR-JESTIN	MCF HDR, Université Clermont Auvergne	Rapporteuse
Sophie DUQUESNE	Professeure, Université de Lille	Présidente
Olivier POTIER	MCF HDR, Université de Lorraine	Examineur
Fabienne LAGARDE	MCF, Le Mans Université	Examinatrice
Nemeshwaree BEHARY	MCF HDR, Université de Lille	Directrice
Anne PERWUELZ	Professeure émérite, Université de Lille	Co-Directrice
Marie STEPHAN	Ingénieure, DECATHLON	Invitée
Nolwenn TOUBOULIC	Ingénieure, ADEME	Invitée

REMERCIEMENTS

La réalisation des travaux de thèse présentés dans ce mémoire est l'aboutissement de trois années de projet, mais c'est avant tout le fruit de rencontres, d'échanges et de collaborations précieuses. Tout seul je n'aurais pas eu la capacité d'obtenir de tels résultats, c'est pourquoi je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce projet.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon équipe d'encadrement pour sa confiance, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce parcours. Merci à mes directrices de thèse, Nemeshwaree BEHARY et Anne PERWUELZ, pour votre rigueur scientifique et votre encadrement dans l'univers de la recherche académique. Merci à mes tuteurs industriels chez DECATHLON, Marie STEPHAN pour ton accompagnement technique et ta bienveillance, Marion ROCHEFORT, Julie ARNOULD, Emilie MAUFFET, d'abord pour m'avoir recruté, puis pour m'avoir guidé tour à tour dans la réalité du terrain de jeu de l'industrie textile. Mes remerciements vont également à l'école doctorale ENGSYS de l'Université de Lille pour mon parcours de formation.

Ce projet de recherche n'aurait pu voir le jour sans le soutien des institutions qui l'ont financé. Je remercie l'ANRT (Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie) pour le financement partiel de cette thèse CIFRE, ainsi que l'ADEME pour sa subvention accordée au projet, et tout particulièrement Nolwenn TOUBOULIC, pour son suivi et son intérêt pour ma recherche.

Mon immersion au sein de DECATHLON a été une expérience humaine et professionnelle d'une grande richesse. Un immense merci à mes collègues du projet pour avoir contribué au succès de ces recherches mais aussi pour m'avoir appris de nombreux enseignements, Denis LAUREAU pour la transmission des plans d'expériences Taguchi, Karim HAMADACHE et Hélène L'HEBRELLEC pour vos connaissances en fils synthétiques, Philippe OBER pour ton expertise du tissage, Laurent LONGUEPEE et Soizic MAILLARD pour votre maîtrise du tricotage, Shuang ZHANG pour ton expérience sur les traitements de surface, Pierre MATTEONI et Arthur DA SILVA pour votre contribution inestimable de projet de fin d'études sous ma responsabilité technique, Sandra BOULY et Claire BOUDIE pour votre accompagnement au laboratoire, et enfin Sliman ALMUHAMED, Lucien COGNIAUX, et Jean-Noël D'AVRIL, mes experts référents toujours de bons conseils. Je tiens à souligner la dimension internationale de ce projet et à remercier les équipes en pays

de production pour leur collaboration à distance : Inès DE GOULAIN, Mavis ZOU, et Matthew ZHANG. Un grand merci également aux équipes que j'ai rejoins, DRY-ROBUST puis SD TEXTILE, pour m'avoir si bien intégré à la grande famille de DECATHLON et apporté du bonheur humain au quotidien : Killian BISCAYE, Margaux TOULEMONDE, Romain DANJOU, Constance QUANCARD, Samah ESSEMLALI, Rémi DEKEISTER, Bouraoui KECHICHE, Stéphanie BAILLY. Merci également aux équipes supports qui ont facilité mes travaux, en termes de budget et d'administratif, notamment Domitille LUGEZ, Robin DOUTRIAUX et Viktoriya BOGATYREVA. Et plus largement, je tiens à remercier toutes les personnes que j'ai côtoyé lors de ces trois années dans l'entreprise, vos rencontres m'ont profondément marqué.

Je n'oublie pas mes collègues du laboratoire GEMTEX avec qui j'ai partagé ces années de recherche. Merci Damien SOULAT et Aurélie CAYLA pour vos conseils lors des CSI, et merci Ludovic KOEHL pour ton recul et ton accompagnement sur la filature. Merci aux étudiantes, Agathe RADOUANT pour ta contribution expérimentale en stage de première année au laboratoire, Jana EICHBERGER et Clara REBHOLZ pour votre semestre international sur le projet. Merci à Kim-Duc TRAN et Noémie PICHON pour le traitement des données dans un contexte environnemental élargi. Une pensée spéciale pour l'ensemble des doctorants du laboratoire, compagnons de route indispensables dans cette aventure, et surtout à l'association En Avant Doctorants que nous avons relancé pour dynamiser la Maison de la Science. Sans oublier les services supports administratifs, du secrétariat, de l'accueil, du patrimoine, de la communication, les techniciens et les enseignants chercheurs qui m'ont accompagné.

La richesse de cette thèse repose également sur les nombreuses collaborations externes. Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers nos partenaires industriels pour leur volonté de travailler sur ce sujet de recherche textile environnemental que sont les fragments de fibres microplastiques. Ils m'ont ouvert leurs portes pour travailler selon la méthode Taguchi et développer tous les échantillons de la thèse à une dimension industrielle. Un immense remerciement aux équipes de filage-texturation d'ANTEX (Espagne) et principalement Marta MOLIST et Rafa VALDES, de filature de RIETER (Suisse) avec Michael WILL et John SPATAFORA, de tricotage chez SAMPAIO (Portugal) notamment José ANTONIO et João MENDES, de tissage chez CONCORDIA (Belgique) accompagné par Fanny VANDERSCHULDEN et Carl BAEKELANDT, ainsi que les tricoteurs industriels chinois DEJUN et MINGZHOU. Je remercie également l'équipe du laboratoire partenaire INTERTEK, en particulier Gilles DUROT, Nazih FREJ et Karine

ROUBLIQUE, pour la réalisation de l'ensemble des tests de lavage de tous les textiles développés durant cette thèse. Merci aussi à TMC The Microfibre Consortium, et spécifiquement Kelly SHERIDAN et Elliot BLAND, pour m'avoir guidé à travers la problématique des fragments de fibres.

Enfin, parce qu'une thèse est aussi une épreuve d'endurance personnelle, je souhaite remercier mes proches. Merci à ma famille pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements constants. Merci à mes proches qui ont su m'écouter et me changer les idées quand cela était nécessaire. Un merci tout particulier à Laurine, pour ta présence, ta patience et ton soutien au quotidien.

RÉSUMÉ

L'industrie textile est responsable de 35% des microplastiques relargués dans les océans. Un textile relargue des fragments de fibres microplastiques tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire dès les étapes de production pour transformer la fibre en fil puis en étoffe, en passant par l'usage au porter et le lavage en machine à laver, jusqu'à sa fin de vie. Cette thèse vise à concevoir des textiles en polyester moins émetteurs de fragments de fibres microplastiques dans l'environnement. Pour y parvenir, le niveau de relargage de fibres microplastiques au premier lavage des textiles est mesuré en fonction de leurs paramètres de conception. Afin de déterminer l'impact des choix de conception sur le relargage, les plans d'expériences basés sur la méthode Taguchi sont utilisés. Ils permettent d'étudier l'influence de chaque procédé de transformation textile (filage, filature, tissage, tricotage, et traitements de surface). Les résultats de ces plans d'expériences mettent en évidence les procédés de transformation textile les plus impactant sur le relargage de fragments de fibres microplastiques lors du premier lavage en sortie d'usine. Ainsi, des règles de conception sont formalisées pour permettre aux ingénieurs d'estimer et de réduire le relargage des textiles au premier lavage. La finalité de ces recherches est d'appliquer ces résultats au développement de textiles en polyester générant moins de fragments de fibres microplastiques dans l'environnement.

ABSTRACT

The textile industry is responsible for 35% of microplastics released into the oceans. Textiles release microplastic fibre fragments throughout their life cycle, from the production stages of transforming the fibre into yarn and then fabric, through wear and machine washing, to the end of their life. This thesis aims to design textiles that release fewer microplastic fibre fragments into the environment. To achieve this, the level of microplastic fibre release during the first wash of textiles is measured according to their design parameters. In order to determine the impact of design choices on the release, Taguchi design of experiments methodology is used. These enable to study the influence of each textile transformation process (spinning, weaving, knitting, and surface treatments). The results of these experimental designs highlight the textile processes that have the greatest impact on the release of microplastic fibre fragments during the first wash after manufacturing. Design rules have therefore been formalised to enable engineers to estimate and reduce the release from textiles during the first wash. The aim of this research is to apply these findings to the development of polyester textiles that generate fewer microplastic fibre fragments in the environment.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
TABLE DES MATIÈRES	7
INDEX DES FIGURES	12
INDEX DES TABLEAUX	15
INDEX DES EQUATIONS	17
GLOSSAIRE	18
LISTE DES ABREVIATIONS	20
INTRODUCTION	21
1. CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART	25
1.1. POLLUTION MICROPLASTIQUE	25
1.1.1. CHIFFRES CLÉS	25
1.1.2. SOURCES	26
1.1.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL	27
1.1.4. CONSÉQUENCES SANITAIRES	28
1.2. FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES	30
1.2.1. DÉFINITION	30
1.2.2. CARACTÉRISATION	31
1.2.2.1. QUALITATIVE	31
1.2.2.2. QUANTITATIVE	32
1.2.3. ORIGINES	34
1.2.3.1. EN PRODUCTION	34
1.2.3.2. AU PREMIER LAVAGE	36
1.2.3.3. AUX LAVAGES SUCCESSIFS	37

1.2.3.4.	AU SÉCHAGE	38
1.2.3.5.	AU PORTER	39
1.2.4.	CAUSES DE FRAGMENTATION	40
1.2.4.1.	TRIBOLOGIE	40
1.2.4.2.	PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	42
1.2.4.3.	ABRASION	43
1.2.4.4.	PARAMÈTRES DU LAVAGE	46
1.2.4.5.	VIEILLISSEMENT	50
1.2.4.6.	USURE	51
1.2.5.	INFLUENCE DES STRUCTURES TEXTILES	52
1.2.5.1.	POLYMÈRES	53
1.2.5.2.	FIBRES	54
1.2.5.3.	FILS	54
1.2.5.4.	ÉTOFFES	55
1.2.5.5.	ENNOBLISSEMENT	55
1.2.5.6.	CONFECTION	56
1.2.5.7.	SYNTHÈSE	57
1.2.5.8.	VUE D'ENSEMBLE	58
1.3.	LIMITER LA FRAGMENTATION	59
1.3.1.	RÉGLEMENTATION	59
1.3.2.	CAPTATION	60
1.3.3.	BIODÉGRADABILITÉ	62
1.3.4.	CONCEPTION	62

2. CHAPITRE 2 - MÉTHODES **64**

2.1.	ÉTUDE DES PROCÉDÉS TEXTILES	65
2.1.1.	FILAGE DES MULTIFILAMENTS	65
2.1.1.1.	FILAGE VOIE FONDUE	65
2.1.1.2.	TEXTURATION	66
2.1.2.	FILATURE DES FILÉS DE FIBRES	67
2.1.2.1.	OUVERTURE DES FIBRES	68
2.1.2.2.	CARDAGE	68
2.1.2.3.	DOUBLAGE ET ÉTIRAGE	69
2.1.2.4.	FILATURE NON-CONVENTIONNELLE	70
2.1.2.5.	FILATURE CONVENTIONNELLE	72
2.1.3.	TRICOTAGE CIRCULAIRE ET INDÉMAILLABLE	74
2.1.4.	TISSAGE	78
2.1.5.	ENNOBLISSEMENT	80
2.1.6.	TRAITEMENT DE SURFACE	81
2.1.6.1.	FINITIONS MÉCANIQUES	81

2.1.6.2. FINITIONS CHIMIQUES	83
2.2. MISE EN PLACE DE PLANS D'EXPÉRIENCES TAGUCHI	85
2.2.1. INTRODUCTION AUX PLANS D'EXPÉRIENCES TAGUCHI	86
2.2.2. PRINCIPE DE TAGUCHI	86
2.2.3. ÉTAPES CLÉS DE LA MÉTHODE TAGUCHI	87
2.2.4. SYNTHÈSE	91
2.3. PROTOCOLE DE DÉVELOPPEMENT DES ÉCHANTILLONS TEXTILES	92
2.3.1. FILAGE ET TEXTURATION	92
2.3.2. FILATURE	93
2.3.3. TRICOTAGE ET TISSAGE	94
2.3.4. TRAITEMENTS DE FINITIONS	95
2.4. SIMULATION DU PREMIER LAVAGE	96
2.5. CARACTÉRISATIONS TEXTILES COMPLÉMENTAIRES	98
2.5.1. À L'ÉCHELLE DES FILS	98
2.5.1.1. TRACTION	98
2.5.1.2. ABRASION FIL-FIL	99
2.5.1.3. TENSION	99
2.5.2. À L'ÉCHELLE DES ÉTOFFES	100
2.5.2.1. ABRASION	100
2.5.2.2. ÉCLATEMENT	101
2.5.2.3. DRAPÉ	102
2.5.3. À L'ÉCHELLE DES FILTRES	103
2.5.3.1. MICROSCOPE OPTIQUE	103
2.5.3.2. MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE	103
2.5.3.3. INFRAROUGE	103
2.6. TRAITEMENT DES DONNÉES	104
2.6.1. ESTIMATION DU RELARGAGE	104
2.6.2. CORRÉLATION DE PEARSON	104
 <u>3. CHAPITRE 3 - INFLUENCE DU PROCÉDÉ DE FILAGE</u>	 <u>106</u>
 3.1. DÉVELOPPEMENT DES ÉCHANTILLONS	 106
3.1.1. FILAGE ET TEXTURATION DES MULTIFILAMENTS	106
3.1.2. TRICOTAGE ET ENNOBLISSEMENT	108
3.1.3. CARACTÉRISTIQUES DES TRICOTS	110
3.2. RELARGAGE DES TRICOTS ENNOBLIS	111
3.2.1. QUANTIFICATION DES FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES	111
3.2.2. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILAGE SUR LE RELARGAGE	112
3.3. RELARGAGE DES TRICOTS NON-ENNOBLIS	116
3.3.1. QUANTIFICATION DES FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES	116
3.3.2. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILAGE SUR LE RELARGAGE	117

3.4. INFLUENCE DE LA CHAÎNE DE TRANSFORMATION TEXTILE	119
3.4.1. PHASE D'ÉLIMINATION DES FRAGMENTS DE FIBRES	119
3.4.2. PHASE DE GÉNÉRATION DES FRAGMENTS DE FIBRES	120
3.4.3. PREMIÈRES CONCLUSIONS	122
3.5. ÉTUDES DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ÉCHANTILLONS	124
3.5.1. RÉSISTANCE EN TRACTION DES MULTIFILAMENTS	124
3.5.2. RÉSISTANCE À L'ÉCLATEMENT DES TRICOTS	126
3.5.3. RÉSISTANCE À L'ABRASION DES TRICOTS	128
3.5.4. ÉNERGIES DE RUPTURE	129
3.5.4.1. ENERGIES ET ABRASION	131
3.5.4.2. ENERGIES ET RELARGAGE	132
3.5.5. CONCLUSIONS INTERMÉDIAIRES	134
 4. CHAPITRE 4 - INFLUENCE DES AUTRES PROCÉDÉS TEXTILES	 135
 4.1. PROCÉDÉ DE FILATURE	 135
4.1.1. DÉVELOPPEMENT DES FILÉS DE FIBRES	136
4.1.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE	138
4.1.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILATURE	139
4.1.2.2. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES	141
4.1.3. SYNTHÈSE - INFLUENCE DE LA FILATURE SUR LE RELARGAGE	144
4.2. PROCÉDÉ DE TRICOTAGE	145
4.2.1. DÉVELOPPEMENT DES TRICOTS	145
4.2.1.1. TRICOTS CIRCULAIRES	146
4.2.1.2. TRICOTS INDÉMAILLABLES	146
4.2.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE	148
4.2.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DU TRICOTAGE CIRCULAIRE	148
4.2.2.2. INFLUENCE DES FACTEURS DU TRICOTAGE INDÉMAILLABLE	150
4.2.2.3. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES	153
4.2.3. SYNTHÈSE - L'INFLUENCE DU TRICOTAGE SUR LE RELARGAGE	156
4.3. PROCÉDÉ DE TISSAGE	157
4.3.1. DÉVELOPPEMENT DES TISSUS	157
4.3.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE	158
4.3.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DE TISSAGE	161
4.3.2.2. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES	163
4.3.3. SYNTHÈSE - INFLUENCE DU TISSAGE SUR LE RELARGAGE	167
4.4. PROCÉDÉS DE TRAITEMENTS DE SURFACE	169
4.4.1. DÉVELOPPEMENT DES ÉTOFFES TRAITÉES EN SURFACE	169
4.4.1.1. FINITIONS MÉCANIQUES	170
4.4.1.2. FINITIONS CHIMIQUES	170
4.4.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE	171

4.4.2.1.	INFLUENCE DES FINITIONS MÉCANIQUES SUR TRICOT	171
4.4.2.2.	INFLUENCE DES FINITIONS CHIMIQUES SUR TRICOT	174
4.4.3.	SYNTHÈSE - INFLUENCE DES FINITIONS SUR LE RELARGAGE	175
4.5.	INFLUENCE DE CHAQUE PROCÉDÉS TEXTILES SUR LE RELARGAGE	177
5.	CHAPITRE 5 - VALIDATION INDUSTRIELLE	179
5.1.	GUIDE D'ÉCOCONCEPTION	179
5.1.1.	A L'ÉCHELLE DES PROCÉDÉS	179
5.1.2.	A L'ÉCHELLE DU FIL	181
5.1.3.	A L'ÉCHELLE DES ÉTOFFES	182
5.1.4.	A L'ÉCHELLE DES FINITIONS	183
5.1.5.	A L'ÉCHELLE DU TEXTILE	184
5.1.6.	COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE	185
5.2.	ESTIMATION DU RELARGAGE	190
5.2.1.	MÉTHODE DE PRÉDICTION	190
5.2.1.1.	COMBINER LES PROCÉDÉS TEXTILES	190
5.2.1.2.	MODÉLISER LE RELARGAGE	191
5.2.1.3.	CONFIRMER LE MODÈLE	193
5.2.1.4.	DÉVELOPPER UN OUTIL PRÉDICTIF	195
5.2.2.	PERSPECTIVES D'OPTIMISATION	196
	CONCLUSIONS	197
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	202
	ANNEXE	211

INDEX DES FIGURES

Figure 1 - Décomposition chiffrée de la pollution plastique en déchets macroplastiques et microplastiques.	26
Figure 2 - Transferts de microplastiques vers l'environnement.	27
Figure 3 - La triple crise planétaire causée par les microplastiques textiles.	28
Figure 4 - Effets potentiels des microplastiques sur le corps humain.	29
Figure 5 - Schématisation de la formation des fragments de fibres microplastiques par cassure nette ou fibrillation.	31
Figure 6 - Images MEB de différentes tailles de fragments de fibres microplastiques.	32
Figure 7 - Répartition de la part de FFMP émis aux différentes étapes de fabrication des tricot.	35
Figure 8 - Répartition des FFMP émis lors de dix cycles de lavage successifs.	37
Figure 9 - Quantité de FFMP générée à chaque lavage après 5 lavages.	38
Figure 10 - Comparaison de la quantité de FFMP générés au lavage et au séchage de tissus en filaments ou filés de fibres polyester.	39
Figure 11 - Estimation du relargage de FF en MT tout au long du cycle de vie textile.	39
Figure 12 - Simulation du porter d'une étoffe par des mouvements verticaux et horizontaux, puis collection des FF avec une barre en rotation.	40
Figure 13 - Influence du frottement en fonction des régimes de lubrification.	41
Figure 14 - Comparaison de la capacité des familles de tissus à se mettre en forme en fonction de leur module de cisaillement.	43
Figure 15 - Comparaison MEB d'étoffes non-abrasées et abrasées après 5000 cycles au Martindale.	45
Figure 16 - Comparaison du nombre, de la taille, et du diamètre des FFMP issus d'une étoffe en polyester avant et après abrasion.	45
Figure 17 - Paramètres potentiels influençant le relargage de fragments de fibres.	46
Figure 18 - Comparaison des FFMP collectés (mg) par des machines à laver à ouverture frontale ou par le haut.	47
Figure 19 - Comparaison des émissions de fragments de fibres au lavage par des étoffes de différentes matières en fonction du détergent et de la température.	47
Figure 20 - Paramètres influençant le relargage de FFMP au lavage d'étoffes en polyester.	48
Figure 21 - Influence de la charge de linge (kg) sur la génération de FFMP (ppm).	49
Figure 22 - Illustration de l'usure à la surface du textile.	51
Figure 23 - Paramètres influençant le relargage de FFMP à différentes échelles de la structure textile.	52
Figure 24 - Illustration des technologies a) balle Coraball et b) sac Guppyfriend utilisées lors du lavage pour capturer les FFMP.	61
Figure 25 - Étude isolée des procédés textiles de la chaîne de transformation selon quatre plans d'expériences Taguchi.	64
Figure 26 - Transformation des granulés de polymères et des additifs en multifilaments pré-orientés par fusion progressive, pression, et étirage.	66
Figure 27 - Procédé de texturation des multifilaments pré-orientés POY en multifilaments texturés étirés DTY, par fausse torsion (fixée) et entremêlement.	67
Figure 28 - Images des a) balles de fibres avant d'entrer dans le procédé de filature b) avec l'étape de ventilation et de mélange.	68
Figure 29 - Schéma du procédé de cardage.	69
Figure 30 - Exemple d'un passage en doublage-étirage avec cinq rubans.	69
Figure 31 - Procédé de filature open-end.	70

Figure 32 - Procédé de filature airjet.	71
Figure 33 - Procédé de filature ring à anneaux.	72
Figure 34 - Schéma de la torsion en sortie du système d'étirage de filature ring conventionnelle et ses options.	73
Figure 35 - Images MEB des fils obtenus par différents procédés de filature.	74
Figure 36 - Schémas de mailles obtenus en a) tricotage circulaire et b) tricotage indémaillable.	75
Figure 37 - Métiers à tricoter a) circulaire (MAYER&Cie) et b) indémaillable (KARL MAYER).	75
Figure 38 - Schémas des armures fondamentales de tissage.	78
Figure 39 - Étapes de préparation des fils de chaîne au tissage avec a) l'ourdissage et b) l'encollage.	79
Figure 40 - Construction de l'armure de tissage sur le métier à tisser.	79
Figure 41 - Machines de teinture jet a) baby jet et b) jet overflow.	80
Figure 42 - Chambres de chauffe d'un stenter.	81
Figure 43 - Procédés a) d'émerisage en brosse carbone et b) de grattage en rouleaux d'aiguilles métalliques.	82
Figure 44 - Procédé de foulardage pour appliquer les traitements chimiques.	83
Figure 45 - Méthodologie en 5 étapes pour chaque procédé textile étudié.	85
Figure 46 - Protocole simplifié du plan d'expériences centré sur la fabrication des multifilaments.	93
Figure 47 - Protocole simplifié du plan d'expériences centré sur la fabrication des filés de fibres.	93
Figure 48 - Protocole simplifié des plans d'expériences centré sur la fabrication des étoffes tricotées et tissées.	94
Figure 49 - Protocole simplifié des plans d'expériences centré sur les traitements de surface.	95
Figure 50 - Étapes de la simulation de lavage standardisé selon la méthode TMC pour quantifier le relargage de FFMP.	97
Figure 51 - Banc de traction pour fil (ZWICK ROELL) avec courbe de traction.	98
Figure 52 - Schéma de fonctionnement du Staff Tester G556 (ZWEIGLE) pour mesurer l'abrasion fil/fil.	99
Figure 53 - Montage expérimental de mesure de tension des filés de fibres (USTER).	100
Figure 54 - Schéma d'abrasion de surface des étoffes au Martindale (JAMES HEAL).	101
Figure 55 - Schéma de principe du test d'éclatement sur tricot (CHIUVENTION).	101
Figure 56 - Schéma de principe de la mesure du drapé sur étoffe.	102
Figure 57 - Vue d'un multifilament en section identique avec un DPF A) plus élevé avec des filaments épais et B) plus faible avec des filaments plus fins.	107
Figure 58 - Procédé d'entremêlement des filaments en texturation.	107
Figure 59 - Processus de fabrication des multifilaments jusqu'aux tricots ennoblis en passant par les tricots non-ennoblis et les traitements en voie humide.	109
Figure 60 - Relargage de FFMP en mg/kg des 16 tricots ennoblis.	111
Figure 61 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filage à l'échelle des tricots ennoblis.	114
Figure 62 - Relargage de FFMP en mg/kg des seize tricots non-ennoblis.	116
Figure 63 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filage à l'échelle des tricots non-ennoblis.	118
Figure 64 - Corrélation entre la résistance des multifilaments en traction et le relargage de FFMP.	125
Figure 65 - Comparaison de la résistance à l'éclatement (en kPa) entre les références de tricots ennoblis et de tricots non-ennoblis.	126
Figure 66 - Corrélation entre la résistance à l'éclatement (kPa) et le relargage de FFMP (mg/kg) pour les tricots ennoblis et les tricots non-ennoblis.	127

Figure 67 - Relation entre la résistance à l'abrasion (en nombre de cycles avant la formation d'un trou) et le relargage (en mg/kg) des tricots ennoblis.	128
Figure 68 - Relations entre la résistance à l'abrasion des tricots et leurs énergies de rupture en fonction des multifilaments a)b) blancs ou c)d) teints en masse.	131
Figure 69 - Relations entre le relargage des tricots ennoblis et non-ennoblis avec leurs énergies de rupture en fonction des multifilaments a)b) blancs ou c)d) teints en masse.	132
Figure 70 - Paramètres variables étudiés dans le plan d'expériences de filature.	136
Figure 71 - Description des étapes de fabrication des filés de fibres en tricots ennoblis.	137
Figure 72 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filature.	139
Figure 73 - Exemples de deux filtres issus de tricots en filés de fibres après le lavage standardisé TMC.	141
Figure 74 - Abrasion fil-fil des seize filés de fibres du plan d'expériences corrélée au relargage de FFMP.	142
Figure 75 - Corrélation entre la tension des filés de fibres et le relargage de FFMP.	143
Figure 76 - Corrélation entre l'abrasion en surface des tricots et leur relargage.	144
Figure 77 - Paramètres fixes et variables étudiés dans les plans d'expériences des procédés de tricotage circulaire et indémaillable.	145
Figure 78 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tricotage circulaire.	149
Figure 79 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tricotage indémaillable.	151
Figure 80 - Corrélation entre le relargage des tricots et leur masse surfacique.	153
Figure 81 - Corrélation entre le relargage des tricots et leur laize.	154
Figure 82 - Corrélation entre le relargage des tricots et l'élongation en traction dans les sens a) trame et b) chaîne.	155
Figure 83 - Facteurs fixes et variables étudiés dans le plan d'expérience du procédé de tissage.	158
Figure 84 - Comparaison des relargages des neufs essais par fils de trame.	159
Figure 85 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tissage.	161
Figure 86 - Corrélation entre le relargage des tissus et la masse surfacique.	163
Figure 87 - Corrélation entre le relargage des tissus et le facteur de couverture.	164
Figure 88 - Coefficients de drapé exprimés en fonction du fil de trame de 75 denier et 72 filaments ou 144 filaments qui compose les tissus.	165
Figure 89 - Comparaison du coefficient de drapé et du facteur de couverture au relargage des neufs tissus.	166
Figure 90 - Corrélation entre le relargage des tissus et le coefficient de drapé.	167
Figure 91 - Facteurs fixes et variables étudiés dans le plan d'expérience sur les finitions mécaniques et chimiques a) sur tricots et b) sur tissus.	170
Figure 92 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences des finitions mécaniques sur tricot.	172
Figure 93 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences des finitions mécaniques et chimiques comparées au tricot teint.	176
Figure 94 - Ensemble des procédés textiles étudiés et leurs relargages moyens associés.	177
Figure 95 - Comparaison du relargage moyen des textiles en multifilaments comparés aux filés de fibres.	182
Figure 96 - Comparaison du relargage moyen des tricots et des tissus.	183
Figure 97 - Comparaison du relargage moyen des traitements de surface sur tricots.	184
Figure 98 - Base de données du relargage de tous les plans d'expériences.	184

Figure 99 - Relargage estimé du modèle de prédiction comparé au relargage pratique sur l'entièreté de la base de données. 193

Figure 100 - Relargage estimé du modèle de prédiction comparé au relargage pratique de la base de données jusqu'à 1000 mg/kg. 194

INDEX DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 - Paramètres à considérer pour réduire le relargage de fragments de fibres au lavage.</i>	49
<i>Tableau 2 - Schémas des différentes contextures de mailles standards utilisées en tricotage circulaire.</i>	77
<i>Tableau 3 - Schémas des différentes contextures de mailles standards utilisées en tricotage indémaillable.</i>	77
<i>Tableau 4 - Exemple d'une table de Taguchi L8 2⁷.</i>	89
<i>Tableau 5 - Avantages et inconvénients de la méthode Taguchi.</i>	91
<i>Tableau 6 - Matrice Taguchi composé de 16 essais de multifilaments variés.</i>	108
<i>Tableau 7 - Propriétés des tricots non-ennoblis et noir ennoblis.</i>	110
<i>Tableau 8 - Tableau récapitulatif des relargages pour le procédé de filature</i>	138
<i>Tableau 9 - Schémas de maille simple fonture étudiés.</i>	146
<i>Tableau 10 - Schémas de maille verticaux réalisés sur deux barres guides.</i>	147
<i>Tableau 11 - Table L9 Taguchi complétée avec les facteurs de tricotage circulaire et leurs résultats de relargage de FFMP.</i>	148
<i>Tableau 12 - Table L8 Taguchi complétée avec les facteurs de tricotage indémaillable et leurs résultats de relargage de FFMP.</i>	151
<i>Tableau 13 - Motifs élémentaires des armures de tissage étudiées dans le plan d'expériences.</i>	158
<i>Tableau 14 - Table L9 Taguchi doublée et complétée avec les facteurs de tissage et leurs résultats de relargage de FFMP.</i>	159
<i>Tableau 15 - Table L9 Taguchi avec les facteurs de tissage et leurs résultats de relargage de FFMP moyennés.</i>	160
<i>Tableau 16 - Vue en coupe des armures de tissage associée au nombre de changements de face des fils de chaîne.</i>	162
<i>Tableau 17 - Table L16 Taguchi complétée avec les facteurs de finitions mécaniques et leurs relargages de FFMP associés.</i>	171
<i>Tableau 18 - Table des facteurs de finitions chimiques sur tricots et leurs relargages de FFMP associés.</i>	174
<i>Tableau 19 - Table des facteurs de finitions chimiques sur tricots déjà traités mécaniquement et leurs relargages de FFMP associés.</i>	175
<i>Tableau 20 - Table du relargage de FFMP des tricots non-ennobli et teint avant finitions.</i>	175
<i>Tableau 21 - Classement des structures textiles étudiés dans les plans d'expériences par ordre de grandeur du relargage de FFMP.</i>	177
<i>Tableau 22 - Synthèse visuelle des filtres issus des méthodes de test TMC des simulations de lavage reprenant les facteurs significatifs.</i>	181
<i>Tableau 23 - Comparaison des paramètres des propriétés et des structures textiles pour minimiser le relargage de FFMP au premier lavage.</i>	186
<i>Tableau 24 - Rapports moyens pour chaque méthode en fonction de la combinaison de procédés étudiée.</i>	192

INDEX DES EQUATIONS

<i>Equation 1 – Formule du calcul de l'énergie de rupture à l'éclatement d'un tricot.</i>	129
<i>Equation 2 – Calcul du relargage selon la méthode 1.</i>	191
<i>Equation 3 – Calcul du relargage selon la méthode 2.</i>	191
<i>Equation 4 – Calcul du relargage selon la méthode 3.</i>	191
<i>Equation 5 – Calcul du relargage selon la méthode 4.</i>	191
<i>Equation 6 – Calcul du rapport entre relargage estimé et relargage pratique.</i>	192
<i>Equation 7 – Calcul du relargage estimé selon la méthode globale.</i>	192
<i>Equation 8 – Calcul du relargage estimé d'un tricot avec une finition.</i>	193

GLOSSAIRE

- **FIBRE** = Matière première susceptible d'être filée, puis tissée ou tricotée, ou transformée en non-tissé, pour composer un textile.
- **MULTIFILAMENT** = Un multifilament est un fil obtenu par l'assemblage et la texturation de plusieurs filaments entre eux (fibres continues) .
- **FILÉ DE FIBRES** = Un filé de fibres est un fil obtenu par la torsion d'un grand nombre de fibres courtes (dites discontinues).
- **ÉTOFFES** = Le terme étoffe est un terme générique désignant toute surface textile plane (matière souple) obtenue par l'assemblage de fils, tels que les tissus ou les tricots.
- **TISSU** = Un tissu est une étoffe obtenue par l'entrecroisement perpendiculaire de deux ensembles de fils : la chaîne et la trame.
- **TRICOT CIRCULAIRE** = Le tricot circulaire (ou tricot en maille cueillie) est une étoffe produite sur une machine à tricoter circulaire, par entrelacement des fils dans les aiguilles, sous forme de tube sans couture.
- **TRICOT INDÉMAILLABLE** = Le tricot indémaillable (aussi appelé maille jetée) est une étoffe obtenue par l'entrelacement de fils dans le sens de la longueur, chaque fil faisant sa propre boucle dans le sens de la chaîne.
- **FINITIONS MÉCANIQUES** = Opérations physiques et/ou thermiques appliquées à la surface d'une étoffe après sa fabrication pour modifier son aspect, son toucher ou ses propriétés physiques.
- **FINITIONS CHIMIQUES** = Opérations impliquant l'utilisation de produits chimiques appliqués à une étoffe pour lui conférer des propriétés fonctionnelles (imperméabilité, déperlance, infroissabilité, etc).
- **MICROPLASTIQUES** = Microparticules de plastique (polymères synthétiques) mesurant moins de 5 millimètres.
- **MICROFIBRE** = Désigne une fibre synthétique extrêmement fine, d'une finesse inférieure à 1 denier (soit moins d'un gramme pour 10 000 mètres de fil).

- **FRAGMENTS DE FIBRES** = Définis des microparticules de fibres qui se détachent d'un textile, qu'elles soient naturelles (coton, laine) ou synthétiques (plastique). L'usage de ce terme est privilégié pour parler de la micropollution environnementale des textiles plutôt que le terme "microfibre" afin d'éviter toute confusion avec les fibres très fines industrielles.
- **FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES** = Désigne spécifiquement les fragments de fibres synthétiques (polyester, polyamide, etc) d'une taille inférieure à 5 mm (microplastiques).
- **RELARGAGE** = Capacité d'un textile à extraire des fragments de fibres de sa structure textile initiale dans l'environnement, au moment de la production, de l'usage, ou de la fin de vie du textile en question.

LISTE DES ABREVIATIONS

- **MT** = Million de Tonnes métriques
- **MP** = MicroPlastiques
- **FF** = Fragments de Fibres
- **FFMP** = Fragments de Fibres MicroPlastiques
- **CB** = Carbon Black = Noir de carbone
- **POY** = Pre-Oriented Yarn = Multifilaments pré-orientés
- **DTY** = Drawn Textured Yarn = Multifilaments texturé étiré
- **LFA** = Longueur de Fil Absorbé
- **MEB** = Microscope à Balayage Électronique
- **CV%** = Coefficient de Variation

INTRODUCTION

Au XXème siècle, une avancée notable pour la civilisation humaine réside dans l'émergence du plastique. Cette nouvelle matière a contribué à améliorer l'espérance de vie de l'espèce humaine. En effet, les plastiques ont permis de nombreux progrès sanitaires, entre autres la conservation des aliments, et une pratique renforcée des soins médicaux. Le succès de cette matière réside dans ses propriétés. Le plastique allie résistance et légèreté. Ainsi il peut assurer la protection de toute sorte d'objets tout en restant transportable. Le tout avec une facilité de mise en œuvre et à un coût de production raisonnable. L'ensemble de ses qualités permettent au plastique d'être utilisé dans tous les produits du quotidien tels que les emballages, les appareils numériques, l'électroménager, le mobilier, les vêtements, et bien d'autres encore. Ces applications multiples dans tous les secteurs entraînent une production accrue chaque année depuis son invention, au point qu'aujourd'hui il est devenu omniprésent. En effet, les plastiques sont partout, des villes dynamiques jusqu'aux campagnes les plus profondes, ou encore du sommet des montagnes jusqu'au milieu des océans, à tel point qu'ils sont devenus trop nombreux. Leurs propriétés leur confèrent de la durabilité, pourtant leur fonction a été détournée pour les transformer en plastiques à usage unique. En conséquence, les déchets plastiques s'accumulent, au mieux dans les centres de tri pour être revalorisés, au pire dans l'environnement dans lequel ils sont persistants. Autrement dit leur durabilité leur permet d'exister pendant plusieurs centaines d'années à l'état de polluants. Au cours du temps, les déchets plastiques se fragmentent en de plus petites particules appelées microplastiques. Ces microparticules de plastique ont une taille comprise entre un micromètre et cinq millimètres. Cela signifie que les microplastiques sont facilement transportables dans l'eau ou dans l'air et sont retrouvés jusque dans les sols et à l'intérieur des organismes vivants. Les microplastiques propagent ainsi la pollution plastique avec des conséquences sur l'environnement, la biodiversité, et le climat.

Étant donné que tous les secteurs sont concernés par l'abondance du plastique, le domaine de l'habillement ne fait pas figure d'exception. Les textiles synthétiques sont aujourd'hui majoritaires devant les matières naturelles telles que le coton et la laine, et ce depuis quelques dizaines d'années. Le polymère le plus utilisé par l'industrie textile est le polyester PET (PolyÉthylène Téréphtalate). À lui seul, il représente plus de la moitié du marché. Cela s'explique par les qualités intrinsèques de la matière décrites précédemment et son coût de fabrication très faible.

Cette hausse de la production plastique répond à la demande croissante du marché avec des volumes de vêtements toujours plus conséquents à un prix toujours plus attractif. Cette mode est dictée par l'ultra fast fashion, un système de consommation linéaire, en opposition aux aspirations circulaires, qui privilégie la quantité à la qualité. En conséquence, les textiles synthétiques sont de moins en moins durables, au point de devenir des produits jetables, et ce malgré leur propriété initiale. Cette dégradation de la qualité des textiles synthétiques entraîne des émissions de microplastiques. Ce phénomène se produit en fin de vie du textile par fragmentation en microparticules, comme pour les autres typologies de déchets plastiques, mais aussi au cours du cycle de vie du textile. Effectivement, les sollicitations de la matière en production et à l'usage génèrent des microplastiques. Étant donné qu'ils proviennent d'une matière textile, ils sont communément appelés fragments de fibres microplastiques (FFMP). Leur libération dans l'environnement est qualifiée par la notion de relargage.

Jusqu'ici les solutions pour lutter contre le relargage se concentrent pour retenir les FFMP extraits des structures textiles dans l'air ou dans l'eau. L'aspiration des FFMP présents dans l'air permet de les collecter pour les empêcher de rejoindre l'environnement. Dans l'eau, la filtration des eaux usées est cruciale pour éviter les fuites de FFMP vers l'environnement. D'autres solutions sont en réflexion comme l'ajout de filtres dans les machines à laver, ou encore la transformation des plastiques actuels en polymères biodégradables par des additifs ou des enzymes. Cependant, aucune solution n'est apportée par l'industrie textile en amont de la chaîne de valeur pour éviter de générer des FFMP. Certes il est important de capturer les FFMP émis dans l'air et dans l'eau, mais il serait aussi pertinent de trouver d'autres solutions pour minimiser la genèse des émissions de FFMP. C'est pourquoi concevoir un textile moins relarguant permettrait d'anticiper le problème. La recherche a commencé à étudier le lavage des textiles synthétiques pour comprendre le relargage. Celui-ci se mesure en très petites masses de FFMP collectées après filtration de l'eau du lavage. D'un textile à un autre, ces masses varient, indiquant que les propriétés de la structure textile influencent la quantité de FFMP relargués. Il est donc nécessaire de comprendre sur quels paramètres textiles agir pour diminuer le relargage de FFMP au lavage. Les choix de conception sont à l'origine de la structure textile produite et déterminent les procédés de fabrication utilisés (matières, fibres, fils, étoffes, finitions, confection). Ce sont donc ces paramètres qui devraient être pris en compte par une éco-conception dans l'objectif de minimiser le relargage de fragments de fibres microplastiques lors du lavage. L'entreprise DECATHLON l'a bien compris en lançant un projet de thèse sur le sujet.

Depuis sa création en 1976, DECATHLON conçoit, perfectionne et met en production des services et articles de sport et loisir distribués et vendus dans le monde entier. Les produits textiles de l'enseigne représentent aujourd'hui environ la moitié de son chiffre d'affaires. Ces textiles sportifs présentent des besoins fonctionnels auxquels seules les fibres synthétiques peuvent répondre. Elles ont la capacité de sécher rapidement, d'évacuer la transpiration, d'apporter de la chaleur, d'être stables aux lavages, notamment en alliant résistance, légèreté, et confort. En plus de toutes leurs qualités, ces textiles synthétiques sont conçus pour être durables et accessibles afin de rendre le sport accessible à tous. Fort de son expertise en conception, DECATHLON a pris conscience de l'importance de la problématique environnementale liée à la pollution plastique. Depuis 2020, l'entreprise est engagée en tant que membre signataire actif au sein de The Microfibre Consortium TMC afin de participer à la réduction de la fragmentation des fibres textiles sur l'environnement naturel d'ici à 2030. Pour y parvenir, l'entreprise alimente la base de données collaborative de TMC avec ses recherches internes, et notamment son projet de thèse pour comprendre l'influence des procédés textiles sur le relargage.

Lancé en 2022, ce projet de thèse est sous la responsabilité de l'entreprise, avec le soutien du laboratoire GEMTEX (GEnie des Matériaux TEXtiles) et des financements publics de l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie) et de l'ADEME (Agence de la transition écologique). L'ambition de ce projet commun est de maîtriser la chaîne de valeur textile pour concevoir des textiles synthétiques moins émetteurs de fragments de fibres microplastiques. Pour y parvenir, l'influence de chaque procédé de fabrication textile sur le relargage de FFMP est étudiée via plusieurs plans d'expériences sur le filage, la filature, le tricotage, le tissage, et les traitements de surface. Les verrous scientifiques à lever dans ce projet de thèse sont au nombre de deux. Le premier objectif est de comprendre les mécanismes de formation des FFMP le long de la chaîne de transformation textile. Le second est de quantifier les FFMP émis au lavage en fonction des procédés textiles. Le résultat final est une base de données permettant d'estimer le relargage des différentes structures textile de l'entreprise dès les étapes de conception.

Cette thèse est relatée en cinq chapitres. Le premier est alimenté par l'état de l'art autour de la pollution microplastique textile pour définir les fondations sur lesquelles ce projet s'appuie. La méthodologie utilisée pour étudier l'influence des différents procédés textile sur le relargage de FFMP au lavage est explicitée dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre se concentre sur le rôle capital du premier

procédé de la chaîne de valeur textile : le filage des multifilaments et son lien avec le relargage de FFMP. Le quatrième chapitre étudie l'influence des autres procédés sur le relargage dans l'ordre de la chaîne de transformation textile, c'est-à-dire d'abord avec la filature, suivi du tricotage, puis du tissage, et enfin des traitements de surface. Fort de ces résultats, le cinquième chapitre permet de formuler des recommandations industrielles pour minimiser les émissions de FFMP, et d'estimer le relargage en fonction des choix de conception via un outil prédictif. Ces travaux ont permis de lier laboratoire de recherche et réalité industrielle pour apporter une partie de la réponse à la problématique environnementale de la pollution microplastique textile.

1. CHAPITRE 1 - ETAT DE L'ART

1.1. POLLUTION MICROPLASTIQUE

1.1.1. CHIFFRES CLÉS

Le plastique accompagne indéniablement les progrès réalisés lors des dernières décennies. En effet, ce matériau a contribué à l'amélioration du niveau de vie de la société dans plusieurs domaines. Par exemple, dans l'alimentation pour conserver les aliments, dans le secteur de la santé en améliorant l'hygiène des soins pour éviter des contaminations, dans la technologie en isolant tous les composants électroniques de l'ère du numérique. Aujourd'hui, cette matière est omniprésente dans les objets du quotidien, elle sert à la fabrication des emballages, du mobilier, des jouets, ou encore des textiles. La raison : le plastique possède de nombreux avantages tels que ses propriétés de résistances, sa facilité de mise en œuvre, et son faible coût. Bien que les matières plastiques soient considérées comme durables dans le sens où elles ont la capacité de traverser les années, et malgré le confort et les gains économiques apportés aux populations, le plastique pose des problèmes environnementaux majeurs. Il est issu de ressources fossiles non-renouvelables et bien souvent les produits plastiques sont à usage unique et deviennent des déchets persistants dans l'environnement. Chaque année, 415 millions de tonnes MT de plastiques sont produites par l'industrie, dont 3%, soit environ 12 MT/an, se retrouvent relargués dans les océans [1]. De cette quantité, 10,5 MT/an proviennent des déchets macroplastiques comme les emballages ou les filets de pêche [2]. Une fois dans l'environnement et sur une échelle de temps considérable, ces déchets seront amenés à se dégrader en microparticules appelées microplastiques secondaires. Tandis que les 1,5 MT/an restantes sont considérées comme des microplastiques primaires MP. Cela signifie qu'ils atteignent l'environnement avec une taille inférieure à 5mm, comme par exemple les microparticules de pneus générées par les véhicules en roulant, ou bien les fragments de fibres textiles issus du lavage des vêtements synthétiques. En fonction des années, les scénarios varient. En 2017, la principale source d'émission de MP sont les textiles synthétiques qui génèrent 522 kT/an soit 35% des MP présents dans les océans, devant l'abrasion des pneus (28%) et la pollution des villes (24%) entre autres [3]. Ces proportions de la pollution plastique sont résumées en Figure 1.

¹ Peano et al., 2020

² Jambeck et al., 2015

³ Boucher et Friot, 2017

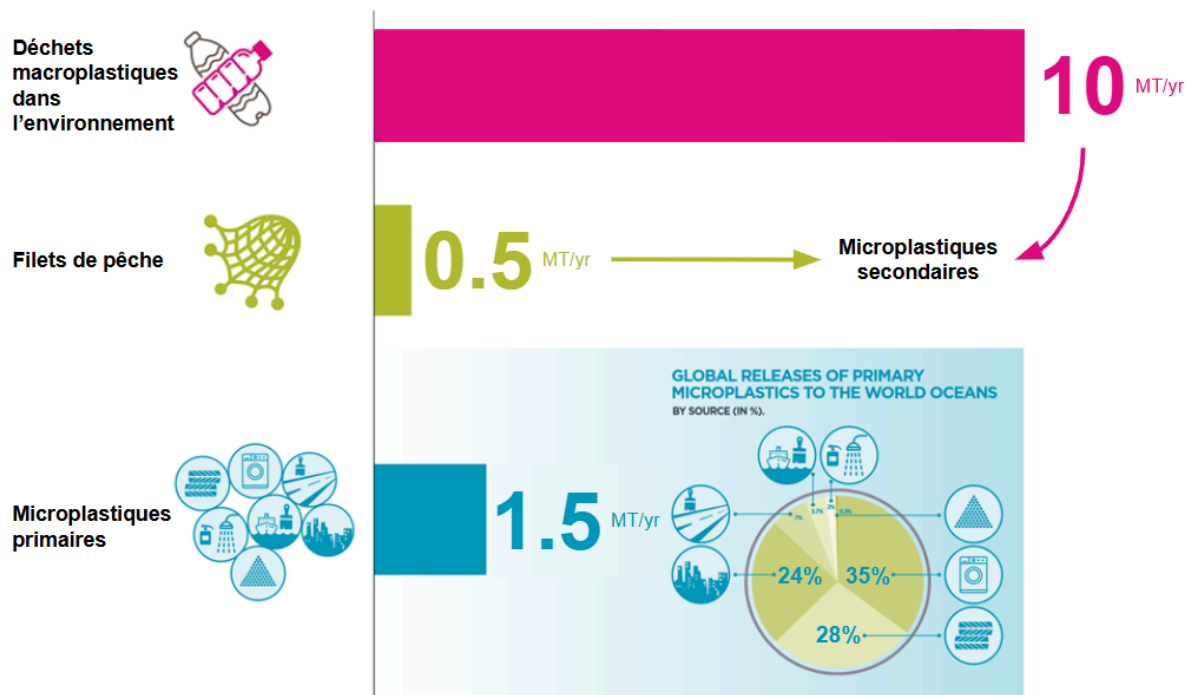


Figure 1 - Décomposition chiffrée de la pollution plastique en déchets macroplastiques et microplastiques. [3]

En comparaison, lors de la dernière estimation en date de 2024, les textiles synthétiques sont l'avant-dernière source de MP relargués dans les océans avec 88 kT/an [4]. Bien que ces estimations soient variables en fonction des méthodes et des scénarios, ces quantités de microplastiques ne sont pas négligeables. Elles s'accumulent tous les ans dans les océans et ont des conséquences avérées sur l'environnement et la santé.

1.1.2. SOURCES

La pollution macroplastique est visible par l'homme et donc plus simple à identifier que la pollution microplastique. Pourtant, les MP sont tellement répandus qu'ils sont source d'impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine. A l'heure actuelle, on en retrouve dans tous les éléments de la planète. D'abord dans l'eau, comme évoqué précédemment pour les océans, mais aussi dans les cours d'eau douce [5]. Les MP ont aussi contaminé l'air ambiant de l'atmosphère [6] ainsi que les sols [7]. Tous ces éléments sont de véritables passerelles pour les MP qui leur permettent de rejoindre l'environnement comme le résume la Figure 2 [8].

⁴ Earth Action, 2024

⁵ Fondation TARA Ocean ESPR, 2025

⁶ De Falco et al., 2020

⁷ Projet ADEME MICROSOFT, 2023

⁸ European Environment Agency, 2022

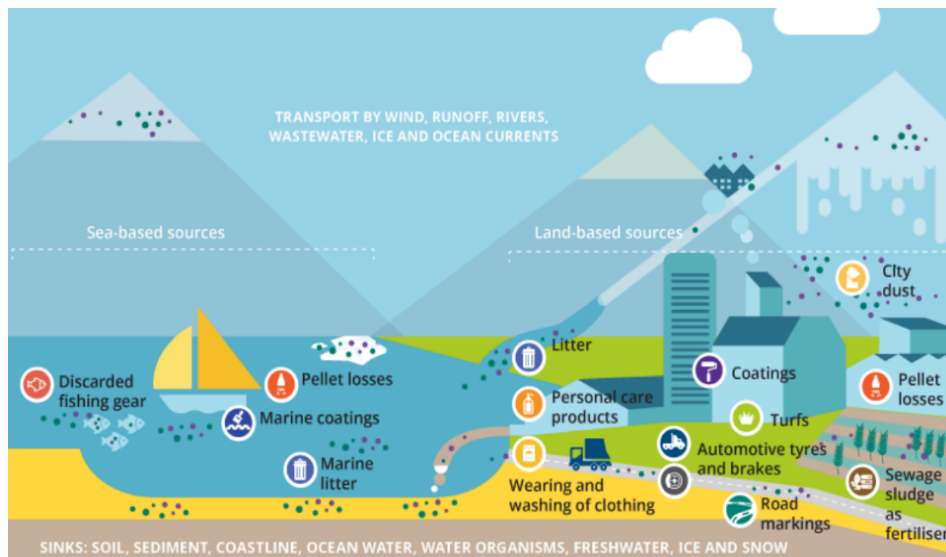


Figure 2 - Transferts de microplastiques vers l'environnement. [8]

1.1.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Une fois dans l'environnement, les plastiques ne sont pas biodégradables, ils sont composés de polymères et d'additifs considérés comme persistants. Cela signifie que leur durée de vie dans l'environnement en tant que déchets peut durer des centaines d'années. De plus, les MP adsorbent d'autres polluants tels que des métaux lourds, des produits chimiques, et des agents pathogènes, ce qui contribue à la pollution des océans [9]. Les MP ont différentes formes : ils peuvent ressembler à un polygone quelconque ou être parfaitement sphérique, on en retrouve sous forme de film quand il provient d'un emballage, ou de fibre quand il s'agit d'un textile. En fonction de la forme du MP, des êtres vivants peuvent le confondre avec de la nourriture [10]. Cela a pour conséquences de perturber la biodiversité et cause des problèmes de croissance chez les espèces animales marines dès la base de la pyramide de la chaîne alimentaire. En effet, le zooplancton confond certains MP avec sa nourriture et s'alimente donc de plastique. Étant lui-même la source de nourriture d'autres espèces animales, il va leur transférer les MP incorporés dans son organisme [11]. D'autres espèces peuvent également s'alimenter de MP directement comme par exemple les moules [12] et les poissons [13] mais aussi des espèces terrestres comme les escargots par exemple [14]. Cette mauvaise alimentation peut perturber la croissance de ces organismes, ralentir leur reproduction, ou encore troubler leurs comportements.

⁹ Liévin, 2022

¹⁰ Weis et De Falco, 2022

¹¹ Zhang et al., 2022

¹² Walkinshaw et al., 2023

¹³ Thompson et al., 2024

¹⁴ Colpaert et al., 2022

La structure The Microfibre Consortium concentre son travail sur les microplastiques d'origine textile. Il alerte sur le fait que les microplastiques sont qualifiés de triple crise planétaire, décrit en Figure 3. Les conséquences des MP dans l'environnement se concentrent sur la biodiversité comme évoqué dans le paragraphe précédent, mais contribuent également à la pollution de l'environnement par leur accumulation dans l'eau, l'air et les sols, et accompagnent également le changement climatique [15].

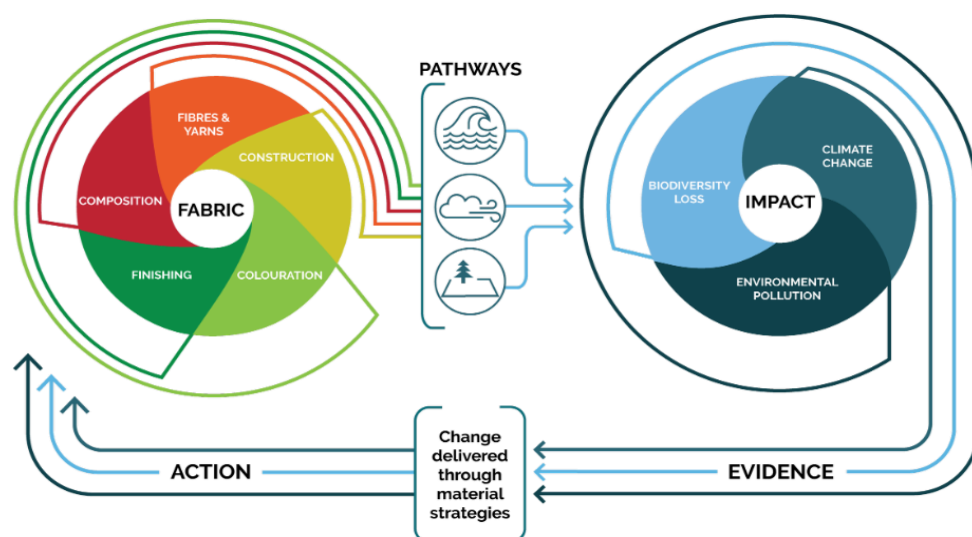


Figure 3 - La triple crise planétaire causée par les microplastiques textiles. [15]

1.1.4. CONSÉQUENCES SANITAIRES

Les risques sont également étudiés pour la santé humaine car les MP ont été détectés partout dans le corps humain. Effectivement, à la fin de la chaîne alimentaire se trouve l'espèce humaine, ainsi les MP contenus dans sa nourriture sont donc transférés par ingestion dans le corps humain. Cela fonctionne également avec la consommation d'une eau contaminée par exemple par une bouteille en plastique [16]. L'ingestion n'est pas la seule voie de contamination du corps humain par les MP. Un contact par voie cutanée avec un produit cosmétique contenant des MP, ou encore l'inhalation d'air contaminé, permettent aux MP de pénétrer dans le corps humain [17]. Une fois à l'intérieur, ils circulent à travers les tissus et les fluides du corps humain comme le placenta et le sang [18]. Leur présence risque d'entraîner plusieurs nuisances décrites en Figure 4, comme des inflammations dans le cerveau, les poumons, et les organes reproducteurs [18] et peuvent également favoriser les accidents cardio-vasculaires [19].

¹⁵ The Microfibre Consortium Progress Report, 2022-2024

¹⁶ Qian et al., 2024

¹⁷ Periyasamy et Tehrani-Bagha, 2022

¹⁸ Feng et al., 2023

¹⁹ Marfella et al., 2024

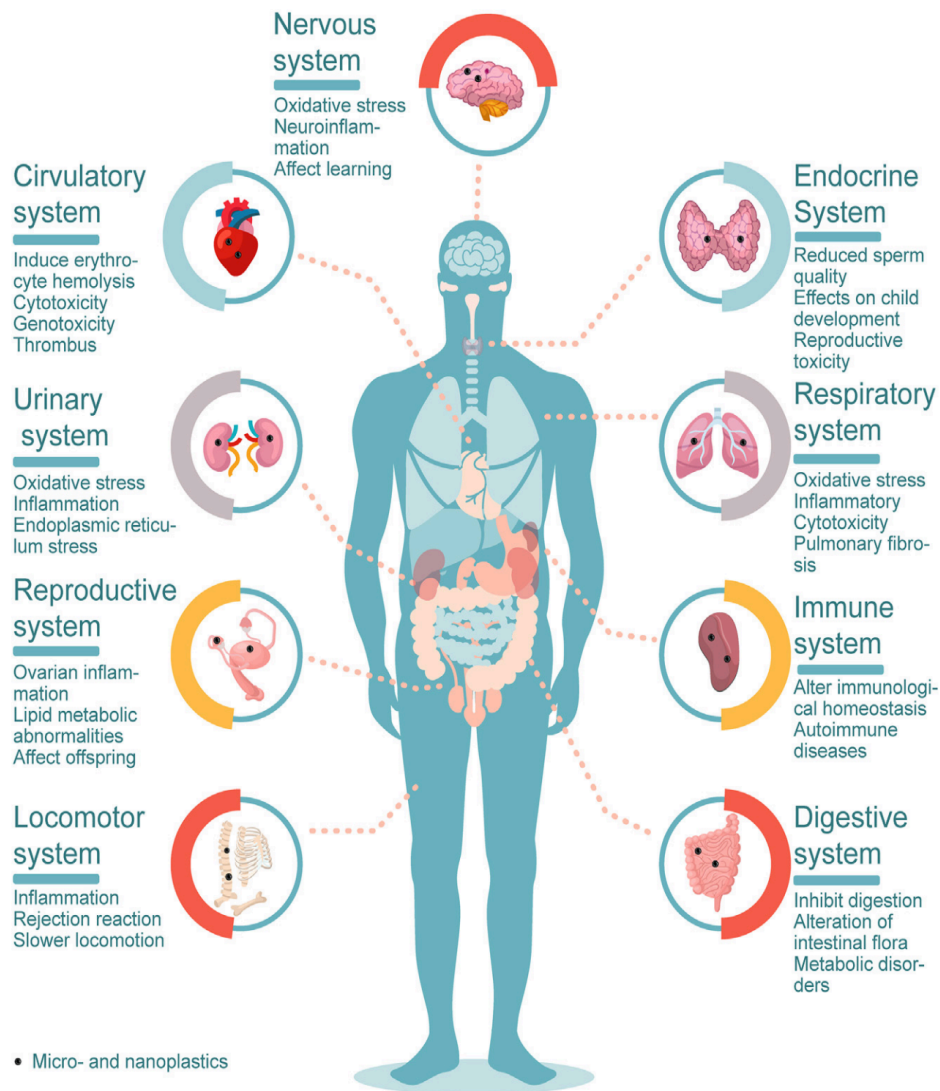


Figure 4 - Effets potentiels des microplastiques sur le corps humain. [18]

Bien que de nombreuses études sont encore en cours pour estimer les conséquences des microplastiques sur l'environnement, leur présence dans les milieux terrestres, aquatiques et aériens est indéniable. Cette pollution entraîne de sérieux problèmes environnementaux et sanitaires face auxquels l'industrie textile a des responsabilités.

1.2. FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES

1.2.1. DÉFINITION

L'industrie textile contribue également à l'essor des matières plastiques avec comme principal fer de lance : le polyéthylène téréphtalate PET de la famille des polyesters. Cette matière synthétique représente 54% de la production annuelle des fibres textiles sur le marché, largement devant le coton (22%) ou encore la laine (1%) [20]. Comme pour les plastiques de manière générale, la croissance du PET s'accompagne de problématiques environnementales comme la génération de microplastiques primaires. Ils sont issus d'une structure textile synthétique et sont appelés microplastiques textiles, microfibres ou encore fragments de fibres microplastiques FFMP. Les organismes The Microfibre Consortium et Fashion For Good préfèrent utiliser la terminologie FFMP pour éviter la confusion avec des filaments industriels d'une finesse inférieure à 1 denier appelés microfibres, fabriqués par l'industrie textile [21]. Ce sera également la préférence retenue pour ce manuscrit. L'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) définit les microparticules de polymères synthétiques (incluant les FFMP) par leur taille. Ce sont des particules dont toutes les dimensions sont inférieures à 5 mm, ou bien ayant une longueur inférieure à 15 mm avec un rapport longueur/diamètre inférieur à 3.

Comme leurs homologues microplastiques, les FFMP s'échappent dans l'eau, dans l'air, dans les sols, et causent de véritables problèmes environnementaux ainsi que des inquiétudes sur la santé animale et humaine. Des méthodes de caractérisation nécessaires ont vu le jour et continuent d'être mise en place pour comprendre comment ces FFMP atteignent l'environnement et quelles sont leurs caractéristiques.

²⁰ Opperskaslki et al., 2022

²¹ Behind the Break, 2025

1.2.2. CARACTÉRISATION

1.2.2.1. QUALITATIVE

La formation des FFMP a lieu à la surface des textiles comme l'illustre la Figure 5, adaptée de (Zambrano et al., 2019). Un fil de la structure textile va générer des fibres apparentes dans un plan perpendiculaire à la surface du textile au fur et à mesure des sollicitations de frottements en production et à l'usage. Ces fibres perpendiculaires apparentes appelées duvet vont se rompre dans une certaine temporalité. Le premier scénario est que ces fibres se cassent en un seul brin et se dissocient alors de la structure textile pour atteindre l'environnement. Le deuxième scénario est que ces fibres explosent par fibrillation en leur extrémité : d'un seul brin épais, le multifilament se transforme en une multitude de filaments plus fins avant de se détacher en FFMP plus petits appelés fibrilles [22].

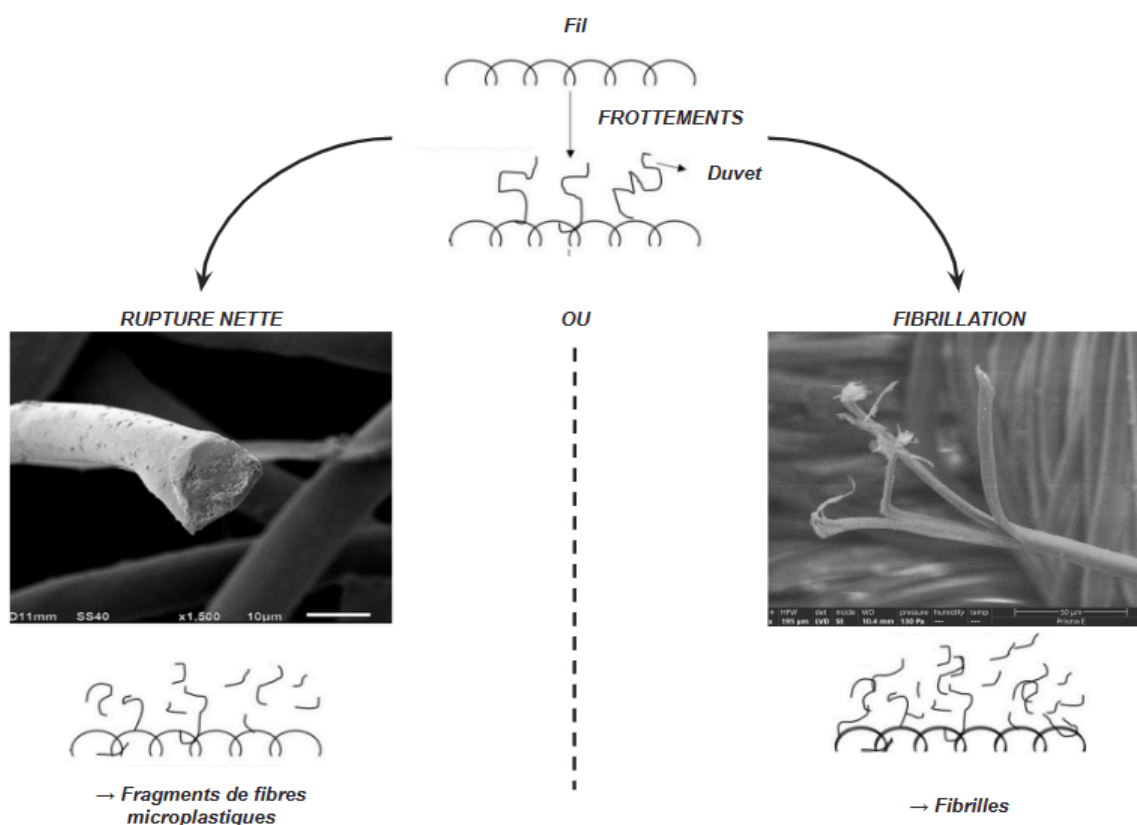


Figure 5 - Schématisation de la formation des fragments de fibres microplastiques par cassure nette ou fibrillation, adaptée de [22].

Ces deux scénarios vont émettre des FFMP de longueur et de masses différentes. Les FFMP de la fibrillation seront plus légers, courts et fins comparés aux FFMP du premier scénario où la fibre rompt en un seul brin avec une longueur et un diamètre plus conséquent. C'est d'ailleurs ce qui a été mis en évidence par (Cai et al., 2021) en Figure 6 a) [23] et confirmé par (Yang et al., 2023) en Figure 6 b) [24]. Après avoir abrasé différentes surfaces de textiles en polyester et observé les conséquences au microscope, ils observent des “fibres microplastiques” et des “fibrilles”. Les fibres microplastiques sont caractérisées par un diamètre de 12 μm et une longueur de 200 à 800 μm , faisant référence au premier scénario. Les dimensions des fibrilles obtenues par fibrillation sont plus petites avec un diamètre allant de 2 à 5 μm et une longueur comprise entre 30 et 150 μm .

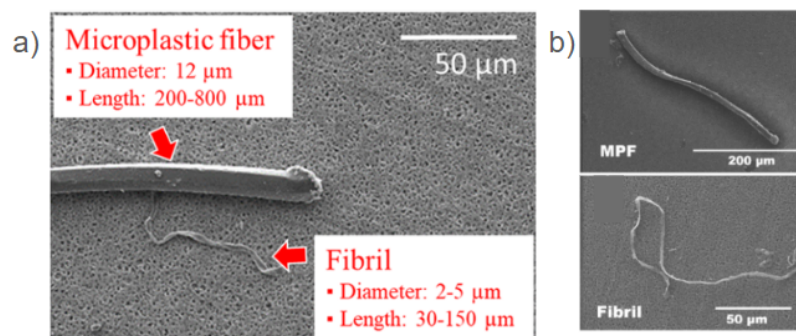


Figure 6 - Comparaison des tailles de FFMP au MEB. [23] [24]

1.2.2.2. QUANTITATIVE

La quantification des FFMP représente un défi particulier en raison de leurs faibles quantités et dimensions. En laboratoire, il est possible de simuler un cycle de lavage, puis de filtrer les eaux usées pour recueillir les FFMP sur un filtre. En pesant le filtre avant l'essai, puis en le séchant et en le pesant à nouveau après l'essai, la masse de FFMP collectée pendant le lavage peut être déterminée. Le calcul du ratio de perte de masse par rapport à la masse initiale du textile lavé est établi. Cette expérience se réalise au moyen de méthodes gravimétriques telles que la méthode d'essai TMC 1.1 (2021) [25] qui a donné naissance à la norme ISO 4484-1 (2023) [26]. Ces simulations de lavage en laboratoire sont des modifications de la norme ISO 105-C06 qui teste la solidité des coloris des textiles. Elles sont sensiblement identiques dans le principe de fonctionnement, la seule différence notable est que la méthode TMC se base sur huit éprouvettes d'un même échantillon textile alors que la norme ISO autorise d'en utiliser seulement quatre. Sa fiabilité en est impactée mais elle devient plus abordable.

²³ Cai et al., 2021

²⁴ Yang et al., 2023

²⁵ TMC Test Method 1.1 (2021)

²⁶ ISO 4484-1 (2023)

Il existe également une méthode DIN SPEC 19292 plus récente portée par la marque Under Armour, le laboratoire James Heal, et l'université Hohenstein [27]. Elle rend la quantification de FFMP plus accessible et rapide afin de fournir un ordre de grandeur de relargage aux industriels. Cette méthode est semi-quantitative, c'est-à-dire qu'à l'issue du lavage, le filtre est collecté pour passer par une évaluation visuelle. Celle-ci est réalisée au microscope et s'accompagne d'une échelle de notation avec des grilles standardisées allant de 1 "très grande quantités de fibres" observées sur le filtre, à 5 "très petite quantité de fibres". Cette méthode peut être complétée par une pesée du filtre après séchage comme dans les méthodes gravimétriques traditionnelles. Enfin l'ISO 4484 envisage d'étendre le champ des possibles avec une partie 3 et une partie 4. L'ISO 4484-3 (2023) [28] a pour objectif de quantifier le relargage de FF issus d'un produit fini dans une véritable machine à laver. L'idée serait d'avoir une approche plus réaliste de ce qu'il se passe véritablement à l'usage comparé au test actuel effectué en laboratoire dans le RotaWash sur une pièce d'étoffe. Quant à l'ISO 4484-4 [29], elle est actuellement en cours d'examen. Cette nouvelle partie de la norme prévoit de quantifier la masse de FF sur le filtre mais également la proportion de chaque matière textile présente par une méthode d'analyse thermogravimétrique ou par une dissolution sélective des matières.

Au-delà des méthodes de quantification gravimétriques, d'autres méthodes telles que les normes DIN SPEC 4872 (2023) [30] ou ISO 4484-2 (2023) [31] observent les filtres au microscope pour compter les FFMP collectés. Cela permet d'exprimer des résultats de relargage, non plus en masse, mais en nombre de FFMP par masse de textile lavé en kg. Afin de réaliser ces analyses approfondies, l'observation microscopique des FFMP collectés sur le filtre est combinée à une analyse d'image. En effet, les traitements d'image transforment le visuel des fibres sur le filtre en pixels noirs sur blancs, ce qui permet au logiciel de les dissocier de l'arrière-plan et donc de compter les FFMP [32]. Une observation microscopique peut également être couplée à la spectroscopie infrarouge. Ces méthodes de caractérisation permettent d'identifier la composition du matériau textile [33]. Cela est utile notamment pour identifier la nature du textile lavé, ou bien d'un textile composé de plusieurs matières pour savoir si l'une d'elles a généré davantage de FF que l'autre, ou encore pour révéler des impuretés provenant d'une autre matière.

²⁷ DIN SPEC 19292 (2024)

²⁸ ISO 4484-3 (2023)

²⁹ ISO 4484-4 (à paraître)

³⁰ DIN SPEC 4872 (2023)

³¹ ISO 4484-2 (2023)

³² Lim et al., 2022

³³ Yang et al., 2021

Toutes ces méthodes prouvent que le sujet est encore nouveau et qu'il y a besoin d'harmoniser les méthodes afin de faciliter les comparaisons des différentes études scientifiques. Il est important de noter que l'essentiel de la caractérisation se focalise sur l'étape de lavage des textiles, aucune méthode normée n'existe pour prélever des FFMP et les caractériser directement en production par exemple. Pourtant les origines de génération des FFMP concernent la totalité du cycle de vie des vêtements, c'est-à-dire des étapes de production, jusqu'à la fin de vie, en passant certes par l'usage notamment au lavage en machine à laver, mais également au séchage ou au porter.

1.2.3. ORIGINES

1.2.3.1. EN PRODUCTION

La production des textiles est responsable de 50% du relargage des FFMP directement dans les usines textiles [34]. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'entièreté de la chaîne de valeur textile. La fabrication d'un textile démarre par la fabrication d'un fil par alignement, torsion et cohésion entre les fibres qui le composent. Puis les fils sont liés entre eux dans une étoffe, soit par entrelacement en tricot ou par entrecroisement en tissu. Ensuite, des traitements de finitions peuvent être appliqués à la surface des textiles pour leur conférer des propriétés spécifiques de toucher ou de déperlance entre autres. Enfin les étoffes finies sont découpées en pièces selon un patronage et assemblées par coutures en un vêtement.

Différents types de procédés interviennent tout au long de la chaîne de valeur textile pour assurer toutes ces étapes de fabrication. Lors des premières étapes, les procédés sont considérés comme mécaniques. Ils appliquent des tensions sur la matière et génèrent des frottements. C'est le cas notamment lors de la fabrication des fils en filage ou en filature où les fibres sont parallélisées puis étirées pour ajouter de la cohésion au fil le long de différents organes mécaniques. Lors du tissage, les fils frottent entre eux pour passer les uns entre les autres mais également contre le peigne et les cadres de la machine à tisser. Pendant le tricotage, le fil frotte dans les délivreurs souvent en céramique avant de passer dans chaque aiguille pour intégrer la structure du tricot. Ces frottements entre les fils et les organes machines des métiers à tisser-tricoter sont soulagés par des lubrifiants utilisés lors de l'ensimage des fils en filage et filature, de l'encollage avant tissage ou du paraffinage avant tricotage.

³⁴ First Sentier MUFG, 2022

Un frottement de surface peut également avoir lieu lors de l'application d'apprêts mécaniques. Des rouleaux abrasifs grattent la surface des étoffes pour leur donner un toucher plus agréable en imitant les matières naturelles et en leur ajoutant des propriétés thermiques, comme c'est le cas pour les polaires par exemple. Enfin, la découpe des étoffes en différentes pièces textile à assembler apporte également des ruptures entre les fils de la structure. La confection des pièces entre elles pour être assemblées en vêtements est également génératrice de frottements par perforation du textile avec l'aiguille de couture. (Mermaids et Life, 2018) [35] et (Belzagui et Gutiérrez-Bouzan, 2022) [36] reprennent l'ensemble de ces différents éléments dans leurs synthèses respectives.

D'autres éléments entrent en contact avec les textiles lors de leur production. Certains procédés font intervenir de l'eau comme pendant la teinture. Le mouvement du textile dans l'eau serait libérateur de FFMP déjà rompu mais bloqués dans la structure textile [37]. De l'air est également utilisé pour le séchage des textiles après teinture. Cet élément permettrait à des FFMP générés préalablement d'être extraits des structures textiles. En considérant une chaîne de production de l'étape de tricotage du polyester jusqu'aux finitions du textile (pré-traitement, teinture, rinçage, séchage, et grattage du tricot), c'est lors du séchage en Figure 7 que la plus grande quantité de FFMP a été collectée, soit 65% de la masse totale des fragments de fibres émis sur l'entièreté des étapes, devant la teinture (15%) [37].

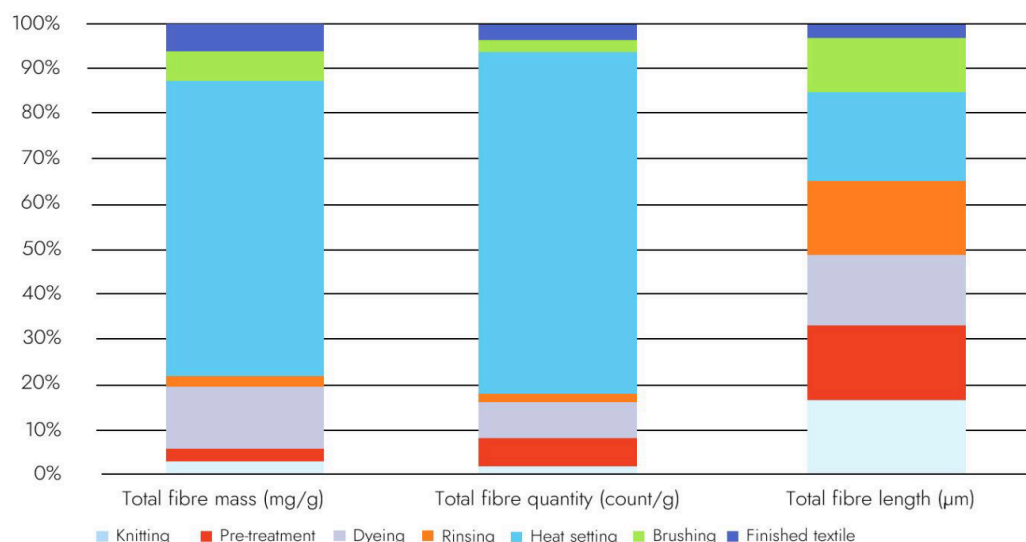


Figure 7 - Répartition des FFMP émis aux différentes étapes de fabrication des tricots. [37]

³⁵ Mermaids et Life, 2018

³⁶ Belzagui et Gutiérrez-Bouzan, 2022

³⁷ Müller et al., 2023

Un parallèle évident peut être fait à ce sujet entre ce qui se passe dans la cuve de teinture et dans le tambour de la machine à laver pendant le cycle de lavage. Une autre équivalence se distingue entre le séchage en production et le sèche-linge chez les consommateurs. Ces rapprochements sont d'autant plus cohérents que l'usage des textiles est estimé responsable de l'autre moitié du relargage de FFMP [34]. L'usage des vêtements concerne la partie du cycle de vie où le textile appartient au consommateur. Un usage correspond au porter du textile et à son entretien. Le nombre de porter varie d'un seul à plusieurs, cela dépend de la catégorie du vêtement (des sous-vêtements ou une veste) et de l'activité réalisée (quotidienne ou sportive par exemple). Une fois le vêtement considéré comme sale par le consommateur, il est alors lavé puis séché avant qu'un nouveau cycle d'usage ne redémarre et se répète autant de fois que la durée de vie du textile le permet.

1.2.3.2. AU PREMIER LAVAGE

La fragmentation des fibres lors du cycle de lavage a été largement étudiée par les scientifiques. Les premières quantifications du relargage de FFMP après un cycle de lavage se faisait en nombre. En 2016, les émissions de FFMP étaient estimées en nombre de particules avec 728 000 FFMP pour un lavage de 6 kg d'étoffes en polyester [38]. Maintenant que les méthodes standardisées existent, il est possible de comparer les pertes en masse de FFMP directement en mg/kg. Une étude interne à DECATHLON a simulé dix cycles de lavage de trois étoffes textiles en polyester: un tissu pour serviette en microfibres, un tricot gratté pour polaire, et un tricot léger pour t-shirt. Dans les trois cas, les textiles ont émis des FFMP lors des 10 cycles de lavage avec au total 1150 mg/kg pour la serviette, 950 mg/kg pour le t-shirt, et 550 mg/kg pour la polaire. Ce classement peut surprendre : la polaire étant abrasée en surface par grattage, il était possible de pronostiquer un comportement à générer davantage de FFMP de sa part. Pourtant ce n'est pas le cas, ce résultat étant contre-intuitif, cela a motivé l'entreprise à continuer ces recherches pour comprendre ce phénomène avec ces travaux de thèse. Un premier constat est que dans les trois cas, le premier lavage est le plus relarguant. Pour les trois produits confondus, la Figure 8 montre que sur 100% de FFMP émis en 10 lavages, quasiment 40% provient du premier lavage [39]. Par exemple chiffré, sur 950 mg/kg de FFMP émis en 10 lavage par le tricot du t-shirt, 400 mg/kg ont été générés lors du premier lavage, soit 42%. Cette quantité est sensiblement similaire à la masse de FFMP émise du deuxième au cinquième lavage cumulés, tandis que 20% du total de FFMP ont été générés du sixième au dixième lavage.

³⁸ Napper et Thompson, 2016

³⁹ Marie Stephan, 2019

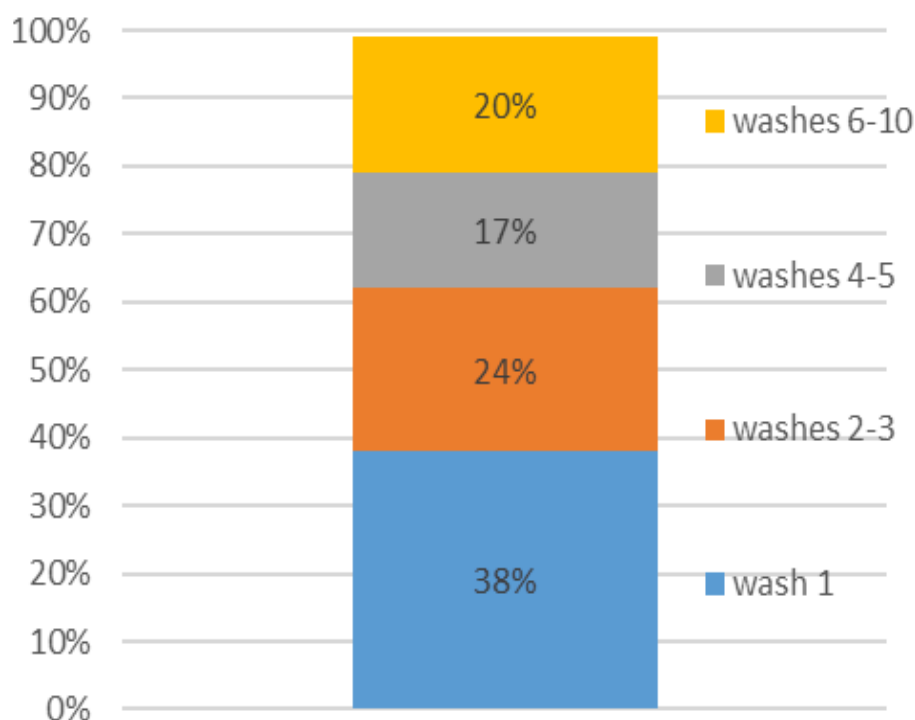


Figure 8 - Répartition des FFMP émis lors de dix cycles de lavage successifs. [39]

Cette importance du premier lavage fait écho à tous les phénomènes présentés dans le paragraphe précédent, c'est une conséquence directe des sollicitations de la matière textile en production. Le premier lavage est révélateur des dégradations engendrées sur les matières textiles lors de leur production.

1.2.3.3. AUX LAVAGES SUCCESSIFS

Toujours concernant le lavage des textiles, le relavage de 16 textiles de différentes matières (PET, coton, nylon, et mélanges avec élasthanne et viscose) et de différentes structures (filaments/filés, tissus/tricots, avec/sans finitions de surface) ont été étudiés [40]. Cette étude illustrée en Figure 9 confirme que le premier lavage de tous ces textiles est le plus élevé en émission de FFMP avec en moyenne 450 mg/kg générés. Les lavages successifs mettent en évidence qu'un plateau de relavage est atteint dès le troisième lavage. Cependant ce plateau ne tend pas vers 0 mg/kg, cela démontre que la quantité de FFMP générés lors des cycles de lavage n'est jamais nulle. Les lavages successifs émettent des quantités équivalentes à environ 100 mg/kg, soit 4,5 fois moins que le premier lavage.

⁴⁰ Hazlehurst et al., 2023

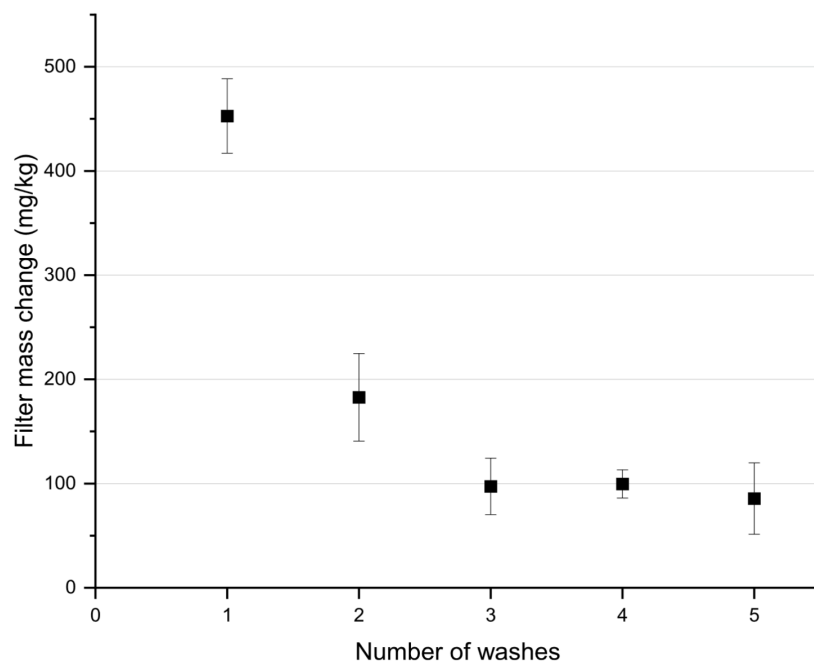


Figure 9 - Quantité de FFMP générée à chaque lavage après 5 lavages. [40]

1.2.3.4. AU SÉCHAGE

La phase de séchage domestique au sèche-linge est moins étudiée que le lavage mais demeure pourtant conséquente sur la génération de FFMP. Les consommateurs de textile s'en rendent compte après chaque utilisation, le filtre se remplit de fragments de fibres équivalant à des poussières. Ces amas collectés par la machine ne sont que la partie visible de la pollution. Contrairement au lavage où les microfibres sont principalement rejetées dans l'eau, le sèche-linge libère ces fragments de fibres directement dans l'air. Il a été révélé qu'un seul sèche-linge peut produire jusqu'à 500 000 fragments de fibres en 15 minutes, aussi bien issus du coton que du polyester [41]. Rapporté à une utilisation annuelle, un seul sèche-linge peut générer jusqu'à 120 millions de FF par an. Ces fragments atmosphériques peuvent ensuite se déposer à l'intérieur des maisons ou bien être transportées sur de longues distances toujours selon la même étude. Ces ordres de grandeur donneraient une plus grande proportion de FFMP générés par le séchage des textiles que par le lavage. Pourtant d'autres travaux ont observé un rapport de force inverse en Figure 10 sur des tissus toiles réalisés avec différents fils en polyester (un filament haute torsion, un filament sans torsion, et un filé de fibres) [42]. Dans les trois cas, le séchage a généré moins de FFMP que le lavage : environ moitié moins pour le tissu en filés de fibres, et trois fois moins pour les tissus en filaments.

⁴¹ Tao et al., 2022

⁴² Choi et al., 2021

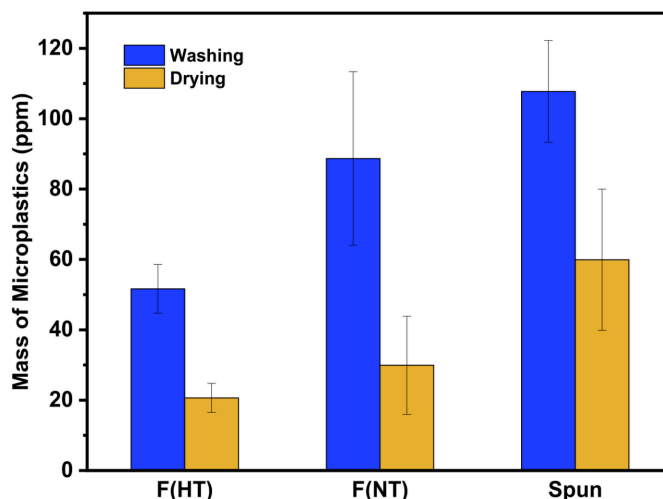


Figure 10 - Comparaison de la quantité de FFMP générés au lavage et au séchage de tissus en filaments ou filés de fibres polyester. [42]

Enfin, (Periyasamy et Tehrani-Bagha, 2022) rappellent dans leurs travaux que le séchage statique à l'air libre reste le séchage le plus fiable pour diminuer la génération de fragments de fibres [17].

1.2.3.5. AU PORTER

Le relargage de FFMP au porter des vêtements est largement moins étudié que le lavage et même que le séchage. Pourtant il est estimé responsable de 50% des FFMP émis pendant l'usage du textile à part équivalente avec le lavage dans la Figure 11 (First Sentier MUFG, 2022) [34]. Cette figure reprend également la part de responsabilités du lavage et de la production sur la quantité de FF émis évoquée dans les paragraphes précédents.

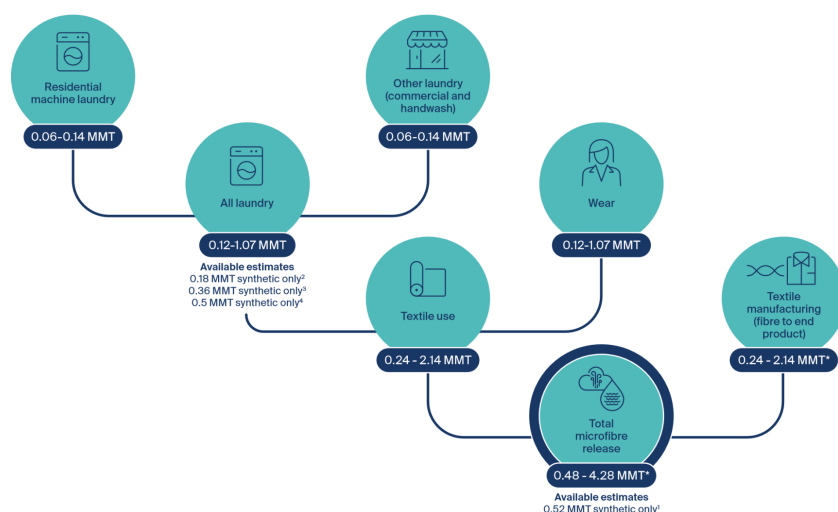


Figure 11 - Estimation du relargage de FF en MT le long du cycle de vie textile. [34]

(Lim et al., 2022) se rapprochent de ces estimations par la pratique avec un test laboratoire qui permet de simuler le mouvement du textile au porter et de collecter des FFMP sur la surface du textile décrit en Figure 12. La quantité de FFMP récupérées lors de cette étape correspond à 23% du total de FFMP émis depuis la production (49%) jusqu'au lavage (28%) [32].

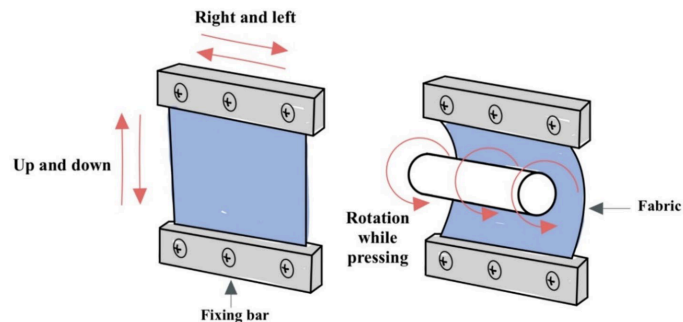


Figure 12 - Simulation du porter d'une étoffe par des mouvements verticaux et horizontaux, puis collection des FF avec une barre en rotation. [32]

1.2.4. CAUSES DE FRAGMENTATION

Tout comme les origines des FFMP sont partagées entre la production, les différents cycles de lavage notamment le premier, mais aussi le séchage et le porter, les causes de fragmentation des textiles en FFMP n'en restent pas moins variées.

1.2.4.1. TRIBOLOGIE

La tribologie se définit par l'étude des phénomènes de frottement, d'adhésion, d'usure, et de lubrification. De manière générale, le frottement correspond à la résistance du mouvement par adhérence. Sans frottement, les contacts entre deux matériaux ne seraient que glissement. Le frottement est donc essentiel pour permettre la cohésion de la matière. Pourtant il peut aussi conduire à l'usure du textile s'il n'est pas maîtrisé, et donc à la génération de FFMP. Les textiles sont soumis à de nombreux frottements tout au long de leur cycle de vie, notamment en production au cours des opérations de transformation en étoffes (tissage, tricotage). Dès la sortie de filière (filage) des lubrifiants (aussi appelés paraffines) sont appliqués lors de l'étape d'ensimage sur les filaments afin d'accroître la cohésion inter-fibres et de réduire le frottement avec les organes des machines textiles (guides fil, lisses, aiguilles). L'ensimage forme un film lubrifiant qui répartit les contraintes, limite l'échauffement et l'usure, améliore la stabilité dimensionnelle, ce qui se traduit par moins de casses en production [43] [44].

⁴³ Gupta, 2008

⁴⁴ Behary et al., 2003

La Figure 13 décrit les trois régimes de lubrification en fonction du coefficient de frottement (μ), de la charge normale appliquée sur les matériaux (W en N/m^2), de la vitesse de mouvement entre les deux matériaux (V en cm/s) et de la viscosité du lubrifiant (η) [45]. Le couple vitesse–pression conditionne le régime de lubrification et impose d’optimiser en ligne la vitesse, la tension et la géométrie de contact pour minimiser le coefficient de frottement (μ), l’échauffement et les casses [43] [46]. À faibles vitesses et fortes pressions spécifiques, le contact opère en régime limite ou mixte (film lubrifiant mince) ; à l’inverse, lorsque la vitesse augmente et/ou que la pression spécifique diminue, on migre vers un régime plus hydrodynamique où la viscosité effective gouverne l’épaisseur de film et la dissipation [43] [46]. En pratique, le comportement suit la courbe de Stribeck $\mu = f(\eta \cdot v/W)$ [45]. Sur fibres de polypropylène (PP), la mouillabilité du lubrifiant et le choix de viscosité sont déterminants : des esters légers ou polyéthers modifiés (plus mouillants que des huiles purement minérales) offrent souvent un compromis optimal à vitesse d’organe élevée et charges modérées, avec baisse de μ et stabilisation du frottement [44]. Une bonne gestion du frottement par lubrification en régime mixte est donc nécessaire pour limiter l’usure du textile.

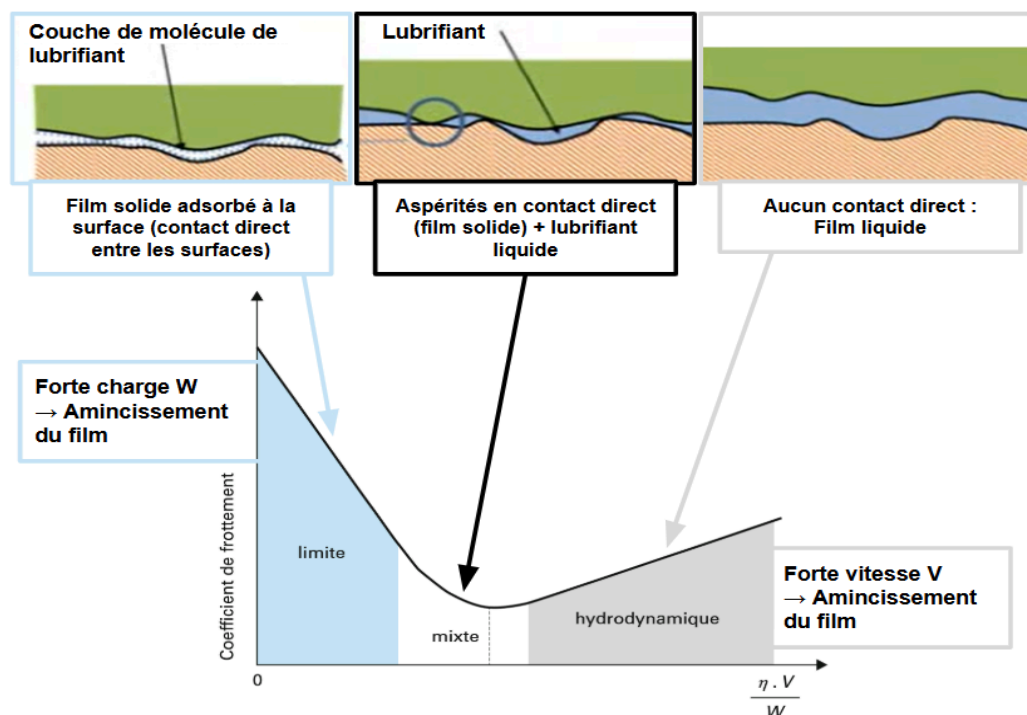


Figure 13 - Influence du frottement en fonction des régimes de lubrification, adaptée de [44] et [45].

⁴⁵ Bueno, 2015

⁴⁶ Hamrock et al., 2004

Après la transformation textile, des mouvements fil contre fil surviennent à faible vitesse (déformation des mailles, frottements internes au port, lavage, manutention). Dans ces conditions, le contact est fréquemment en régime limite/mixte : le film résiduel de lubrifiant est mince et irrégulier et le frottement peut prendre la forme d'un mouvement intermittent appelé stick-slip [44]. Ce régime accroît les pics de cisaillement, l'échauffement local et l'usure de surface, favorisant la formation de duvet en surface, entraînant la fragmentation [47]. A noter que les lubrifiants sont complètement enlevés des étoffes une fois produites par les procédés de teinture, ce qui peut aussi augmenter l'usure des surfaces textiles.

Ainsi la tribologie des textiles est une discipline complexe due à la structure multi-échelle (fibres → fils → étoffes) et aux frottements qui génèrent de la chaleur entraînant un ramollissement local et ainsi des changements d'adhésion et d'usure. Ces frottements résultent en des ruptures progressives par des sollicitations en fatigue, abrasion, peluchage, entre autres.

1.2.4.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Au-delà de la lubrification, la complexité du frottement est liée aux propriétés mécaniques intrinsèques des structures textiles. Cette corrélation s'observe à différentes échelles liées entre elles : l'échelle microscopique (fibre) détermine l'échelle mésoscopique (fil) qui influence l'échelle macroscopique (étoffe) [45] [44] :

- A l'échelle de la fibre, les sections circulaires augmentent le coefficient de frottement inter-fibres avec plus de points de contacts que des sections trilobées ou triangulaires, la cohésion du fil est donc augmentée.
- Les procédés textiles cherchent à paralléliser les fibres, ce qui augmente le coefficient de frottement par rapport aux autres orientations.
- La ténacité d'un fil et sa torsion varie en fonction de la résistance de la fibre à la rupture et au glissement. La ténacité du fil est maximale lorsque la torsion est optimale, si la torsion est supérieure à ce point optimal, les fibres vont se bloquer dans l'axe d'enroulement du fil, autrement dit elles glissent de moins en moins, ce qui provoque des ruptures amenant des FFMP. Ce phénomène s'inverse avec des fibres longues pour le même enroulement, la torsion est plus grande, donc la ténacité également, ce qui fait qu'il faut plus de force pour extraire ces fibres, il y a donc moins de rupture.

⁴⁷ Özdil et al., 2012

→ Dans un tissu, chaque fil se positionne dans un état de contrainte d'ondulation minimum selon la structure du tissu. Les contacts inter-fils, appelés entrecroisements, jouent sur la cohésion du tissu et ses propriétés mécaniques. Une armure toile, possède plus d'entrecroisements qu'un sergé ou un satin. Elle va avoir un allongement de rupture en traction plus important, une rigidité augmentée en flexion, et un module de cisaillement moins capable de se mettre en forme comme le montre la Figure 14 [45] :



Figure 14 - Comparaison de la capacité des familles de tissus à se mettre en forme en fonction de leur module de cisaillement. [45]

→ Dans un tricot en maille cueillie, chaque fil se positionne dans un état de contrainte d'ondulation minimum selon la structure du tricot. La déformation du tricot en traction entraîne un déplacement de la zone de contact entre les mailles et génère du frottement, susceptible d'engendrer de l'usure en FFMP.

Les propriétés mécaniques d'un textile sont donc dépendantes des frottements à l'intérieur de la matière textile à l'échelle des fibres, des fils et des étoffes. La tribologie est donc cruciale pour comprendre ces interactions. Pour aller plus loin et observer les dégradations engendrées en surface des textiles, il est judicieux de considérer le phénomène d'abrasion.

1.2.4.3. ABRASION

L'abrasion est une forme d'usure particulière qui conditionne la durabilité, l'apparence et la performance des textiles. Les paramètres qui jouent sur la résistance à l'abrasion des étoffes sont généralement le type de fibre, la structure du fil, la construction de l'étoffe et les finitions de surface [47]. Toutefois, la tribologie textile reste incomplètement comprise : les conditions réelles d'utilisation, la variabilité environnementale et la complexité multi-échelle du frottement introduisent des incertitudes.

A l'échelle de la fibre et du filament, l'augmentation de la viscosité intrinsèque, de la masse molaire et surtout de l'orientation des chaînes de polymères par l'étirage accroît la ténacité et la résistance aux micro-fragmentations générées par le frottement. En revanche, une sur-orientation peut réduire la ductilité et conduire à des ruptures plus fragiles sous sollicitation répétée [48] [49]. Des filaments très fins texturés peuvent favoriser la micro-fibrillation en usage sévère [48] [49]. La section et l'emploi de TiO_2 modifient la rugosité et le coefficient de frottement : une dispersion imparfaite du TiO_2 peut accroître la pilosité et initier l'usure locale. Enfin, la finesse et le type de fil sont déterminants, des multifilaments continus lisses (FDY), résistent généralement mieux à l'abrasion que les filaments texturés (DTY), eux-mêmes supérieurs aux filés de fibres [47] [50]. Au niveau des étoffes, une densité plus élevée accroît la couverture, réduit la mobilité fil-fil et améliore la répartition des contraintes, ce qui se traduit par une résistance à l'abrasion accrue [47] [51]. En ennoblissement, la thermofixation stabilise la structure textile, réduit la mobilité interne et la pilosité, et conduit généralement à une résistance accrue à l'abrasion, toutefois une surfixation (température/temps excessifs) peut fragiliser la matière par perte de ductilité [51]. Le calandrage lisse la surface, abaisse le coefficient de frottement (μ) et améliore la tenue sous Martindale, tandis qu'un émerisage favorise la fragmentation [51]. Les enductions créent une barrière de surface et contrôlent μ procurant des gains nets en abrasion dans les essais normalisés [51]. Enfin, la teinture mal maîtrisée (procédés oxydants, durées ou températures excessives) peut induire une hydrolyse superficielle du PET et diminuer la résistance à l'abrasion, alors que des procédés plus doux avec rinçage/fixage adaptés préservent mieux les performances [51].

Par définition, l'abrasion induit l'usure du textile par frottements. Elle se caractérise par :

- La modification de l'état de surface : la surface du textile peut devenir pileuse ou boulochée en formant des amas de fibres.
- L'amincissement et la dégradation du textile : le tissu peut devenir plus fin, plus léger, et même troué à force de frottements répétés.
- La rupture des fibres : les fibres qui composent le fil et l'étoffe sont extraites ou se rompent de leur structure par abrasion.
- La perte de masse du matériau : la matière extraite par abrasion provoque une diminution de la masse du textile.

⁴⁸ Hearle et al., 1998

⁴⁹ Saville, 1999

⁵⁰ Persson, 2000

⁵¹ Horrocks et Anand, 2016

La génération de FFMP résulte souvent d'une abrasion de surface. Par exemple, le port des vêtements est synonyme de dégradation par l'abrasion des textiles. Cette abrasion peut être simulée au laboratoire grâce à un appareil appelé Martindale en réalisant un nombre de cycle défini pour frotter la surface du textile avec un tissu en laine standardisé. Après 5000 cycles appliqués à la surface de textiles en polyester, (Yang et al., 2023) observent des coupures nettes et de la fibrillation en comparaison de la même surface non-abrasée en Figure 15 [24].

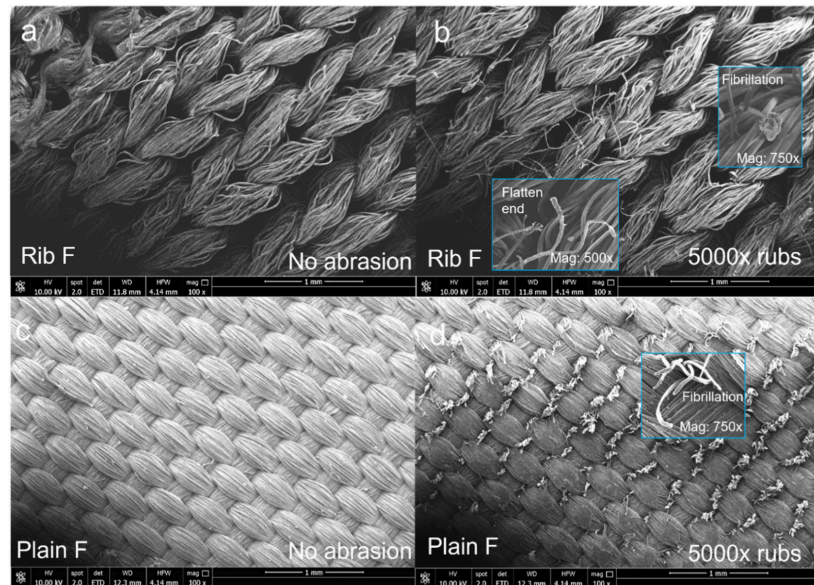


Figure 15 - Comparaison MEB d'étoffes non-abrasées et abrasées après 5000 cycles au Martindale. [24]

Cette abrasion amplifie le relargage au lavage de FFMP issus de tricot interlock en polyester comme le montre la Figure 16 de (Cai et al., 2021), et notamment la quantité de fibrilles. En revanche, la longueur des FFMP est diminuée après l'abrasion, tandis que leur diamètre reste sensiblement identique [23]. D'après (Yang et al., 2021), l'abrasion produit des fibrilles de taille toujours plus petites pouvant atteindre l'échelle des fragments de fibres nanoplastiques d'une dimension inférieure à 1 μ m [33].

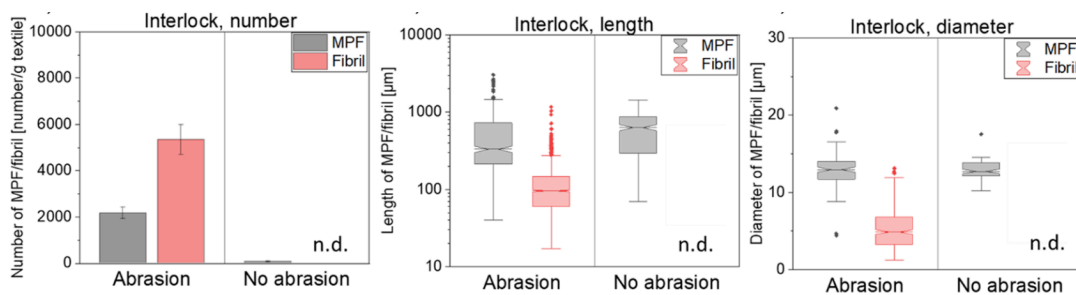


Figure 16 - Comparaison du nombre, de la taille, et du diamètre des FFMP issus d'une étoffe en polyester avant et après abrasion. [23]

Les mécanismes de formation des FFMP sont dus à l'abrasion des textiles, cette abrasion est responsable de la formation du duvet et du boulochage à la surface des textiles jusqu'à la rupture de la fibre en un FFMP ou la fibrillation de la fibre en de multiples FFMP plus petites appelées fibrilles.

1.2.4.4. PARAMÈTRES DU LAVAGE

Au-delà des propriétés textiles intrinsèques comme la matière ou la typologie de produit, de nombreux paramètres externes au textile ont une influence sur la génération de FFMP lors du lavage. Il est possible de lister : le type de machine à laver, l'utilisation de détergent, la température de lavage, la vitesse de rotation, la durée du programme, ou encore la charge de la machine à laver. Ces indications de (Peano et al., 2020) sont référées en Figure 17 [1].

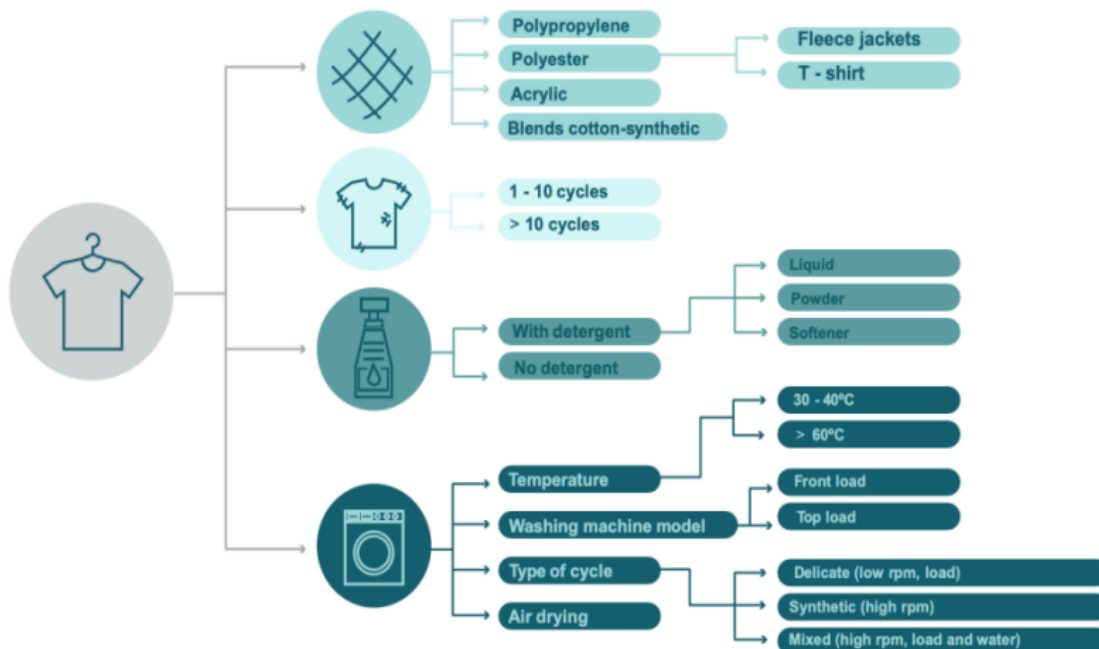


Figure 17 - Paramètres potentiels influençant le relargage de fragments de fibres. [1]

D'abord le type de machine à laver joue un rôle sur la génération de FFMP. En effet, une machine avec une ouverture par le haut émet 7 fois plus de FFMP que les machines à ouverture frontale comme le montre la Figure 18. L'agitateur central du lave-linge à chargement par le haut entraîne le mouvement des textiles dans la machine pendant le cycle de lavage provoquant potentiellement la libération d'une plus grande proportion de fibres plus grosses par abrasion [52].

⁵² Hartline et al., 2016

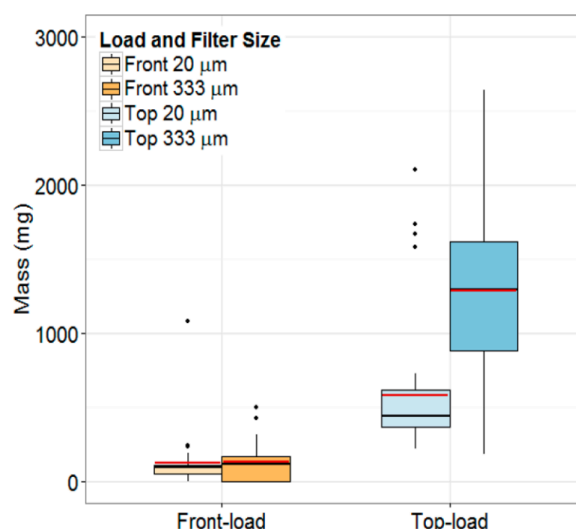


Figure 18 - Comparaison des FFMP collectés (mg) par des machines à laver à ouverture frontale ou par le haut. [52]

Les conditions du lavage ont également une influence sur la génération de FFMP. Leur nombre a tendance à augmenter lorsque le lavage est effectué avec des températures plus élevées. (Zambrano et al., 2019) démontrent ce phénomène en Figure 19 où la quantité de FFMP émises au lavage à 44°C est légèrement plus conséquente pour des étoffes en coton, polyester, polycoton (mélange de coton et de polyester), et viscose, en comparaison d'un lavage à 25°C. Cette tendance est d'autant plus marquée avec l'utilisation de détergent (WD = with detergent) [22].

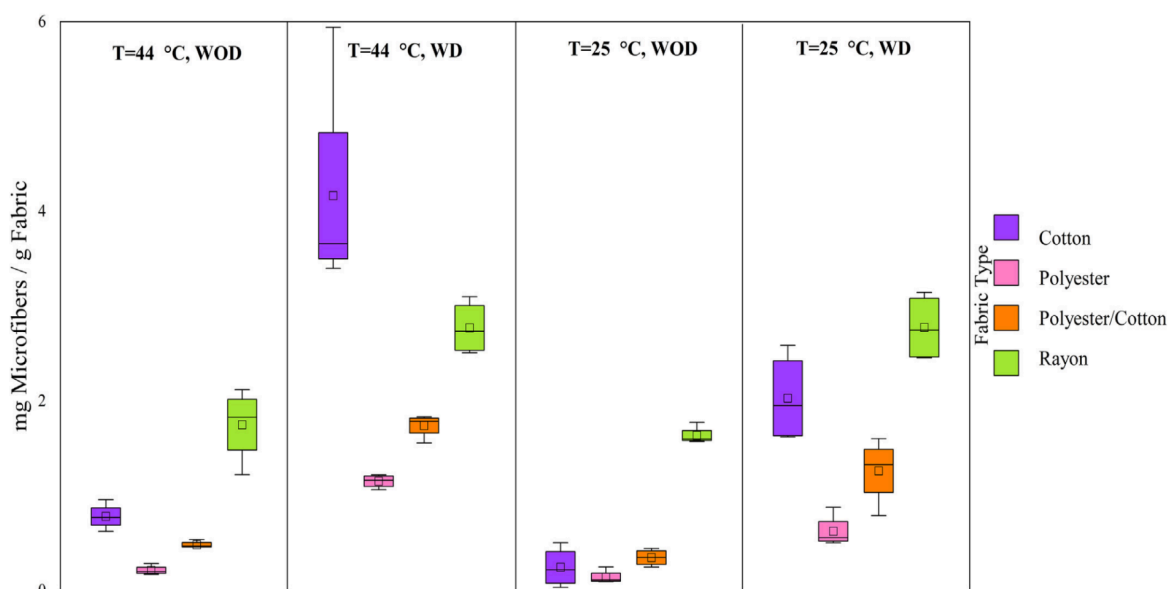


Figure 19 - Comparaison des émissions de fragments de fibres au lavage par des étoffes de différentes matières en fonction du détergent et de la température. [22]

Ce résultat indiquant qu'une température de lavage plus élevée génère davantage de FFMP n'est pas toujours confirmé, ou du moins il y aurait une limite. Lors du lavage d'étoffes en polyester à la très haute température de 90°C, (Hazlehurst et al., 2023) observent en Figure 20 [40] une diminution de la quantité de FFMP de 26% comparé à un lavage à 40°C. Ce résultat est expliqué par le fait que la température de transition vitreuse du polyester, se situant entre 70 et 80°C est dépassée. A 90°C, le polyester est considéré comme une matière plus malléable et moins cassante, ce qui expliquerait ces résultats expérimentaux.

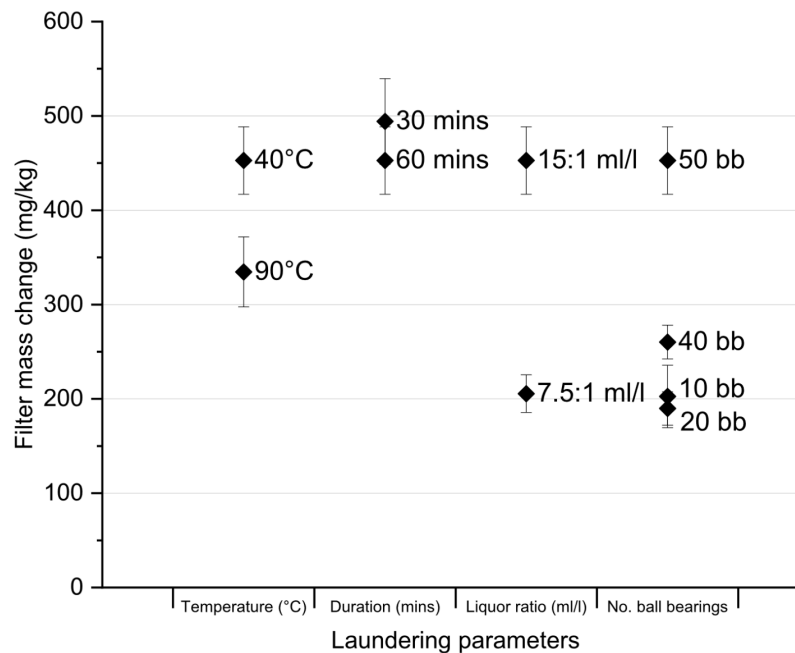


Figure 20 - Paramètres influençant le relargage de FFMP au lavage d'étoffes en polyester. [40]

Cette étude donne également une indication complémentaire sur l'influence de la lessive. (Zambrano et al., 2019) montraient que l'utilisation de lessive provoque un relargage augmenté par rapport à un lavage sans lessive [22]. Ici, (Hazlehurst et al., 2023) indiquent que la quantité de lessive utilisée joue également un rôle. En effet, deux fois plus de FFMP sont relarguées (453 mg/kg contre 206 mg/kg) lorsque la quantité de lessive utilisée est doublée (15 mL de lessive par L d'eau contre 7,5 mL/L) [40].

Autre paramètre étudié : la simulation de lavage TMC réalisée en RotaWash dans cette étude obtient le plus haut relargage lorsqu'un maximum de 50 billes en acier inoxydable sont ajoutées dans les biberons de tests pour simuler l'abrasion lors de la rotation d'un tambour de machine à laver. En revanche, (Hazlehurst et al., 2023) constatent les mêmes ordres de grandeur entre un lavage court de 30 minutes et un lavage plus long de 60 minutes [40].

La charge de la machine à laver doit également être prise en compte pour minimiser le relargage de FFMP. Lorsque la charge est faible, davantage de FFMP sont émis lors du lavage, soit environ 250 ppm pour une charge de 1.5kg. En comparaison, une charge de 5kg génère un relargage de 50 ppm, soit 5 fois moins, selon la Figure 21 (Lant et al., 2020) [53] et confirmé par (Volgare et al., 2021) [54].

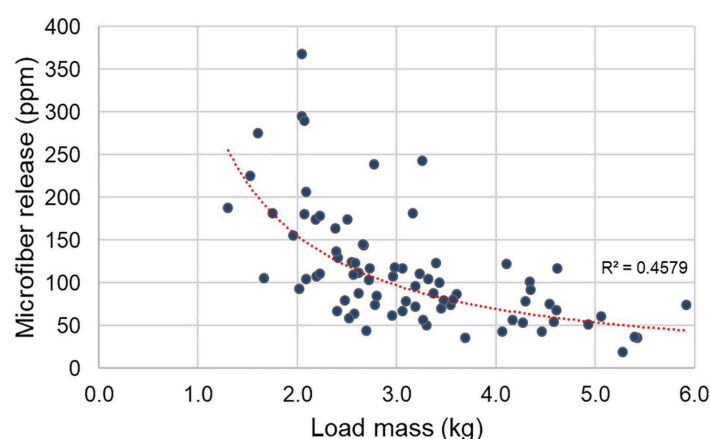


Figure 21 - Influence de la charge de linge (kg) sur la génération de FFMP (ppm). [53]

Dans leur revue de littérature, (Periyasamy et Tehrani-Bagha, 2022) résument ces tendances observées dans les études précédentes avec le Tableau 1 [17]. Pour réduire le relargage de FFMP lors du lavage, il faudrait privilégier une diminution de la température, de la quantité de lessive utilisée, de la vitesse de rotation du tambour, de la durée de lavage, tout en utilisant des machines à laver à charge frontale.

Parameter	Preference
Wash temperature	Lower
Detergent formulation	Lower concentration and better formulation
Spin-speed	Lower
Wash duration	Shorter
Washing machine	Front-loading

Tableau 1 - Paramètres à considérer pour réduire le relargage de fragments de fibres au lavage. [17]

⁵³ Lant et al., 2020

⁵⁴ Volgare et al., 2021

Il est également important de noter que ces recommandations ne concernent pas toute la population mondiale. En effet, toutes les familles du monde entier ne possèdent pas forcément une machine à laver. 50% de la population mondiale lave encore ces vêtements directement à la main dans l'eau environnante. Ce lavage à la main directement dans les rivières est autant générateur de FFMP que celui en machine à laver [55]. Cette étude de (Stanton et al., 2024) contredit celle de (Wang et al., 2023) où la quantité de FFMP est bien plus faible après lavage à la main (en nombre/g 26216 vs 1970) [56]. Cependant ces fragments sont moins nombreux mais plus longs. La maîtrise des paramètres du lavage des textiles est nécessaire mais n'est donc pas une solution suffisante face à la fragmentation.

1.2.4.5. VIEILLISSEMENT

Le vieillissement correspond à l'ensemble des modifications irréversibles des propriétés (physiques, chimiques et esthétiques) d'un matériau polymère sous l'effet du temps et de son exposition à divers facteurs environnementaux. Il peut s'agir entre autres de l'effet de la chaleur, de l'oxygène, de l'humidité, de l'eau, ou encore de la lumière. Dans le cas d'un vieillissement des fibres synthétiques comme le polyester, une immersion prolongée dans l'eau peut provoquer l'hydrolyse de certaines fibres jusqu'à leur rupture. L'hydrolyse, autrement dit le contact du polymère avec l'eau, va rompre les liaisons chimiques du polymère et donc extraire de la structure des fragments de plastique [57]. Jusqu'ici, aucune étude n'a montré que ce phénomène s'appliquait aux textiles synthétiques lors de leur lavage, notamment pour expliquer la génération des FFMP. Un second vieillissement à prendre en compte avec un impact avéré sur la génération de FFMP par les textiles est le vieillissement par exposition à la lumière, notamment aux rayons ultraviolets (UV) émis par le soleil. Les UV provoquent la rupture des liaisons chimiques au sein des polymères, entraînant potentiellement une perte de résistance mécanique, un jaunissement, et une fragilisation des fibres. Après avoir subi cet affaiblissement de leurs propriétés, les textiles synthétiques sont donc plus enclins à la rupture des fibres de leur structure et donc à l'émission des FFMP. A ce sujet, (Pinlova et Nowack, 2023) montrent que l'exposition aux UV de quatre étoffes en polyester augmente les FFMP générés. En chiffres, des centaines de FFMP/g de textiles sont collectés avant vieillissement, alors qu'après deux mois d'exposition aux UV, ils extraient entre 150000 et 400000 FFMP/g [58].

⁵⁵ Stanton et al., 2024

⁵⁶ Wang et al., 2023

⁵⁷ Deshouilles, 2020

⁵⁸ Pinlova et Nowack, 2023

1.2.4.6. USURE

L'usure correspond à la dégradation des structures textiles. C'est la manifestation globale de toutes les causes de fragmentation évoquées précédemment. Lors des lavages successifs d'un textile, l'usure est représentée lorsque le plateau de génération de FFMP atteint au troisième lavage repart à la hausse après des dizaines de lavage. Cette usure des textiles s'engendre suite aux frottements et à l'abrasion répétée de la surface textile. L'illustration en Figure 22, montre que l'état de surface du textile est affecté par l'apparition d'une pilosité de surface [45]. Ce processus est cyclique selon (Bueno, 2015) : la répétition du frottement fait émerger des fibres de la surface du tissu. Ces fibres nouvellement formées subissent l'abrasion et s'use, elles finissent par se détacher de la surface du textile en FFMP. Une fois ces fibres parties en fragments, la couche de fibres juste en dessous est à son tour exposée à l'abrasion. Le processus recommence alors, jusqu'à l'émission de nouveaux FFMP, et ainsi de suite. Ce cycle continu contribue à la dégradation progressive du textile et à la libération constante de FFMP.

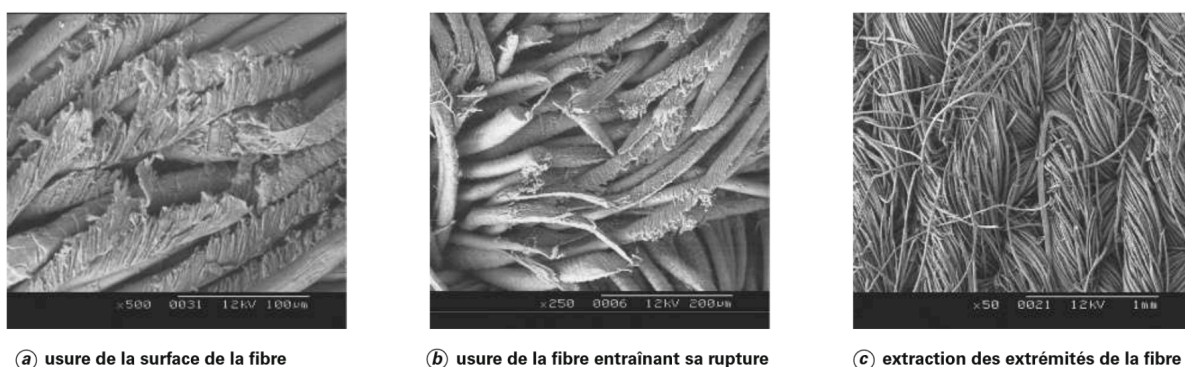


Figure 22 - Illustration de l'usure à la surface du textile. [45]

Les phénomènes de fragmentation interviennent tout au long du cycle de vie des textiles. Ainsi, l'influence de la tribologie, des propriétés mécaniques, de l'abrasion, du lavage, et du vieillissement, sont des facteurs à prendre en compte sur toute la durée de vie des textiles. Toutes ces causes peuvent conduire à l'usure des textiles et donc à la génération de fragments de fibres microplastiques. Pourtant, en fonction des caractéristiques des structures textiles, la quantité de FFMP générés varie.

1.2.5. INFLUENCE DES STRUCTURES TEXTILES

Le relargage de FFMP dépend de chaque textile. En fonction des choix de conception qui le composent, un textile va générer une masse de FFMP qui lui est propre. Cette quantité dépend de la structure textile en elle-même, et donc des procédés textiles qui ont été utilisés lors de sa production jusqu'au lavage. (Mermaids et Life, 2018) énoncent en Figure 23 les propriétés textiles qui ont une influence sur le relargage de FFMP à chaque étape de la chaîne de transformation textile, c'est-à-dire à l'échelle des fibres, des fils, des étoffes, et des vêtements [35].

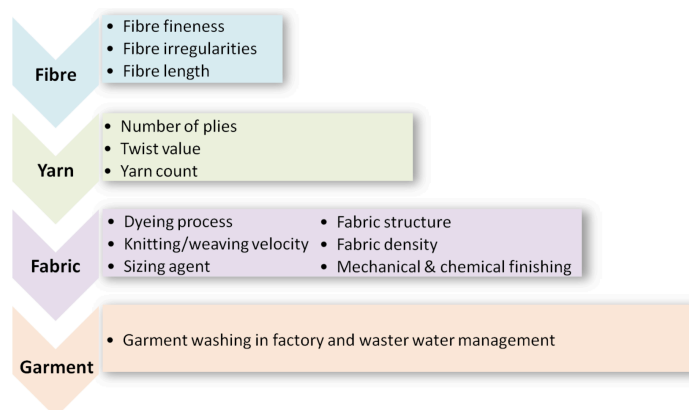


Figure 23 - Paramètres influençant le relargage de FFMP à différentes échelles de la structure textile. [35]

Selon cette étude, réduire le relargage de FFMP est possible en utilisant :

- Des fibres plus épaisses, plus longues, et plus irrégulières.
- Des fils plus fins avec moins de fibres à l'intérieur et avec plus de torsion.
- Des fils avec plusieurs bouts plutôt que des fils simples.
- Une teinture sur fil plutôt que sur étoffe.
- Du lubrifiant sur les fils avant tissage/tricotage.
- Des vitesses de tissage et de tricotage plus faibles.
- Des armures de tissage et des contextures de maille adaptées.
- Des étoffes plus denses.
- Des étoffes moins abrasées en surface par finition mécanique.
- Des étoffes protégées par une finition chimique.
- Des vêtements pré-lavés en usine avec une gestion des eaux usées.

Ces recommandations vont être confirmées par certains chercheurs et également remises en question par d'autres études réalisées à chaque échelle de la chaîne de transformation textile pour étudier la fragmentation des textiles en FFMP en fonction de la structure du textile.

1.2.5.1. POLYMÈRES

Tout commence avec la matière première. De nombreuses études s'intéressent à la différence de relargage entre le polyester vierge (PET) et le polyester recyclé (RPET). Le recyclage fait entrer la matière dans une seconde vie avec potentiellement une fragmentation accrue en fonction du procédé de recyclage utilisé (mécanique, thermique ou chimique). Ainsi, (Müller et al., 2023) démontrent que le relargage mesuré est plus important dans le cas d'une polaire avec 61% de PET recyclé et 39% de vierge, comparé à la polaire du même poids à structure tricotée et finitions équivalentes en 100% PET vierge [37]. Au contraire, d'autres études estiment qu'il n'y a pas de différence en termes de FFMP générées par un PET vierge en comparaison d'un PET recyclé mécaniquement [59]. En revanche, (Bland et Sheridan, 2023) précisent qu'il n'y a pas encore assez de résultats pour conclure sur l'impact du recyclage chimique [59]. D'après quatre tricots en polyester de masses variées composés de filaments ou de filés de fibres, avec pour chacun une version vierge et la même version recyclée, (Gao et al., 2024) confirment également qu'il n'y a aucune évidence pour dire que le polyester recyclé engendrerait davantage de fragmentation [60]. (De Falco et al., 2020) ont montré que le PET vierge et recyclé libèrent des quantités similaires de FFMP à partir de tissus sergés, tandis que les tissus toiles en RPET en libèrent moins que leur équivalent vierge [6]. (Belzagui et al., 2019) ont aussi observé que les structures en polyester recyclé génèrent moins de MPFF [61]. Cependant, (Özkan et Gündogdu, 2021) ont montré qu'un tricot côtelé 1x1 en polyester recyclé émet plus de FFMP que son homologue vierge, et que le PET recyclé thermo-mécaniquement à partir de déchets de bouteilles augmente cette libération [62]. Étant donné ces incohérences, il reste difficile de tirer des conclusions définitives de la littérature.

Les familles de polymères ont des propriétés qui leur sont propres et qui peuvent avoir une influence sur le relargage de FFMP. Parmi elles, le polyester est souvent comparé au polyamide. A ce sujet, (Vassilenko et al., 2021) mettent en avant que le polyamide émet 6 fois moins de FFMP au lavage (27 ± 14 mg/kg) que le polyester (161 ± 173 mg/kg) [63].

⁵⁹ Bland et Sheridan, 2023

⁶⁰ Gao et al, 2024

⁶¹ Belzagui et al., 2019

⁶² Özkan et Gündogdu, 2021

⁶³ Vassilenko et al., 2021

1.2.5.2. FIBRES

Les polymères sont ensuite transformés en fibres par fusion et étirage. Le procédé de filage en voie fondue met en œuvre les polymères afin de créer des filaments. Cette étape peut faire varier le relargage des produits finis en matière synthétique. Afin de minimiser les proportions de FFMP émises, il est conseillé d'ajuster la température des filières au plus près des températures de fusion du polymère, ainsi que d'augmenter la finesse des fibres, à nouveau selon (Mermaids et Life, 2018) [35]. (Hazlehurst et al., 2024) démontrent que deux filés de fibres en acrylique de même section mais avec des fibres de différentes finesses génèrent des quantités de FFMP similaires [64]. Aucune étude ne met en avant les liens entre la fragmentation des fibres et les paramètres des fibres en polyester comme leur forme de section, leur nombre de filaments qui les composent, ou encore les additifs présents dans les polymères, ne sont pas étudiés pour comprendre leurs influences sur le relargage.

1.2.5.3. FILS

A l'échelle des fils, on distingue les multifilaments et les filés de fibres par la longueur des fibres qui les composent. Les fibres longues obtenues après le filage peuvent être texturées en multifilaments ou bien découpées en fibres courtes d'une longueur définie. La coupe des filaments en fibre courte pour permettre la filature des fibres synthétiques est une étape émettrice de FFMP [65] [66]. De plus, les fibres longues continues qui composent les multifilaments sont moins sources de relargage que les fibres courtes discontinues [42] [66]. Des différences ont également été découvertes entre les procédés de filature eux même, la filature vortex est la moins émettrice de FFMP (environ 16 mg de FFMP / kg de fil), de peu devant les filés de fibres traditionnels ronds et compacts (environ 70 mg/kg) [65]. La filature ring conventionnelle relargue plus de FFMP que la filature ring modifiée en compact, siro, ou siro-compact [67]. En revanche, la filature open-end, qui produit des filés de fibres rotors plus lâches et moins orientés, est une source largement plus considérable de FFMP (440 à 1700 mg/kg) du fait de la faible torsion et de la forte vitesse appliquées [65] [66]. Pour (Hazlehurst et al., 2024), les filés de fibres vortex et ring d'une finesse de 15 Tex ont des relargages similaires entre 100 et 150 mg/kg, en revanche pour les même fils plus épais (30 Tex), le relargage du vortex est identique tandis que celui du ring augmente au-delà des 200 mg/kg [64].

⁶⁴ Hazlehurst et al., 2024

⁶⁵ Pinlova et al., 2022

⁶⁶ Cai et al., 2020

⁶⁷ Jabbar et al., 2023

Pour les filaments non-coupés, il existe différents types de texturation des brins du multifilament. La texturation à l'air (ATY) est plus émettrice de FFMP que les autres méthodes de texturations selon (Günaydin Karakan et al., 2017) [68]. Pour (Mermaids et Life, 2018), la finesse des fils influence le relargage, plus le titre du fil est petit, donc plus le fil est épais, moins le relargage du filament sera conséquent [35].

1.2.5.4. ÉTOFFES

Les fils sont ensuite entrelacés entre eux pour être mis en structure tissée ou tricotée. Les paramètres de production des tricots et des tissus jouent sur les structures textiles et ont un impact certain sur le relargage des FFMP. La vitesse des machines de tissage et de tricotage dégrade par abrasion les fils, c'est une première cause du relargage selon (Mermaids et Life, 2018) [35]. De manière générale, la famille des tricots a tendance à générer davantage de FFMP que celle des tissus, bien que dans les deux cas, plus la structure est serrée et dense, moins elle génère de FFMP pour (Periyasamy et Tehrani-Bagha, 2022) [17]. (Cai et al., 2020) montrent que le jersey et l'interlock sont les tricots les plus relarguants, mais qu'aucune tendance claire ne se dégage dans la famille des tissus [66].

1.2.5.5. ENNOBLISSEMENT

L'étape de teinture est souvent critiquée pour son impact environnemental considérable du fait d'une grande consommation de ressources en eau et en énergie. De plus, cette étape est également pointée du doigt par (Müller et al., 2023) pour le fort taux de FFMP émis lors de la teinture, et d'autant plus par le séchage qui s'ensuit [37]. Une fois teint et sec, des traitements de finitions sont appliqués à la surface des étoffes. Des finitions mécaniques abrasent la surface du textile pour améliorer les sensations au toucher en imitant des matières naturelles et également en augmentant les propriétés thermiques comme pour une polaire. Or cette abrasion utilisée notamment dans les opérations de grattage, a pour conséquence d'amplifier le relargage de FFMP au lavage. Ce phénomène s'illustre avec les trois étoffes dont la surface a été traitée avec une finition mécanique dans l'étude de (Cai et al., 2020). En effet, le tissu brossé, le tissu microfibre, et le tricot polaire sont les structures les plus génératrices de FFMP comparés aux tricots et tissus non traités en surface avec plus de 10000 FFMP / g de textile [66]. A propos de la polaire, elle relargue en moyenne 1100 FFMP pour 100 cm² de textile lavé, soit 100 fois plus que les autres étoffes en polyester sans traitement de finition mécanique [69].

⁶⁸ Günaydin Karakan et al., 2017

⁶⁹ Carney-Almroth et al., 2018

Pour (Periyasamy et Tehrani-Bagha, 2022), seuls le calandrage et le flambage sont des finitions mécaniques qui diminuent le relargage de FFMP. Le calandrage fonctionne par aplatissement de la matière, tandis que le flambage consiste à brûler les fibres pileuses à la surface des textiles, mais cette spécialité n'est utilisée que sur les textiles naturels [17].

Des finitions chimiques peuvent également être appliquées à la surface des textiles, notamment par applications de membranes ou d'enduction. Pour (Sun et al., 2023), ces finitions chimiques sont une solution pour diminuer le relargage en apportant une couche de protection à la matière textile et donc en limitant l'abrasion [70]. Enfin, (Ramasamy et Subramanian, 2022 et 2023) ont montré que des traitements de surface par hydrolyse à la soude ou à base d'enzymes, dont les paramètres du bain ont été optimisés par la méthode Taguchi, peuvent également diminuer le relargage de FFMP [71] [72]. Tous ces traitements de finitions ont donc une influence sur le relargage des FFMP issus de la surface des textiles.

1.2.5.6. CONFECTION

Après avoir réalisé un rouleau de tissu ou de tricot ennoblis, il faut ensuite le découper et l'assembler par confection. Cette étape fait prendre conscience qu'il n'y a pas que la surface des textiles qui émet des FFMP, ils peuvent aussi provenir des bords du textile. La découpe des pièces textiles en confection, ou encore l'étape de couture, transforment les bords des textiles en zones de faiblesses d'où proviennent les FFMP d'après (Mermaids et Life, 2018) [35]. Le relargage des FFMP provient donc de la surface des textiles mais aussi des bordures, et pour (Cai et al., 2020) le mode de coupe au ciseau ou au laser a également son importance avec un relargage largement moins conséquent suite à une coupe au laser [66]. Le laser a tendance à faire fondre les fibres synthétiques sur elle-même lors de la découpe et renforce donc les bords du textile. En chiffres, (Rathinamoorthy et Raja Balasaraswathi, 2023) ont mesuré qu'une découpe laser génère 5 FFMP/m² au lavage d'un tricot en polyester contre plus de 90 FFMP/m² pour le même textile découpé au ciseau [73]. Les coutures ont également leur importance, la densité des points réduit le relargage de FFMP au lavage plus elle est dense [73]. Les types de points choisis influencent aussi le relargage, un tricot en polyester cousu avec un ourlet génère seulement 10 FFMP/m² au lavage contre 90 FFMP/m² pour le même textile avec une couture simple [73].

⁷⁰ Sun et al., 2023

⁷¹ Ramasamy et Subramanian, 2022

⁷² Ramasamy et Subramanian, 2023

⁷³ Rathinamoorthy et Raja Balasaraswathi, 2023

1.2.5.7. SYNTHÈSE

Des études proposent des revues de littérature de l'influence de tous ces paramètres sur le relargage de FFMP [17] [35] [74]. Ils résument les paramètres à prioriser à chaque échelle de la structure textile pour minimiser les rejets de FFMP lors du lavage :

- FIBRES : Elles doivent être de préférence des fibres longues dans les filés de fibres ou des filaments.
- FILS : Des fils plus fins avec plus d'élongation et des fils peignés avec moins de pilosité sont à privilégier.
- ETOFFES : Une plus forte torsion des fils dans les étoffes et des structures plus serrées sont favorables pour minimiser le relargage des tricots et des tissus.
- FINITIONS : Les surfaces des étoffes évitent les traitements mécaniques et se tournent vers une résistance à l'abrasion accrue.
- CONFECTION : Pour l'assemblage des vêtements, il est nécessaire de limiter la perforation par les aiguilles de couture mais important de coudre les bords pour renforcer les zones sensibles du textile plus à même d'émettre des FFMP.

Ces recommandations paraissent individuelles pourtant elles peuvent se combiner dans l'ensemble de la structure textile. Des fibres longues dans une étoffe lâche ont des effets divergeant sur le relargage et ne permettront peut-être pas de le compenser. A l'inverse, rien ne prouve que les effets des fibres longues dans une étoffe serrée se cumulent. Ou bien encore si l'un des deux effets est plus impactant que l'autre sur le relargage. C'est pourquoi une vue d'ensemble des échelles de la structure textile sur le relargage est nécessaire.

⁷⁴ Rathinamoorthy et Raja Balasaraswathi, 2024

1.2.5.8. VUE D'ENSEMBLE

Quelques éléments de la littérature mettent déjà en évidence la complexité des liens entre les paramètres qui influencent le relargage aux différentes échelles de la structure textile. Un exemple simple serait de retenir que le polyamide émet significativement moins de FFMP que le polyester d'après les résultats de (Vassilenko et al., 2021) [63], or cette lecture unilatérale du résultat omet de préciser que les étoffes en polyamide utilisées sont des tissus plus denses, alors que les textiles en polyester sont des tricots et surtout des polaires avec finition mécanique. Il est vrai que les tricots relarguent plus que les tissus [66] mais l'écart n'est peut-être pas aussi important que ce qui est retenu dans le collectif des chercheurs. La vue d'ensemble expliquerait que ce phénomène est alimenté par le fait que les tricots sont souvent conçus à partir de filés de fibres, donc de fibres courtes, elles-mêmes à l'origine d'une fragmentation facilitée. Ces exemples mettent en évidence la complexité de compréhension de la fragmentation en fonction des structures textiles, un seul paramètre n'explique pas à lui seul la génération de FFMP mais c'est bien la vue d'ensemble des paramètres textiles qui est à prendre en considération. C'est pourquoi cette thèse a pour objectif de hiérarchiser les paramètres qui influencent le relargage et de faire les liens entre eux pour atteindre cette vue d'ensemble. D'autres solutions pour limiter la fragmentation des textiles sont développées dans la partie suivante.

1.3. LIMITER LA FRAGMENTATION

La science travaille à comprendre la génération de FFMP. Ce travail porte ses fruits depuis quelques années pour comprendre le phénomène de la fragmentation des fibres. Bien que ces avancées soient au rendez-vous, elles restent incomplètes et le travail à mener n'est pas encore terminé. Pourtant il existe déjà des solutions pour lutter contre la pollution des fragments de fibres microplastiques.

1.3.1. RÉGLEMENTATION

Le cadre législatif qui se dessine pour accompagner la transition environnementale des États ces dernières années souhaite prendre en compte la fragmentation des fibres. L'idée est de contraindre l'industrie textile à respecter des seuils d'émissions en mettant en place des actions pour lutter contre ce problème environnemental.

Au niveau de la fabrication textile, l'organisme Zero Discharge of Hazardous Chemicals (ZDHC) collabore avec The Microfibre Consortium (TMC) depuis 2024. Leurs premiers travaux communs ont montré que le taux de solides en suspension TSS dans les eaux usées des usines étaient corrélées à la quantité de fragments de fibres [75]. Depuis 2025, les fabricants de textile investis auprès de marques engagées dans le programme ZDHC sont animés sur cet indicateur. Pour être conforme à l'audit ZDHC, il faut dorénavant une quantité de TSS inférieure à 50 g/L dans les eaux usées des usines.

En France, la loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire impose aux fabricants de machine à laver d'équiper leurs machines à laver neuves d'un filtre en 2025. Cette mesure est en attente de décret. La loi AGECL impose également la mention "rejette des microfibres plastiques dans l'environnement lors du lavage" sur les étiquettes des textiles composés de plus de 50% de matière synthétique. L'affichage environnemental français, porté par le gouvernement et l'ADEME, a également mis au point une méthode de calcul basée sur la capacité d'un textile à relarguer des fragments de fibres persistants dans l'environnement. Ce "complément microfibres" vient s'ajouter au score d'impact environnemental du produit dans le calculateur d'analyse de cycle de vie français ECOBLAYSE.

⁷⁵ ZDHC Wastewater Guidelines V2.2

En Europe, la Commission Européenne vient d'adopter le livrable Apparel and Footwear Product Environmental Footprint Category Rules. Cette méthode vise à calculer l'impact environnemental des produits textiles mis sur le marché afin d'afficher leur score environnemental sur les étiquettes. Les fragments de fibres sont optionnels dans cet affichage européen à la différence de l'affichage français. C'est-à-dire que l'impact environnemental du produit ne comprend pas le relargage de FF mais qu'il est possible de l'afficher en supplément avec un indicateur complémentaire. La mesure proposée se base sur le test TMC pour quantifier les FF émis au premier lavage, puis cette masse est convertie en impact environnemental avec la méthodologie de MariLCA en fonction de la persistance dans l'océan de la matière émise selon la méthodologie (Corella-Puertas et al., 2023) [76]. L'Europe considère que le sujet de la fragmentation des fibres n'est pas suffisamment mature scientifiquement. Elle souhaite renforcer son indicateur par les émissions de FF aux autres étapes du cycle de vie (production, fin de vie) et dans d'autres environnements (air, sols) avant de l'intégrer à l'impact environnemental global du produit textile.

Toujours en Europe, dans les années à venir, d'autres réglementations sont en élaboration en lien avec la mise sur le marché des produits textiles. La Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) et les Green Claims Directives (GCD) prévoient d'avertir le consommateur si des FFMP sont générés ou utilisés dans les étapes de production. Les Waste Framework Directives (WFD) envisagent que les émissions de FFMP deviennent un critère pour les écomodulations attribuées par la REP textile (Responsabilité Élargie du Producteur). En 2028, la réglementation autour du futur de l'écoconception Ecodesign Sustainable Products Regulation (ESPR) compte intégrer les nano- et microplastiques. Ces réglementations à venir poussent l'industrie textile à réduire les émissions de FFMP.

1.3.2. CAPTATION

Il existe plusieurs alternatives pour lutter contre la pollution des FFMP. La première solution est de capturer les FFMP émis et éviter qu'elles ne s'échappent dans l'environnement. Cette captation peut avoir lieu à différentes étapes du cycle de vie d'un textile. D'abord lors de sa production : des systèmes d'aspiration sont utilisés pour capturer les fragments de fibres directement sur les machines de filature, de tissage, de tricotage, ou encore de finition mécanique. Cela permet aux industriels de collecter de la matière bien identifiée et propre pour potentiellement la recycler en fibres textiles ou en isolant en fonction de la taille des fragments.

⁷⁶ Corella-Puertas et al., 2023

Il est également possible d'utiliser des systèmes de filtration. A nouveau en production pour filtrer les eaux usées des usines, par exemple celles issues des bains de teintures, dans lesquelles on retrouve des FFMP. Une fois chez le consommateur, il est également possible de réaliser cette opération de filtration à la sortie de la machine à laver avec les filtres Lint LUV-R, XFiltra ou PlanetCare pour réduire la masse de FFMP de 25% à 80% dans le meilleur des cas avec Xfiltra selon (Belzagui et Guttiérrez-Bouzán, 2022) [36]. Dans les deux cas, l'efficacité de ces filtrations va dépendre de la taille des pores du filtre et de son entretien. Lors du lavage des textiles, il y a également la possibilité de diminuer l'abrasion à la surface des textiles, par exemple avec les sacs de lavage Guppyfriend ou Fourth Element, ou encore avec les balles de frottements Coraball, présentées en Figure 24. Ces solutions permettent de réduire la masse de FFMP de 5% à 54% dans le meilleur des cas avec le sac Guppyfriend d'après la synthèse de (Belzagui et Guttiérrez-Bouzán, 2022) en Figure 24 [36] basée sur les études de (McIlwraith et al., 2019) [77] et (Napper et al., 2020) [78]. (Kärkkäinen et Sillanpää, 2021) appuient ces résultats et estiment que les FFMP sont capturés à 39% en nombre avec le sac Guppyfriend et 10% en nombre avec la technologie Coraball [79]. Les lessives jouent également un rôle dans la fragmentation des fibres lors du lavage : celle de Zara Home est qualifiée d'anti-relargage, tandis que Mutyne propose une lessive avec des agents anti-boulochage.

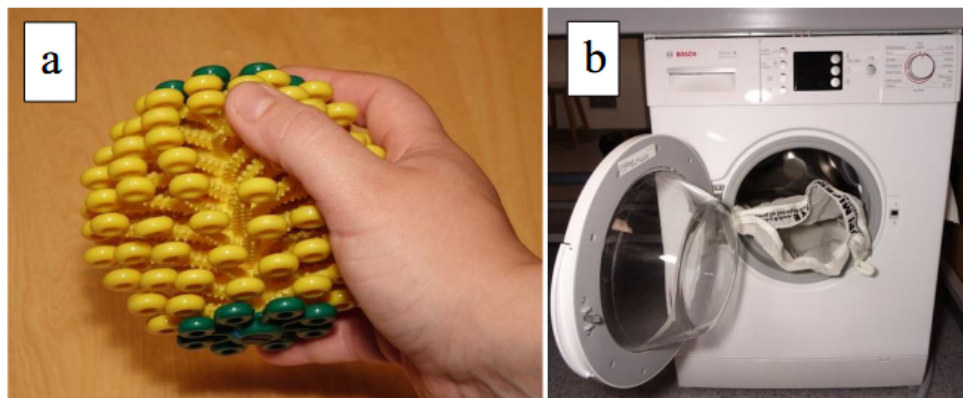


Figure 24 - Illustration des technologies a) balle Coraball et b) sac Guppyfriend utilisées lors du lavage pour capturer les FFMP. [36]

Le lavage des textiles par les industriels avant de les commercialiser est une piste de solution souvent évoquée par (Müller et al., 2023) [37]. Cela permettrait d'avoir une meilleure gestion des eaux usées, et donc des FFMP, plutôt que de diviser le flux dans chaque ménage. Pour les industriels, le bain de teinture et notamment le rinçage successif joue déjà un rôle similaire.

⁷⁷ McIlwraith et al., 2019

⁷⁸ Napper et al., 2020

⁷⁹ Kärkkäinen et Sillanpää, 2021

Dans les régions suffisamment développées en gestion de l'eau, les FFMP présents dans les eaux usées finissent leur course dans les stations d'épuration. (Zambrano et al., 2019) annoncent qu'elles arrêtent jusqu'à 98% des fragments de fibres captés, bien que les plus petits fragments microplastiques peuvent s'échapper [22]. Les FFMP se retrouvent ainsi bloqués dans les boues des stations d'épuration. Ces boues peuvent être incinérées ou répandues comme engrais dans l'agriculture. Dans le second cas, les FFMP se retrouvent à nouveau dans l'environnement en contact direct avec les sols et l'écosystème associé.

1.3.3. BIODÉGRADABILITÉ

Lorsque les FFMP ne sont pas captés par les systèmes d'aspiration ou de filtration, ils finissent par rejoindre l'environnement. Pour lutter contre ce scénario, des innovations textiles voient le jour et proposent notamment de nouvelles matières synthétiques biodégradables pour remplacer les fibres plastiques actuelles. Ces matériaux se composent d'additifs ou d'enzymes tels que Yarnaway de ANTEX, CiCLO de IAM, voire même de nouveau monomères dans la chaîne de polymères CELYS de INTIMITY. Ils affichent des propriétés thermomécaniques équivalentes sur le papier avec en complément la possibilité de rendre les polymères biodégradables dans un environnement donné, par exemple une fois sous forme de FFMP dans l'océan. Par exemple, dans l'eau salée, le polyester de CiCLO est estimé biodégradé à 94% au bout de 3,7 ans contre 5% pour un polyester conventionnel. La durée de vie d'un FFMP est donc réduite significativement mais trois années restent suffisantes pour bouleverser la faune et la flore marine. De plus, les conditions de biodégradabilité restant encore très spécifiques et les technologies coûteuses, ces matériaux n'ont pas encore donné satisfaction.

1.3.4. CONCEPTION

Des systèmes de réglementations, aux fabricants de matières premières innovantes, en passant par les technologies de captation en production et lors du lavage, il est intéressant de noter que la réponse à la problématique des FFMP n'est pas isolée ni commune à toute l'industrie textile. Un puzzle se rassemble pour apporter des solutions multiples pour lutter contre la fragmentation des fibres. Une pièce du puzzle est cependant manquante. Il s'agit du rôle des marques qui conçoivent les textiles.

Jusqu'ici, les solutions imaginées prennent en compte que des FFMP sont forcément émis des textiles, ce qui donne pour objectif de les capturer par filtration ou de les faire disparaître par biodégradabilité. Pourtant, rien n'empêche de penser qu'il est possible de produire un textile qui n'émet aucun FFMP. Cette idée semble tout de même utopique. Une ambition plus raisonnable serait de concevoir des textiles qui génèrent moins de FFMP au long de leur cycle de vie. Cela permettrait de minimiser le phénomène de la fragmentation des fibres dès les étapes de conception. Les marques d'habillement s'orientent depuis quelques années vers l'écoconception. Avec une maîtrise de la chaîne de valeur du fil au produit fini, le développement de textiles synthétiques moins relarguant s'inscrirait dans cette démarche.

Les grandes tendances de cette éco-conception vers un relargage minimisé sont rassemblées dans ce premier chapitre. Elles représentent les fondations de ce projet de thèse. Pourtant ces tendances ont des défauts. Premièrement, elles sont peu détaillées. Il serait judicieux d'en savoir plus sur les sous-paramètres de chaque étape de production. En d'autres termes, plutôt que de comparer les filaments aux filés de fibres, il serait intéressant de savoir comment texturer le multifilament qui subira le moins de fragmentation possible. Même constat à l'échelle de l'étoffe, où les tricots sont opposés aux tissus. Dans chacune de ces deux familles, quels sont les paramètres qui permettraient de concevoir un tissu moins relarguant et un tricot moins relarguant ? Afin de lever ce verrou scientifique, cet état de l'art doit donc être complété par une étude approfondie de chaque famille de structure textile et des paramètres associés. Deuxièmement, la lecture des paramètres est souvent isolée. Cela signifie que l'effet d'un paramètre sur la fragmentation est connu. Par exemple, appliquer une finition mécanique en surface d'une étoffe augmente le relargage, mais qu'en est-il si la structure abrasée est un tissu en armure sergé avec des multifilaments épais ? La vue d'ensemble de la chaîne de transformation textile est nécessaire pour répondre à la problématique de la fragmentation des fibres. Cela permettrait de mettre bout à bout l'influence de chaque paramètre de la fabrication textile et son effet sur le relargage de FFMP. Le sujet ne serait plus abordé par une seule clé d'entrée mais bien par une combinaison des effets combinés des fibres, des fils, de l'étoffe, et des finitions utilisées, sur la génération de FFMP. L'objectif de cette thèse est de remettre au centre de la fragmentation le produit textile en lui-même pour parvenir à générer moins de FFMP lors du premier lavage grâce à des choix de conception mieux éclairés.

2. CHAPITRE 2 - MÉTHODES

D'après la littérature étudiée, la fragmentation des fibres est un phénomène complexe. La méthode utilisée pour identifier les choix de conception permettant de réduire le relargage des textiles synthétiques doit donc être robuste. Une vision d'ensemble de la chaîne de valeur textile est nécessaire pour aborder le sujet de la fragmentation des fibres. Cependant, il est d'abord judicieux de rentrer dans le détail de chacun des procédés textiles pour déceler les paramètres significatifs à l'intérieur de chacun d'eux. C'est pourquoi la méthodologie appliquée dans ce projet de thèse vise à étudier chaque procédé de fabrication de manière isolée via quatre plans d'expériences Taguchi. Les procédés textiles étudiés, illustrés en Figure 25, sont :

1. **Le filage** : transformation des polymères en multifilaments.
2. **La filature** : transformation des fibres en filés de fibres.
3. **Le tissage et le tricotage** : transformation des fils en étoffes.
4. **Les finitions** : application optionnelle de traitements de surface.

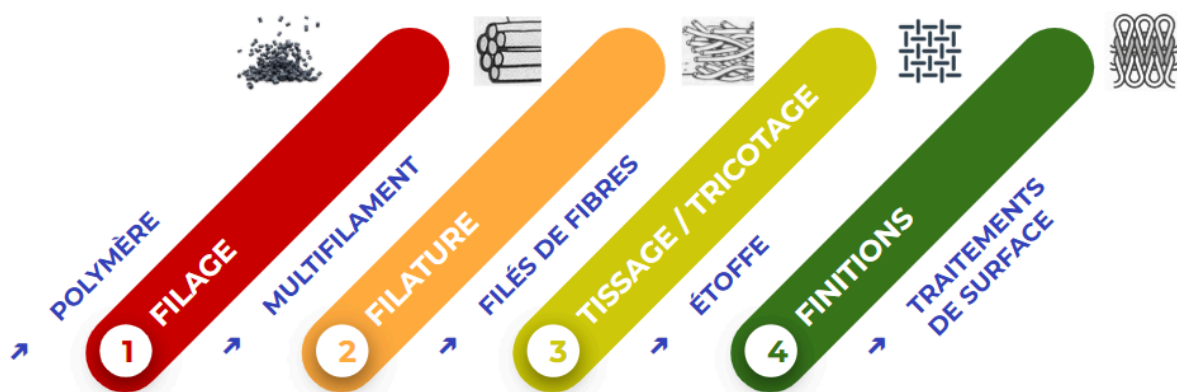


Figure 25 - Étude isolée des procédés textiles de la chaîne de transformation selon quatre plans d'expériences Taguchi.

Une fois l'étude de chaque procédé réalisé, des liens seront faits entre eux pour mettre en relief tous les paramètres étudiés dans l'ensemble de la chaîne de transformation textile, du fil à l'étoffe finie commercialisable. Ainsi, les procédés de sont donc au cœur de ce sujet de thèse, leur maîtrise à un niveau industriel est cruciale pour identifier des paramètres dominants sur la génération de FFMP. Pour y parvenir, il est nécessaire de comprendre le rôle de chaque procédé dans la chaîne de fabrication textile.

2.1. ÉTUDE DES PROCÉDÉS TEXTILES

2.1.1. FILAGE DES MULTIFILAMENTS

Afin d'être représentatif des textiles synthétiques utilisés dans le marché des produits sportifs, cette thèse se concentre sur des textiles en polyester. Ce matériau polymère est le plus utilisé par l'industrie textile, comme évoqué dans le premier chapitre. Cette matière première plastique est sous forme de granulés de polyester avant de démarrer la chaîne de transformation textile. Afin de mettre en œuvre les chaînes de polymère, les granulés de polyester passent par le procédé de filage en voie fondue. Cette étape va permettre de transformer les granulés de polyester en multifilaments par fusion, étirages successifs, et texturation.

2.1.1.1. FILAGE VOIE FONDUE

La production de fils en polyester est un processus sophistiqué qui transforme des granulés de polymère thermoplastique en multifilaments, via le filage voie fondue illustré en Figure 26 (schéma adapté de la machine de filage de l'ENSAIT). Les granulés de polyester peuvent être utilisés tel quel ou mélangés avec des additifs si nécessaire, sans dépasser une certaine concentration massique. En l'occurrence, les additifs utilisés dans ce projet sont le dioxyde de titane TiO_2 et la teinture en masse via des noirs de carbone. Le dioxyde de titane TiO_2 joue sur l'opacité du fil, s'il est utilisé le fil devient opaque, sinon il demeure brillant. La teinture en masse permet de teindre le textile dès l'étape de filage voie fondue, ici en noir. Les granulés de polyester et les additifs sont introduits dans la machine de filage. Ils se mélangent harmonieusement par fusion, lors d'une montée en température progressive le long de la vis-sans-fin d'extrusion. Cette température est soigneusement contrôlée jusqu'à atteindre la température de fusion du polymère. Une fois que le polymère est entièrement fondu, une pompe génère une pression pour forcer le polymère fondu à passer à travers une filière. Elle est composée de multiples trous aux formes et diamètres précisément définis. A la sortie de la filière, la matière est sous forme de filaments individuels, elle est alors refroidie par un flux d'air. Les filaments s'étirent sous leur propre poids avant d'être rassemblés et alignés en un ensemble de filaments appelé multifilament. Un lubrifiant, nommé ensimage, est appliqué sur le multifilament pour faciliter le traitement ultérieur en limitant les frottements. Les filaments sont ensuite étirés sur deux rouleaux d'étirage chauffés et aux vitesses de rotation définies, jusqu'à atteindre la finesse définie pour le multifilament. Il est enfin enroulé sur une bobine, produisant un multifilament pré-orienté plat non-texturé (appelé pre-oriented yarn POY en anglais).

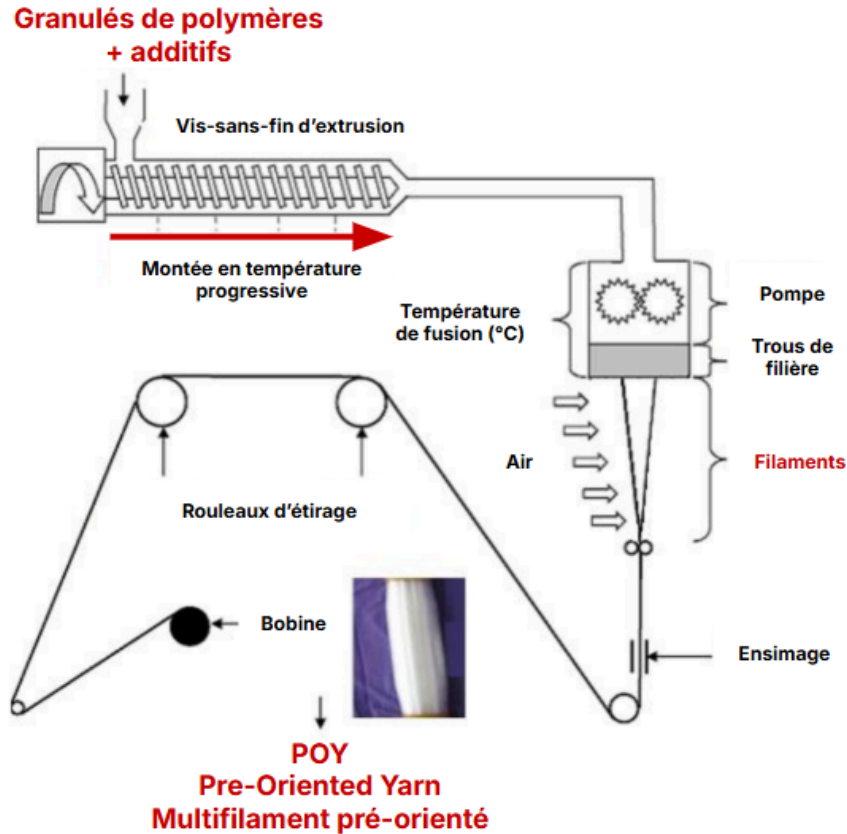


Figure 26 - Transformation des granulés de polymères et des additifs en multifilaments pré-orientés par fusion, pression, et étirage, adaptée de [44].

2.1.1.2. TEXTURATION

Le POY obtenu est un multifilament plat, ce qui signifie qu'il possède un toucher plastique. Afin de lui conférer un toucher plus délicat similaire aux matières naturelles, le POY est ensuite texturé via plusieurs sollicitations de chauffe, refroidissement, frictions, pour générer un multifilament étiré et texturé DTY (Drawn Textured Yarn). Le schéma adapté de OERLIKON en Figure 27 illustre le cheminement de ces sollicitations successives sur le polyester. Le POY est d'abord texturé par un processus de fausse torsion par friction avec une phase de chauffe suivie d'un refroidissement pour ajouter de l'ondulation aux filaments. Ensuite, le multifilament traverse le processus d'entremêlement par pulsion d'air comprimé. Il s'agit de former des points d'entremêlement réguliers entre les filaments appelés "nœuds". Plus l'entremêlement est élevé, plus il y a de nœuds par mètre le long du multifilament, plus il y a de cohésion entre les multifilaments. Enfin, le multifilament entremêlé peut passer à travers une dernière montée en température pour fixer ses propriétés. Cette dernière étape est optionnelle et vient compléter la fausse torsion en fausse torsion fixée. Grâce à l'entière de ce processus de texturation, le POY est transformé en multifilament texturé étiré (DTY).

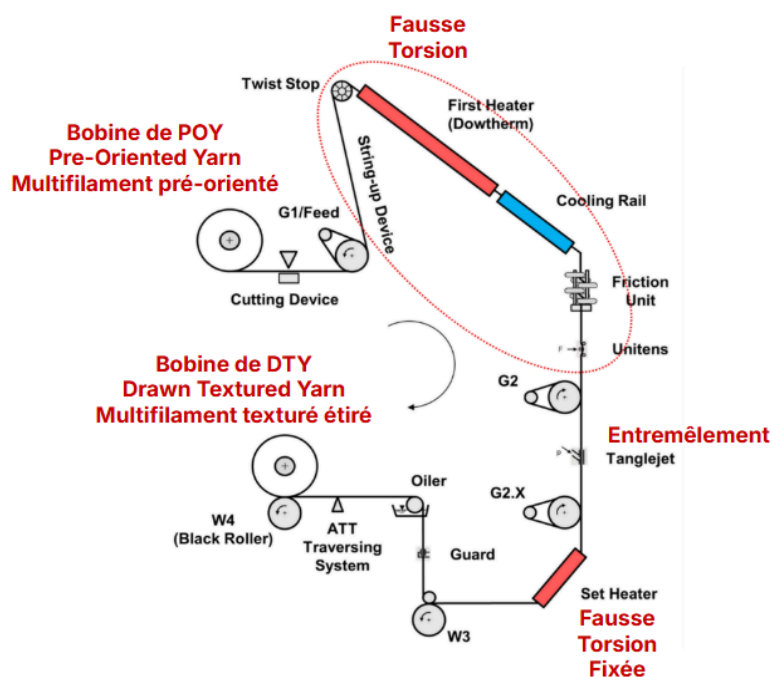


Figure 27 - Procédé de texturation des multifilaments pré-orientés POY en multifilaments texturés étirés DTY, par fausse torsion (fixée) et entremêlement, adaptée de OERLIKON®.

Les multifilaments peuvent ensuite être utilisés directement pour fabriquer des tissus et des tricots. Cependant, ils peuvent aussi être découpés en fibres de longueurs définies afin d'être filés selon les procédés de filature des matières naturelles comme le coton ou la laine. L'objectif est de se rapprocher encore plus d'un toucher similaire aux textiles obtenus à partir des matières naturelles.

2.1.2. FILATURE DES FILÉS DE FIBRES

Les propriétés des multifilaments continus sont transmises aux fibres courtes issues de la découpe. La matière qui compose les fibres est identique à celle du multifilament (dans cette étude, c'est donc du polyester). Dans le même esprit, la coloration des fibres est liée à la présence d'additifs de teinture en masse et/ou d'opacité, lors de la fonte du polymère avant le filage. La découpe des multifilaments définit la longueur des fibres souhaitée, en général comprise entre 30 et 50 mm. La finesse des fibres dépend de la taille de la filière par laquelle les filaments ont été fondus puis mis sous pression avant d'être étirés. La ténacité des fibres est définie par l'étirage des filaments en sortie du filage. Enfin, l'ondulation des fibres a été appliquée aux filaments lors de la texturation.

2.1.2.1. OUVERTURE DES FIBRES

Les fibres produites sont ensuite compactées dans des balles comme en Figure 28 a). L'ouverture des balles de fibres dans un compartiment ventilé en Figure 28 b) permet l'aération et le mélange de ces fibres avant de véritablement démarrer le procédé de filature par l'étape de cardage. Les balles de fibres du fournisseur BENMA ont été photographiées dans les ateliers de RIETER pour ce projet.

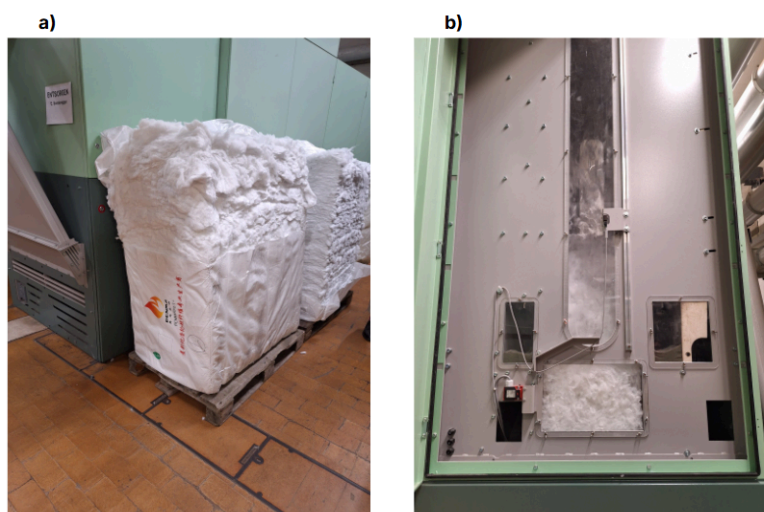


Figure 28 - Images des a) balles de fibres avant d'entrer dans le procédé de filature b) avec l'étape de ventilation et de mélange [RIETER].

2.1.2.2. CARDAGE

Une fois ouvertes et aérées, les fibres vont être mises en commun par une première cohésion, illustrée en Figure 29, qui a lieu dans une cardé. A l'entrée de cette cardé se trouvent les fibres courtes qui arrivent alignées en flux continu. Elles vont être insérées dans l'organisme de la cardé grâce à un premier cylindre délivreur avant de tourner autour du grand tambour. Lors de leur rotation, elles forment une nappe de fibres qui tourne à la vitesse du grand tambour. Celle-ci va se faire gratter par les aiguilles des cylindres travailleurs. Ces organes de grattage peuvent être plus ou moins agressifs en fonction de l'écart qui les sépare du grand tambour, et de leur vitesse de rotation comparée à celle de la nappe de fibres. Les garnitures d'aiguilles du grand tambour et des cylindres travailleurs sont multiples, elles dépendent de la matière cardée, une garniture spéciale polyester est utilisée. En fonction de ces réglages, une quantité de fibres trop courtes, contenant des impuretés, sont éliminées. En remarque, il est bon de noter que ces chutes sont plus considérables lors du cardage de matière naturelle, qui par leur essence ne sont pas homogènes en taille et en qualité. Dans le cas du polyester, les fibres sont déjà lisses et de tailles équivalentes.

En sortie de rotation du grand tambour se trouve le cylindre peigneur, qui va extraire le voile de fibres cardées, c'est-à-dire parallélisées. Une première cohésion est appliquée sur le voile par un système d'entonnoir et de compression à la sortie du peigneur. Le résultat final de cette opération de cardage est l'obtention d'un ruban de fibres en sortie de carde.

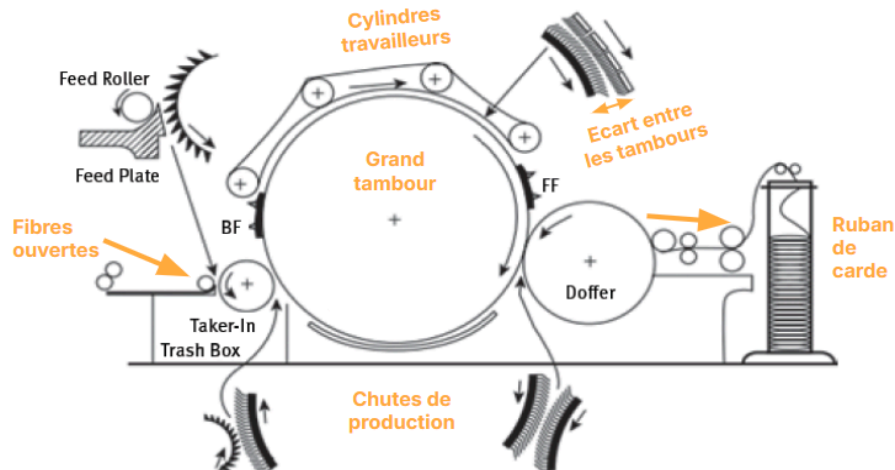


Figure 29 - Schéma du procédé de cardage.

2.1.2.3. DOUBLAGE ET ÉTIRAGE

L'opération de cardage continue jusqu'à obtenir plusieurs rubans. Ceux-ci vont ensuite rejoindre la machine suivante pour réaliser un doublage. Ce doublage ne nécessite pas forcément d'assembler deux rubans ensemble, mais plutôt plusieurs rubans entre eux. L'exemple observé dans une usine de production en Figure 30 a) assemble cinq rubans de cardes. Ils sont ensuite alignés en Figure 30 b) pour réussir à réduire la largeur du ruban commun en les compactant et en augmentant la vitesse pour créer un étirage (Figure 30 c)). L'opération de doublage-étirage peut être réalisée plusieurs fois pour obtenir les caractéristiques désirées du ruban. Ces photos sont réalisées dans les ateliers de RIETER.

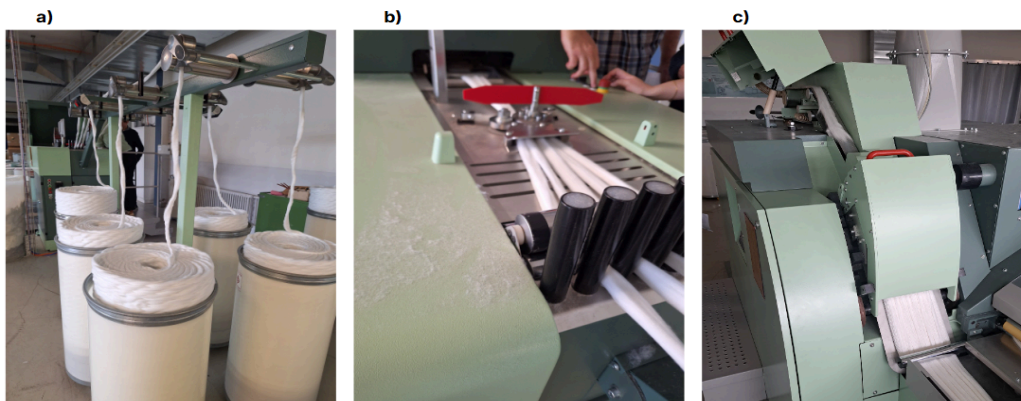


Figure 30 - Exemple d'un passage en doublage-étirage avec cinq rubans. [RIETER]

2.1.2.4. FILATURE NON-CONVENTIONNELLE

Au fur et à mesure des répétitions des passages en doublage et de l'étirage appliqués sur les rubans, ceux-ci deviennent de plus en plus fins et compacts. Deux types de fils spécifiques, bien que non-conventionnels, peuvent être fabriqués directement à partir de rubans : les filés de fibres open-end également nommés rotor, et les filés de fibres airjet aussi appelés vortex. Les terminologies open-end et airjet seront retenues pour ce manuscrit.

La Figure 31, adaptée des ressources pédagogiques de RIETER, décrit le procédé de filature open-end. L'avantage de ce procédé est que le ruban obtenu après un seul passage en doublage-étirage est suffisant pour initier la filature open-end. Celle-ci individualise les fibres rassemblées dans le ruban par abrasion le long d'une roue dentelée en Figure 31 a). Ces fibres entrent ensuite par aspiration avec beaucoup de vitesse dans le rotor. Par rotation contre la paroi du rotor les fibres vont retrouver de la cohésion en Figure 31 b). Dans l'axe l'aspiration des fibres est plus forte, cela guide les fibres en cohésion par enroulement dans cette direction afin de former un fil sur cet axe. Ce fil obtenu grâce au rotor est un fil open-end. La vitesse de rotation des fibres dans le rotor est un paramètre clé pour obtenir une forte productivité des machines, parfois au détriment d'un fil de qualité.

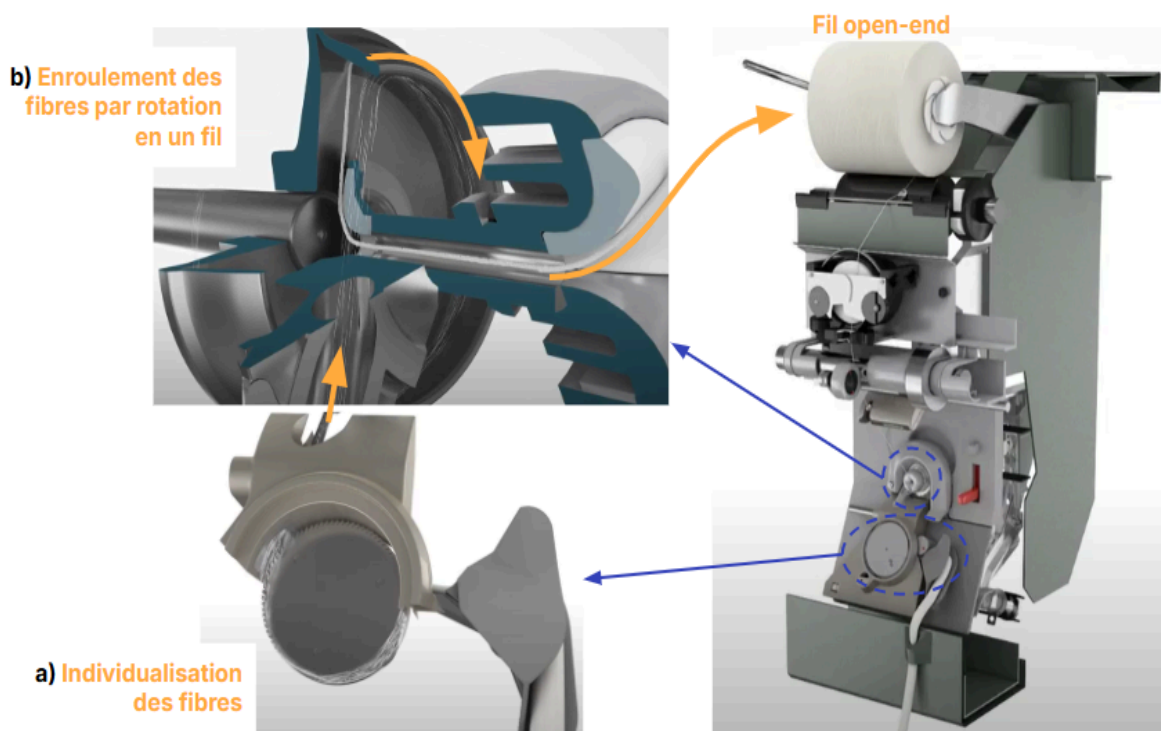


Figure 31 - Procédé de filature open-end, adaptée de RIETER.

La Figure 32, adaptée des ressources pédagogiques de RIETER, décrit le procédé de filature airjet. En général, deux à trois passages en doublage du ruban sont nécessaires avant d'initier la filature airjet. Celle-ci consiste à appliquer un dernier passage du ruban à travers quatre couples de rouleaux d'étirage au ruban en Figure 32 a) afin de lui appliquer une cohésion plus importante. Ensuite l'ensemble des fibres entre dans une buse dans laquelle se situent des jets d'air qui provoquent un tourbillon. Le cœur du ruban entre dans la buse en Figure 32 b), tandis que les extrémités des fibres à la surface du ruban subissent le tourbillon des jets d'air. Ce flux d'air va provoquer l'enroulement des fibres de surface autour du corps du ruban et ainsi renforcer l'ensemble en le transformant en un véritable fil. Les fils airjet sont souvent réputés pour être de meilleure qualité que les fils open-ends. D'abord grâce au doublage-étirage supplémentaire du ruban, et avec le système d'enroulement des fibres par le tourbillon d'air qui permet de diminuer la pilosité du filé de fibres.

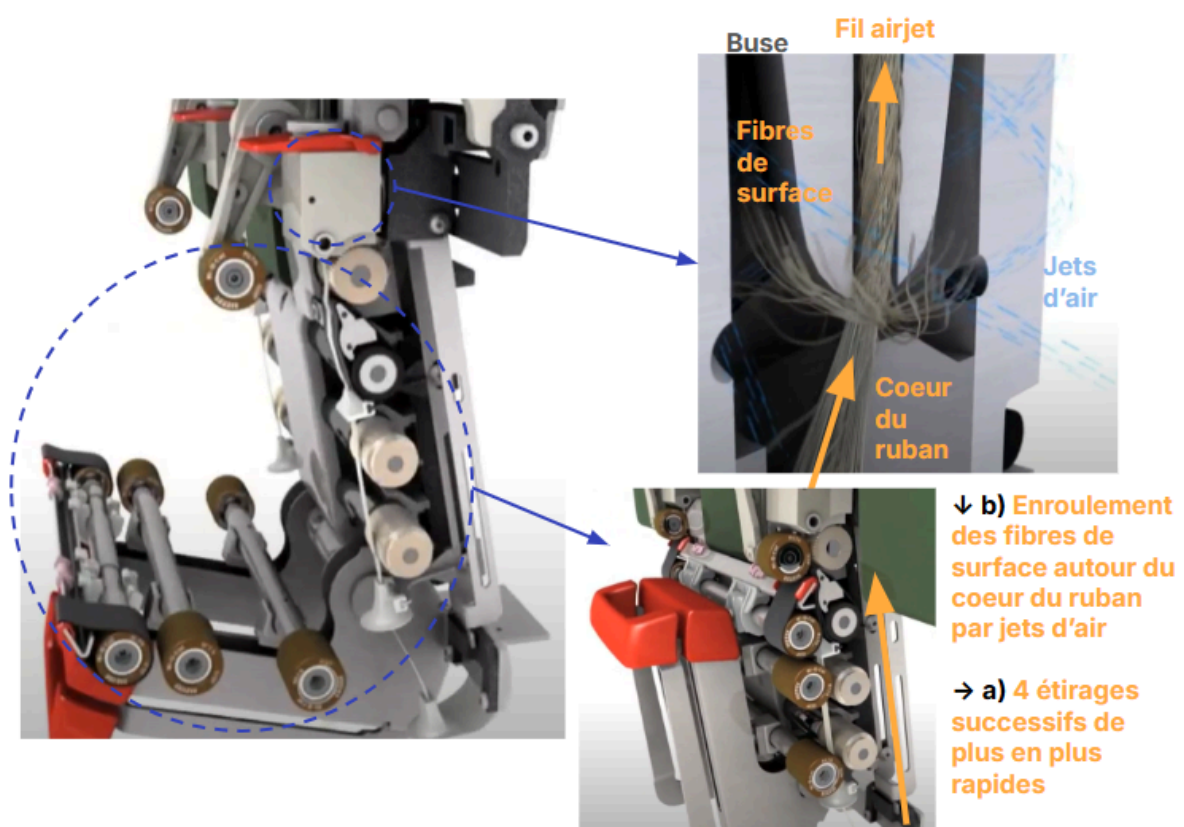


Figure 32 - Procédé de filature airjet, adaptée de RIETER.

2.1.2.5. FILATURE CONVENTIONNELLE

A l'inverse des filatures open-end et airjet, la filature dite conventionnelle ne permet pas au ruban d'entrer directement en filature. Une étape intermédiaire est nécessaire. En général, après deux passages effectués en doublage-étirage, le ruban obtenu est ensuite transformé en mèche sur un frotteur à manchons avec des étirements successifs. Autrement dit, cette machine permet au ruban de devenir une mèche encore plus fine avec des fibres davantage en cohésion grâce à plus de torsion. La mèche obtenue peut finalement être filée en procédé de filature ring (appelée aussi filature à anneaux), illustré en Figure 33, adaptée des ressources pédagogiques de RIETER. La filature ring permet à la mèche de devenir un fil par un nouvel étirage en Figure 33 a), et une rotation autour d'un anneau pour apporter la torsion finale au fil ring en Figure 33 b).

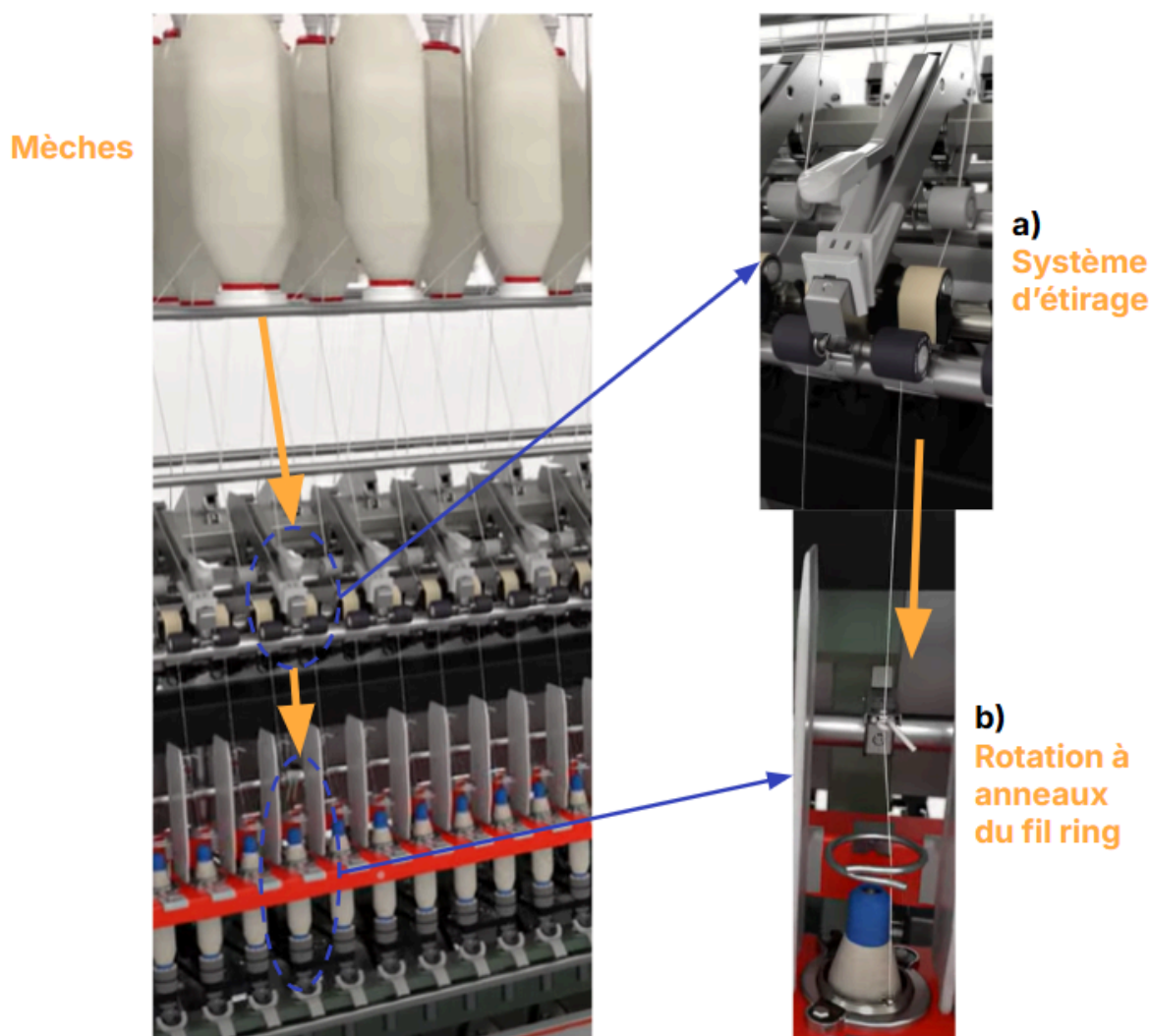


Figure 33 - Procédé de filature ring à anneaux, adaptée de RIETER.

Le procédé de filature ring, dite filature conventionnelle, peut utiliser trois variantes spécifiques, décrites en Figure 34 par (Jabbar et al., 2023) [67], pour améliorer sa pilosité et sa densité. En effet, à la sortie du système d'étirage, la torsion appliquée au futur fil ring démarre sur un regroupement de fibres en forme triangulaire. Ce triangle est d'une dimension assez large pour la filature ring. Dans le cas de la variante "compact", il est possible d'ajouter un module au système d'étirage pour diminuer la largeur de ce triangle en le rendant plus compact (comme son nom l'indique), et ainsi apporter plus de densité au fil. Dans le cas de la variante "siro", le système d'étirage est alimenté par deux mèches qui se rassemblent lors de la torsion en triangle. La pilosité est réduite par cette filature. Enfin, la combinaison des deux options donne un fil "siro-compact". Ce dernier est donc issu de deux mèches avec des triangles de torsion plus compacts pour combiner les propriétés de densité et de faible pilosité.

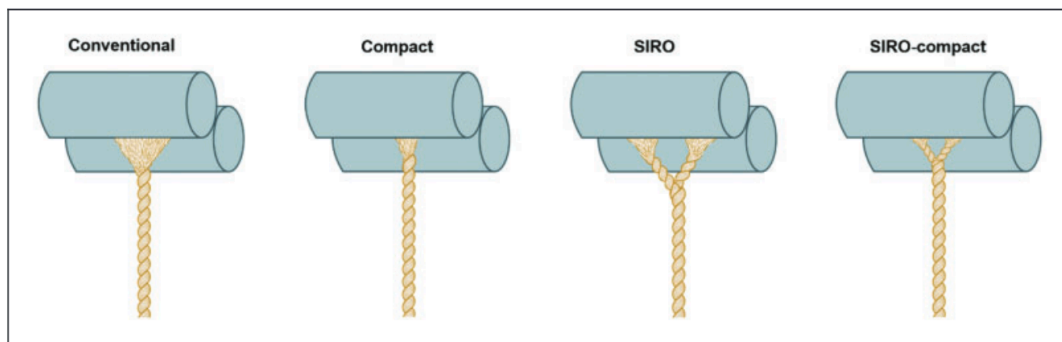


Figure 34 - Schéma de la torsion en sortie du système d'étirage de filature ring conventionnelle et ses options. [67]

En résumé, ces filatures ont toutes leurs avantages et leurs inconvénients. Les filatures non-conventionnelles comme l'open-end (rotor) et le airjet sont forcément plus économiques puisque les fils sont obtenus directement à partir des rubans, une étape de production est donc évitée. Cependant, la vitesse de production accrue du fil open-end lui confère des propriétés moins avantageuses que le airjet, notamment en termes de résistance mécanique et de pilosité, notamment visible en Figure 35 par (Pinlova et al., 2022) [65]. Bien que moins bon marché, la filature ring conventionnelle fait gage de qualité, avec une très bonne régularité et des propriétés mécaniques supérieures. Tous ces points forts peuvent encore être améliorés avec les variantes compact et siro.

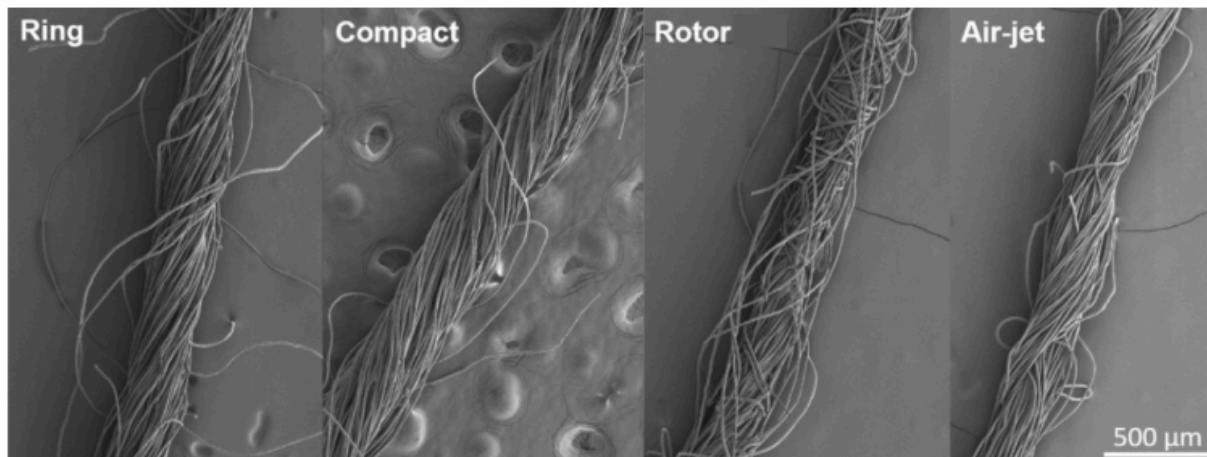


Figure 35 - Images MEB des fils obtenus par différents procédés de filature. [65]

Une fois le fil obtenu avec les différents procédés de filature, il est bobiné. Lors de cette étape, l'application d'une paraffine en surface du fil permet de le lubrifier pour diminuer les sollicitations de frottements dans les prochaines étapes de fabrication. Que ce soit les filés de fibres obtenus par le procédé de filature, ou les multifilaments par le filage, les fils vont ensuite être transformés en étoffes. Les procédés de tricotage ou de tissage permettent d'agencer ces fils ensemble pour passer d'une structure textile linéique à une surface textile plane avec une légère épaisseur. Cette dimension supplémentaire permet au textile de devenir une étoffe avec de nouvelles caractéristiques. Ces propriétés dépendent des paramètres utilisés lors des procédés de tricotage ou de tissage.

2.1.3. TRICOTAGE CIRCULAIRE ET INDÉMAILLABLE

Les étoffes issues du procédé de tricotage sont des tricots. Pour les former, les fils sont déroulés des bobines jusque dans les aiguilles du métier à tricoter. Ces aiguilles vont entrelacer les fils entre eux sous forme de boucles appelées mailles. A retenir qu'une aiguille correspond à une maille. Il existe deux types de tricotage, autrement dit deux façons d'entrelacer les fils en mailles.

- Dans un tricot en mailles cueillies (sens trame), appelé également tricotage circulaire, toutes les mailles d'une même rangée sont formées à partir du même fil. La flèche en Figure 36 a) représente cette rangée de mailles, et le fil tricoté passe dans chaque aiguille de cette rangée tricotée. Le fil est donc beaucoup sollicité par des frottements avec les aiguilles. Cette structure de tricot s'obtient avec des métiers à tricoter circulaires, comme celui présenté en Figure 37 a).

→ Dans un tricot en maille jetée (sens chaîne), aussi nommé tricotage indémaillable, toutes les mailles d'une même rangée sont formées à partir d'autant de fils qu'il y a d'aiguilles en travail. La flèche en Figure 36 b) représente la colonne de maille. Cette fois les fils tricotés alternent entre leur colonne et la colonne voisine pour former des mailles par entrelacement, ils ne suivent pas le sens des rangées de mailles. Cette structure de tricot se réalise sur les métiers à tricoter indémaillables, comme celui en Figure 37 b).

Dans ce manuscrit, les terminologies tricotage circulaire et tricotage indémaillable seront préférées pour faire référence à ces procédés.

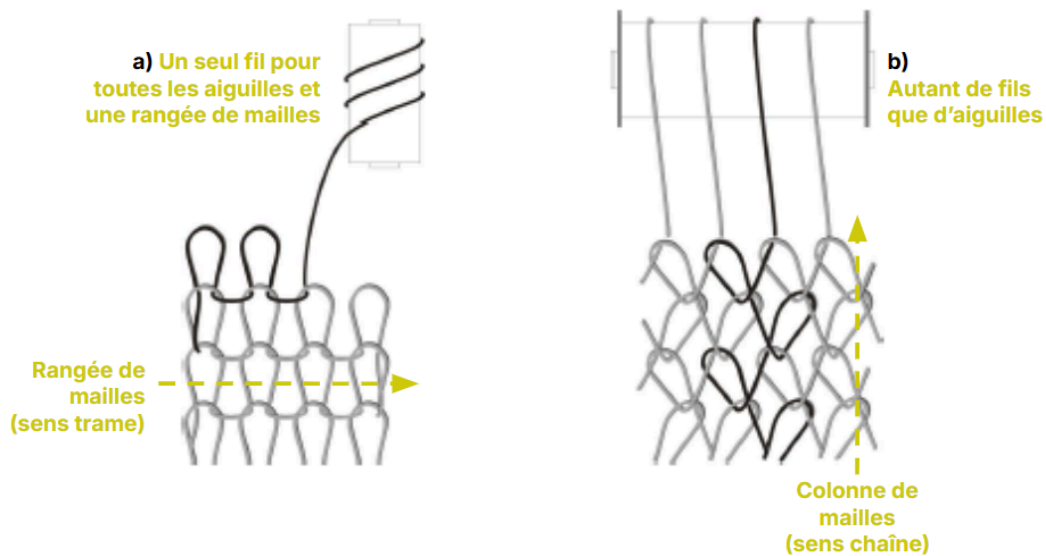


Figure 36 - Schémas de mailles en a) tricotage circulaire et b) indémaillable.

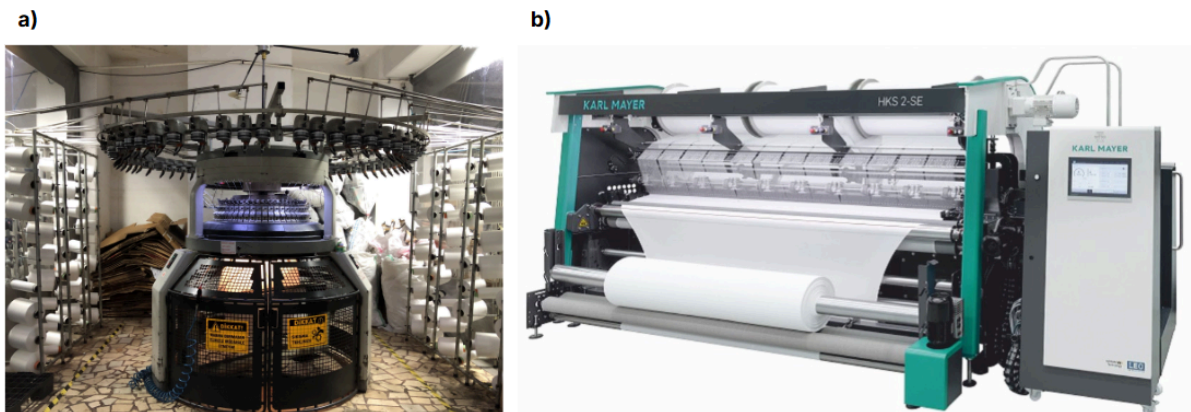


Figure 37 - Exemples de métiers à tricoter a) circulaire (MAYER&Cie) et b) indémaillable (KARL MAYER).

Bien que les principes de formation des mailles soient différents, les réglages qui font varier les propriétés des tricotés circulaires et indémaillables sont proches :

- Les paramètres propres aux machines comme le diamètre sont assez standard car liés à la laize, terme textile pour désigner la largeur du tricot.
- La jauge définit la finesse du tricot. Elle s'exprime en nombre d'aiguilles / pouces, autrement dit le nombre d'aiguilles sur le métier à tricoter tous les 2,54 cm. Plus la jauge est élevée, plus il y a d'aiguilles par pouce, donc plus le tricot est fin. A l'inverse, une jauge faible, signifie qu'il y a moins d'aiguille par pouce, et donc le tricot est plus épais. La jauge dépend avant tout de la finesse du fil, un fil fin permet une jauge élevée, alors qu'un fil épais va limiter la jauge.
- Ensuite la longueur de fil absorbé LFA qui compose une maille est variable, ce paramètre est souvent exprimé en cm de fil pour 100 mailles.
- De nombreuses tensions sont à prendre en compte. D'abord celle appliquée sur les fils pour les délivrer dans les aiguilles, mais également celle appliquée sur le tricot lors de son enroulement à la sortie du métier. Cette tension sur le tricot est appelée tirage. Il peut être appliqué plus fortement vers le bas du métier sur une machine de type Rachel, et moins fortement vers l'avant du métier sur une machine type Tricot.
- La vitesse de production est variable, elle définit la vitesse à laquelle les aiguilles assemblent les mailles, bien qu'intrinsèquement liée à la productivité.
- Les mailles peuvent s'entrelacer de différentes manières, cela donne des structures différentes, aussi appelées contextures ou schémas de maille, présentés en Tableau 2. Les machines peuvent posséder une ou deux fontures, c'est-à-dire une ou deux rangées d'aiguilles. Si elles en possèdent une, il s'agit de simple fonture pour que les aiguilles travaillent sur la face endroit du tricot. S'il y en a deux, ce sont des machines double fontures, avec des aiguilles en travail sur les faces endroit et envers du tricot. Ces aiguilles sont représentées par des croix ou des points, elles peuvent constituer une ligne d'aiguille (pour les structures jersey ou piqué) ou deux rangées d'aiguilles (pour les structures interlock ou côte 1x1). Cela dépend du nombre de fontures pour varier les entrelacements. Soit toutes les aiguilles attrapent des fils comme dans la structure jersey ou côte 1x1. Soit elles forment des charges comme dans le piqué, équivalent aux flottés dans les tissus. Ou bien certaines aiguilles ne sont pas desservies comme dans la structure interlock.

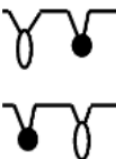
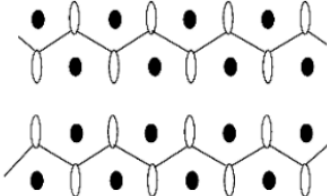
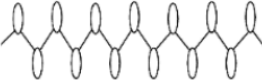
Simple fonture	JERSEY 	PIQUE 
Double fonture	INTERLOCK 	CÔTE 1X1 

Tableau 2 - Schémas des différentes contextures de mailles standards utilisées en tricotage circulaire.

→ Dans le procédé de tricotage indémaillable, chaque fil sur l'ensouple est associé à une barre guide pour l'entrelacement. Plus il y a de fils, plus il y a de barres guides, plus le tricotage indémaillable peut entreprendre des structures fantaisies. De manière générale et dans ces travaux, seules deux barres guides sont utilisées. Un exemple de schéma de mailles vertical nommé charmeuse est présenté dans le Tableau 3.

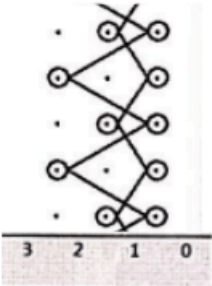
CHARMEUSE (Locknit)
Mouvement des barres guides 1) 1-0/2-3// : la barre guide numéro 1 emmène un fil de l'ensouple sur deux dans les aiguilles de la colonne de maille 1-0 à la colonne de maille 2-3 2) 1-2/1-0// : la barre guide numéro 2 emmène l'autre fil de l'ensouple dans les aiguilles de la colonne de maille 1-0 à la colonne de maille 2-3
Schéma de mailles associé : 

Tableau 3 - Schémas des différentes contextures de mailles standards utilisées en tricotage indémaillable.

De manière générale, les tricots sont réputés élastiques grâce à leur maillage, pourtant cette élasticité varie avec l'ensemble de ces paramètres. Ceux-ci seront discutés pour faire partie du plan d'expériences Taguchi sur le procédé de tricotage. En comparaison du tricotage, le tissage permet de réaliser des étoffes plus denses.

2.1.4. TISSAGE

Les étoffes issues du procédé de tissage sont des tissus. Les propriétés et l'aspect du tissu sont déterminés par son armure. Il existe trois armures fondamentales présentées en Figure 38 : les toiles, les sergés, et les satins. Ces armures sont constituées par l'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame. Les fils de chaîne (représentés en noir dans les schémas) s'étendent sur toute la longueur du tissu, tandis que les fils de trame (représentés en bleus dans les schémas) s'entrecroisent régulièrement avec les fils de chaîne pour construire l'armure désirée, par un mouvement d'allers-retours sur la largeur du métier à tisser. En l'occurrence, la toile permet au fil de trame de s'entrecroiser à chaque passage du fil de chaîne, tandis que le satin réalise des flottés en laissant passer plus de fils de chaîne avant de s'entrecroiser. La famille des sergés se situe à l'intermédiaire.



Figure 38 - Schémas des armures fondamentales de tissage.

Afin de parvenir à réaliser de telles armures sur les métiers à tisser, il est nécessaire de suivre plusieurs étapes de préparation pour les fils de chaîne. La première est l'ourdissage représenté en Figure 39 a). Cette étape permet de dérouler les bobines de fils pour les rassembler sur une même ensouple avec un écart défini. Cet écart détermine la densité chaîne du tissu, en effet plus il y a de fils sur l'ensouple, plus la densité de fil de chaîne par centimètre augmente. Ces fils de chaînes passent ensuite dans le procédé d'encollage en Figure 39 b). Cette étape consiste en l'application d'une résine qui joue le rôle de lubrifiant pour les protéger des frottements ultérieurs et accroître leur résistance en tension afin d'éviter les casses de fils sur le métier à tisser.

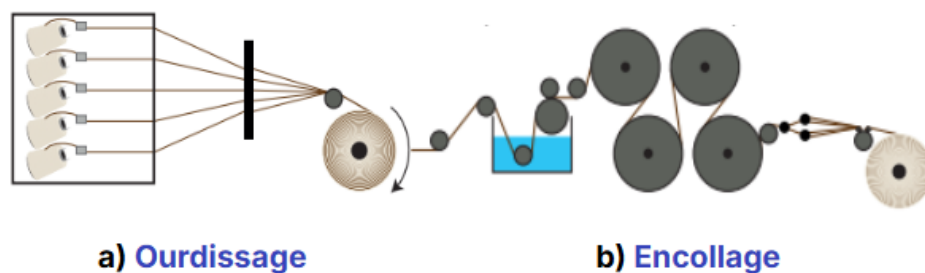


Figure 39 - Étapes de préparation des fils de chaîne au tissage avec a) l'ourdissage et b) l'encollage.

Les fils de chaîne sont maintenant prêts pour être insérés sur le métier à tisser de la Figure 40 via l'étape de rentrage. Chaque fil de chaîne traverse une lisse qui est reliée au cadre du métier à tisser. En fonction de l'armure désirée, certains cadres montent, d'autres descendent, et le fil de trame s'insère au milieu. Ces montées et descentes de cadre se répètent pour construire l'armure du tissu. Après chaque passage du fil de trame, le peigne vient rabattre le fil de trame inséré sur l'armure du tissu en construction pour assurer la densité trame désirée. Le tissu obtenu est ensuite enroulé sur un rouleau à la sortie du métier à tisser.

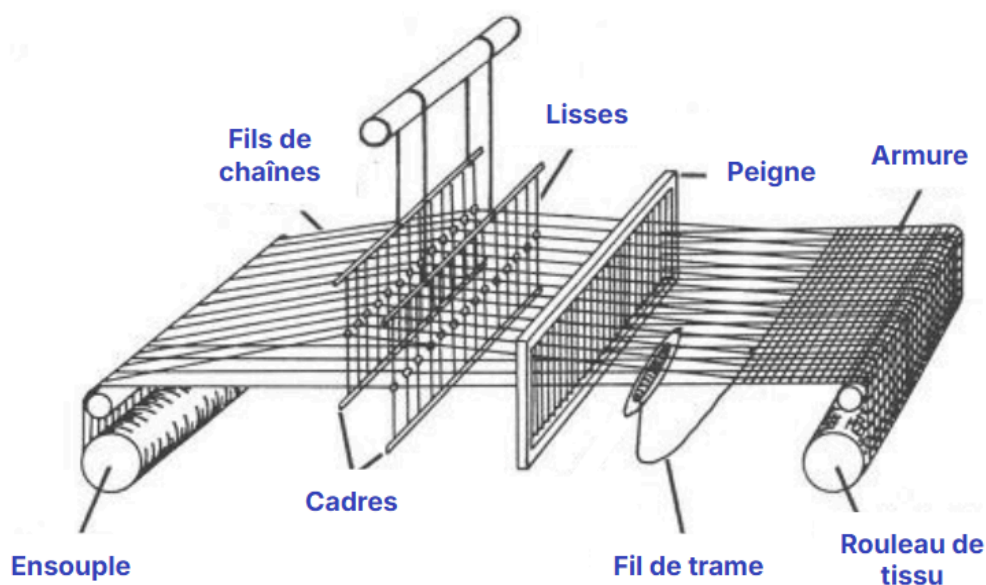


Figure 40 - Construction de l'armure de tissage sur le métier à tisser.

Finalement, de nombreux paramètres peuvent influencer les caractéristiques des tissus. A commencer par les paramètres d'encollage, les densités chaîne et trame, le type d'armure réalisé, ainsi que la vitesse de tissage. Le tissu réalisé passe enfin à l'étape de désencollage. Plusieurs bains successifs vont permettre d'enlever l'encollage appliqué précédemment sur les fils de chaîne afin de ne pas perturber les procédés d'ennoblissement à venir comme la teinture.

2.1.5. ENNOBLISSEMENT

Avant d'entrer dans la cuve de teinture, les rouleaux de tissus et de tricotés sont déroulés pour passer dans les chambres de chauffe du stenter. Cette succession de chambres chauffées (souvent au nombre de 5 à 10) est assimilable à des fours. Cette montée en température permet de préparer le textile à la teinture, c'est la thermofixation du polyester. Généralement elle se déroule à la vitesse d'une douzaine de mètres par minute, variable en fonction du nombre de chambres.

Plusieurs types de machines peuvent être utilisées pour réaliser la teinture d'une étoffe. La catégorie des machines de teinture jet, photographiée chez le fournisseur ETM-SAMPAIO en Figure 41, est retenue pour cette thèse. C'est une teinture standard dans laquelle l'étoffe circule dans le bain de la cuve par des mouvements alternatifs. Une fois le textile inséré dans la cuve de teinture, l'eau est ajoutée pour démarrer la montée en température jusqu'à atteindre les 130°C dans le cas du polyester. Un colorant dispersé noir de DECATHLON (DKTN07A) est utilisé selon un rapport de bain défini. La vitesse de la pompe qui fait circuler l'eau dans la cuve ainsi que la vitesse de rotation du textile dans la cuve sont également des paramètres à définir. Cette température est maintenue pendant 40 à 60 minutes avant de redescendre à température ambiante. Un rinçage est ensuite effectué avant de sortir le textile noir de la cuve de teinture. Ces étapes faisant intervenir de l'eau, on parle également de traitement en voie humide pour les définir.

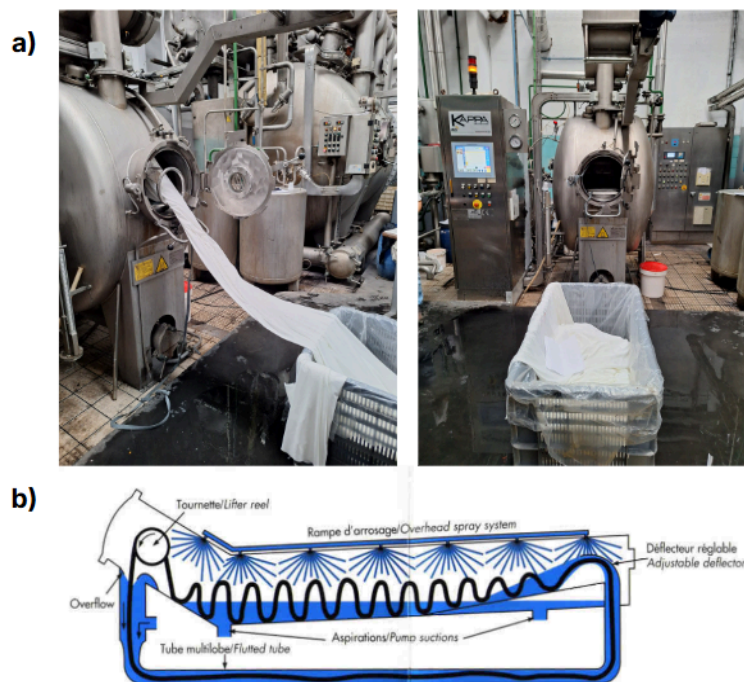


Figure 41 - Machines de teinture jet a) baby jet (SAMPAIO-ETM) et b) jet overflow.

A la sortie de la cuve de teinture, l'étoffe repasse dans les chambres du stenter pour l'étape de séchage, illustrée en Figure 42 (SANTEX RIMAR GROUP).

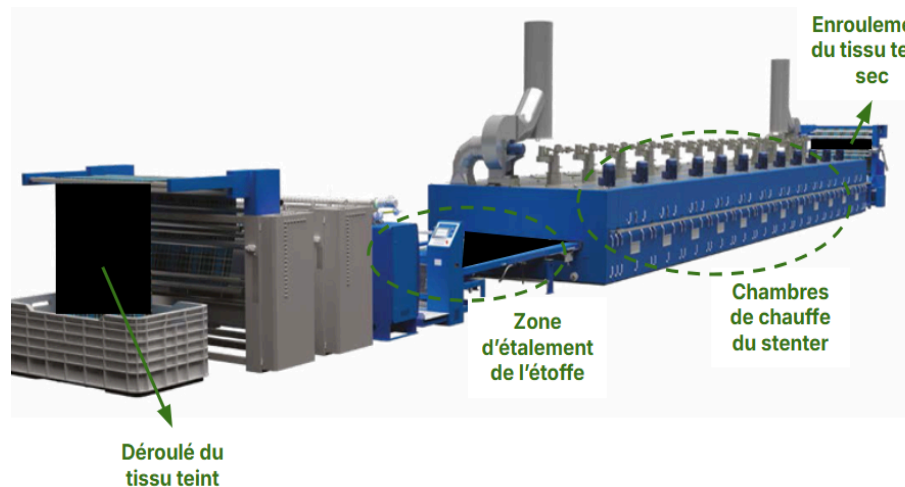


Figure 42 - Chambres de chauffe d'un stenter.

Les tissus et tricotés sont ainsi ennoblis et sont prêts à rejoindre la confection pour être assemblés en vêtements, à moins que des traitements de surface soient appliqués pour ajouter d'autres propriétés aux étoffes.

2.1.6. TRAITEMENT DE SURFACE

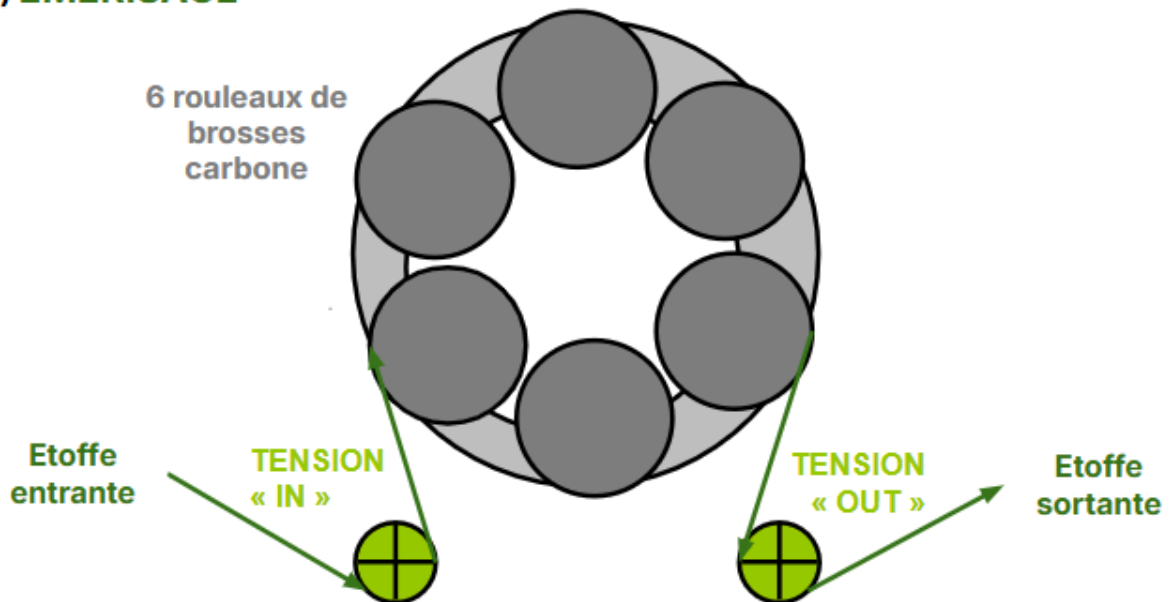
Le polyester présente une surface naturellement hydrophobe, c'est-à-dire qu'elle repousse l'eau, et reste relativement inerte. Pour améliorer ses performances et lui conférer de nouvelles fonctionnalités, divers traitements de surface peuvent être appliqués. Ces traitements sont classés en deux catégories : les finitions mécaniques et chimiques.

2.1.6.1. FINITIONS MÉCANIQUES

Les traitements de finitions mécaniques modifient la surface du textile sans altérer sa composition chimique profonde. Ils visent principalement à modifier la texture, l'aspect visuel ou les propriétés d'isolation thermique. Elles s'obtiennent par abrasion des fibres en surface. Sur une surface en polyester, il existe notamment deux intensités d'abrasion avec l'émerisage (faible abrasion) et le grattage (forte abrasion). Le procédé d'émerisage, présenté en Figure 43 a), fait passer le textile à la surface d'un grand tambour composé de six rouleaux en brosses de carbone. Par rotation, ces brosses viennent abraiser le textile et générer un duvet en surface. Selon le même principe, le procédé de grattage décrit en Figure 43 b) utilise un nombre plus importants de rouleaux garnis d'aiguilles métalliques plus abrasives pour le textile. La quantité de duvet généré en surface est ainsi plus conséquente qu'avec l'émerisage.

Dans les deux procédés, plusieurs réglages peuvent influencer le niveau d'abrasion comme la garniture et la vitesse de rotation des rouleaux, les tensions appliquées sur l'étoffe en entrée et en sortie de la machine. Pour modifier encore l'abrasion de surface, il est possible de réaliser plusieurs passages successifs autour des rouleaux, et de réaliser un passage d'abrasion sur la face avant du textile, puis sur l'envers.

a) ÉMERISAGE



b) GRATTAGE

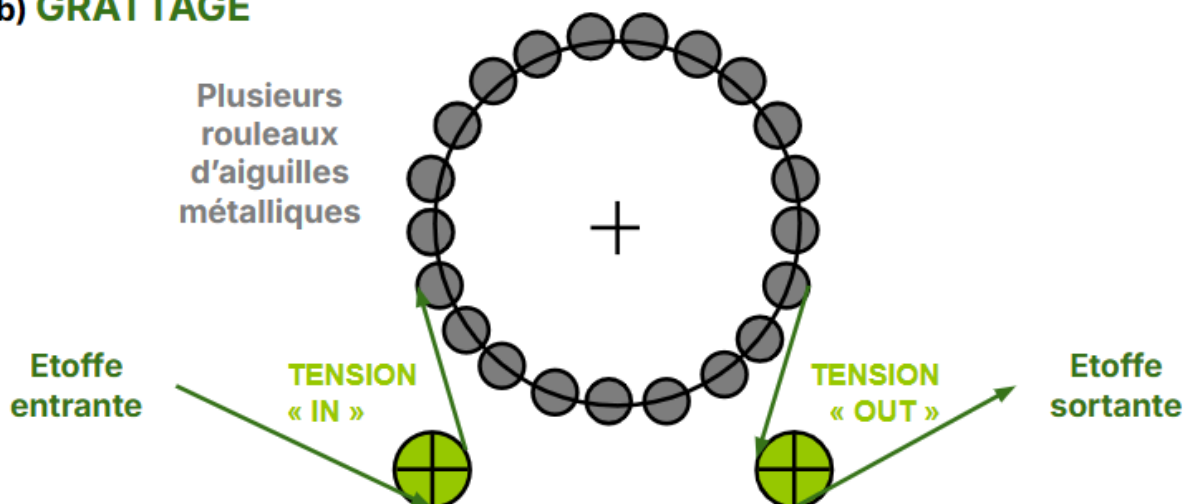


Figure 43 - Procédés a) d'émerisage en brosse carbone et b) de grattage en rouleaux d'aiguilles métalliques.

A l'issue du grattage, d'autres procédés de finitions mécaniques peuvent compléter l'abrasion de surface, à commencer par le peignage. Un peigne va passer dans le duvet généré par le grattage à la surface du textile afin de relever les fibres de surface. Cette opération est suivie du procédé de rasage lors duquel, le duvet peigné va être rasé à une hauteur uniforme afin d'avoir une abrasion de surface homogène. Il est également possible de réaliser un lavage en machine tumbler pour améliorer le toucher du duvet de surface sur les textiles grattés. Cela permet également d'éliminer les FFMP qui n'ont pas pu être collectés par aspiration lors du grattage et qui ne sont plus en contact avec l'étoffe.

2.1.6.2. FINITIONS CHIMIQUES

D'autres propriétés peuvent être appliquées sur le textile grâce aux traitements de finitions chimiques. Ils impliquent l'utilisation de substances chimiques pour modifier les propriétés de surface du polyester, lui conférant de nouvelles fonctionnalités. Il s'agit par exemple d'apporter des propriétés de déperlance pour permettre au textile de ne pas absorber l'eau (la goutte d'eau roule à la surface du textile). Plus généralement, cette finition est considérée comme un apprêt hydrophobe. Un autre traitement chimique fréquent permet la gestion de la transpiration du corps en l'absorbant pour la diffuser et permettre un séchage plus rapide. Cette finition favorise la respirabilité du textile grâce à un apprêt hydrophile. Il existe aussi des traitements chimiques anti-abrasion, anti-bactérien, anti-jaunissement, anti-statique, entre autres. Tous ces traitements s'appliquent le plus souvent par foulardage, illustré en Figure 44. Le foulardage est une méthode par imprégnation qui permet à l'étoffe de circuler dans un bain d'eau et du produit chimique à appliquer. A la sortie du bain, l'étoffe traitée passe entre deux cylindres exprimeurs qui la compriment et retirent le liquide en excès. Une alternative au foulardage est possible directement par vaporisation en spray du produit chimique. Dans les deux cas, un dernier passage au stenter fait office de séchage.

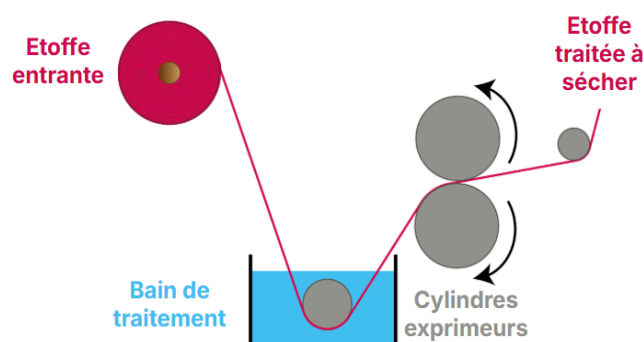


Figure 44 - Procédé de foulardage pour appliquer les traitements chimiques.

Maintenant que les finitions mécaniques et chimiques ont été appliquées à la surface des différentes étoffes, la fin de la chaîne de transformation textile est atteinte. Afin de comprendre l'influence de chacun des procédés textiles définis dans cette partie sur le relargage de FFMP, du filage jusqu'aux finitions, plusieurs plans d'expériences sont définis selon la méthode Taguchi.

2.2. MISE EN PLACE DE PLANS D'EXPÉRIENCES TAGUCHI

Dans cette thèse, l'ensemble des procédés textiles décrits jusqu'ici sont étudiés. Afin de comprendre l'influence de chaque procédé sur la fragmentation des fibres au premier lavage, la méthodologie utilisée dans ce projet de thèse remonte la chaîne de transformation textile en étudiant chacun des procédés textiles individuellement. Pour mener ces études centrées sur chaque procédé, la méthodologie utilisée est identique. Elle respecte les 5 étapes suivantes décrites en Figure 45 :

1. Définir les facteurs du procédé étudié influençant le relargage de FFMP.
2. Construire une matrice de plan d'expérience Taguchi composée de ces différents facteurs.
3. Produire les échantillons textiles dans le respect des facteurs étudiés.
4. Collecter les échantillons et les tester au laboratoire selon la simulation du premier lavage standardisé pour quantifier les émissions de FFMP.
5. Analyser les résultats de relargage et définir les corrélations avec les facteurs étudiés.



Figure 45 - Méthodologie en 5 étapes pour chaque procédé textile étudié.

2.2.1. INTRODUCTION AUX PLANS D'EXPÉRIENCES TAGUCHI

La méthodologie des plans d'expériences Taguchi a été mise au point par le Dr Genichi Taguchi. Il a mis au point la méthode qui porte son nom et qui permet de maîtriser la qualité des produits ou d'optimiser l'efficacité d'un procédé dès la conception. Cette méthode est particulièrement adaptée aux applications industrielles, où il est nécessaire d'optimiser les performances et de réduire les frais sans nécessiter des expérimentations conséquentes en délais et en coûts. Certains chercheurs ont déjà expérimenté la méthode Taguchi dans le domaine textile [80] et notamment pour le thème de la fragmentation des fibres [71]. Dans cette thèse, l'utilisation des plans d'expériences Taguchi a pour objectif de définir les paramètres de chaque procédé textile permettant de minimiser les générations de FFMP au premier lavage.

2.2.2. PRINCIPE DE TAGUCHI

La méthode Taguchi consiste à fixer son étude à un nombre de paramètres précis, appelés facteurs. Ces facteurs varient entre différentes valeurs, appelées niveaux. Cette méthode consiste à dresser une matrice d'essais, en fonction du nombre de facteurs étudiés. Ces essais sont effectués par la suite pour déterminer l'influence de chaque facteur indépendamment des autres. Par exemple, si l'étude se porte sur 6 facteurs pouvant varier entre 3 valeurs différentes, cela représenterait une étude se portant sur $3^6 = 729$ essais au total. La méthode Taguchi permet de réaliser seulement 27 essais parmi ces 729. Ces 27 essais sont cruciaux pour déterminer l'influence de chacun des facteurs en fonction de leurs niveaux. Il est ensuite possible d'utiliser les valeurs de chaque niveau pour calculer l'impact des 702 combinaisons non-testées. Cette méthode permet donc de réduire drastiquement le nombre d'essais à effectuer, entraînant ainsi des gains de temps et d'argent. Cependant, il est primordial que chaque essai soit scrupuleusement respecté, sous peine de fausser la totalité des résultats. En effet, la force de Taguchi découle de ce nombre d'essais restreints qui ne peuvent pas permettre la moindre variation de l'un des facteurs. Étant donné qu'ils sont tous interdépendants, un résultat qui serait faux car l'un des facteurs n'est pas bon entraînerait l'invalidité de la totalité du plan d'expériences. A noter également que la robustesse de cette méthode repose dans sa capacité à minimiser la variabilité du système, via la mesure du rapport signal sur bruit (S/B), autrement dit des phénomènes externes qui pourraient interférer sur le système étudié.

⁸⁰ Oguz et Akarslan, 2022

2.2.3. ÉTAPES CLÉS DE LA MÉTHODE TAGUCHI

Concrètement, la construction des plans d'expériences Taguchi suit les étapes suivantes :

A. Définition du problème et des objectifs :

Clarifier la caractéristique de qualité à améliorer (la "réponse de sortie" du système). Ici il s'agit de minimiser les rejets de FFMP dans chacun des procédés textiles. Dans ce projet la valeur minimale à obtenir s'exprime en mg de FFMP émis par kg de textile lavé selon la simulation de lavage standardisé TMC en laboratoire.

B. Identification des facteurs et de leurs niveaux :

La conception du plan d'expériences Taguchi se poursuit avec l'identification d'une liste de paramètres à étudier, appelés facteurs, dans chaque procédé textile. Pour chacun des procédés textiles étudiés, un groupe de travail a été rassemblé afin de définir les facteurs à étudier. Ces groupes de travail ont rassemblé les membres du projet, des experts de chaque procédé basé à l'entreprise et au laboratoire, et également des fournisseurs industriels spécialistes de chaque procédé, alors externes au projet devenus partenaires. Ces facteurs sont ensuite hiérarchisés et catégorisés en différents niveaux pour construire la table de Taguchi. Afin de réaliser cette classification des facteurs pour minimiser le relargage de FFMP dans chaque procédé textile, le groupe de travail se base sur :

- **Les données issues de la littérature** : Intégration des résultats des revues de littérature et des études citées dans l'état de l'art du premier chapitre, qui mettent en évidence les grandes tendances de conception textile liées au rejet de FFMP.
- **Une investigation scientifique** : Répondre à la nécessité de comprendre les phénomènes qui amplifient les mécanismes de formation de FFMP avec des experts scientifiques du domaine textile.
- **Des contraintes industrielles** : Prise en compte des limitations pratiques imposées par les contraintes techniques de l'industriel, temporelles des lignes de production, et financières inhérentes au projet.
- **Du marché textile** : Intégration de l'état actuel du marché de l'industrie textile, aligné avec les objectifs stratégiques et les volumes de production de l'entreprise.

Concrètement, lors de l'étude du procédé de tissage, un facteur intéressant à étudier semble être de faire varier plusieurs armures de tissage, autrement dit la façon dont les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent. En effet, il est possible d'étudier une armure toile, une armure sergé, ou encore une armure satin. Le facteur armure est ainsi défini selon trois niveaux (toile, sergé, satin).

C. Sélection de la table orthogonale (aussi appelée matrice) :

D'un point de vue mathématique, la conception des plans d'expériences Taguchi est basée sur des tables orthogonales qui définissent le nombre d'essais à réaliser. Ces tableaux peuvent être suivis de graphiques en ligne et d'un triangle d'interaction pour visualiser les effets de chaque facteur étudié sur la réponse de sortie, soit la quantité de FFMP.

- En fonction du nombre de facteurs sélectionnés à l'étape précédente et de leurs niveaux, on choisit le tableau orthogonal de Taguchi le plus approprié (par exemple, L4, L8, L9, L16, etc.). Ces tableaux garantissent une exploration efficace de l'espace des facteurs avec un minimum d'essais. Sachant que plus le chiffre est élevé, plus il y a d'essais à réaliser, ainsi une table L4 nécessitera 4 essais tandis que la table L9 nécessitera 9 essais. Ce nombre d'essais est retranscrit par le nombre de lignes qui composent le plan d'expériences.
- Le nombre de colonnes est défini par le nombre de facteurs étudiés, y compris les interactions possibles à deux facteurs (c'est-à-dire les effets combinés). Lors de l'utilisation d'une table L8 2^7 comme dans le Tableau 4 de (Pillet, 2011) [81], sept colonnes sont à remplir, cela nécessite donc l'étude de 7 facteurs à 2 niveaux.
- À chaque intersection d'une ligne et d'une colonne, un chiffre spécifie le niveau du facteur dans l'expérience. Dans le cas de la L8, les 7 facteurs ont deux niveaux. Sur chaque ligne on retrouve le chiffre 1 ou 2 pour indiquer si le facteur étudié est au premier ou deuxième niveau dans l'expérience de la ligne en question.

⁸¹ Pillet, 2011

N°	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tableau 4 - Exemple d'une table de Taguchi L8 2⁷. [81]

D. Réalisation des expériences :

Une fois la table sélectionnée avec l'intégration de tous les facteurs et leurs niveaux à étudier, il est nécessaire de vérifier la faisabilité de chaque ligne, autrement dit de chaque essai. En effet, même si tous les niveaux de chaque facteur ont été choisis scrupuleusement, ils sont réalisables de manière indépendante, mais il est nécessaire de vérifier si la combinaison des niveaux des facteurs d'une même ligne va aboutir à un résultat. Dans le cas de la minimisation des FFMP, il s'agit de vérifier que chaque textile obtenu par les différents niveaux étudiés est bien réalisable, notamment afin d'éviter des casses en production. A noter que si une ligne expérimentale n'aboutit pas à un résultat, c'est tout le plan d'expérience qui n'est pas exploitable. Maintenant que la vérification ligne par ligne de la table des essais est effectuée, il est temps de lancer les expérimentations.

- Réaliser chaque ligne expérimentale de la matrice Taguchi, peu importe l'ordre tant que l'essai respecte le niveau des facteurs. Concrètement, il s'agit de fabriquer chaque textile en respectant son cahier des charges, c'est-à-dire les combinaisons des niveaux des facteurs qui le composent.
- Mesurer la caractéristique de qualité pour chaque essai. Dans le cas de l'étude, il s'agit de réaliser le premier lavage standardisé pour chaque textile obtenu afin de quantifier les FFMP émis.

E. Analyse des résultats :

Les résultats individuels de chaque essai sont obtenus. Ils sont comparés à la moyenne du plan d'expériences incluant les résultats de tous les essais. L'objectif est de définir quel textile fait augmenter la moyenne et quel autre échantillon permet de la diminuer. Cette augmentation ou diminution se fait également par facteur pour définir l'effet du facteur sur la

réponse de sortie. Autrement dit, tel facteur augmente les émissions de FFMP car il est constamment au-dessus de la moyenne. A l'inverse, un facteur peut aussi être en dessous de la moyenne de manière récurrente et donc diminuer le relargage de FFMP. Enfin, un facteur peut être neutre car toujours proche de la moyenne et donc ne pas avoir d'influence sur la génération de FFMP. En reprenant l'exemple du tissage, il est possible de dire laquelle de l'armure toile, sergé, ou satin, se situe en dessous de la moyenne des relargages de tous les tissus, et permet donc de minimiser le relargage de FFMP. Il est également envisageable de faire la même analyse en comparant l'effet du facteur "armure de tissage" aux autres colonnes de la table Taguchi, par exemple au facteur "vitesse de production". Il s'agit de dire si le facteur d'armure de tissage a plus d'effet sur la moyenne du plan comparé à la vitesse de production. Ces analyses permettent de classer les effets des facteurs afin de déterminer leur importance sur la réponse de sortie, ici les émissions de FFMP. D'autres indicateurs statistiques peuvent également être considérés :

- Analyse de la moyenne et du rapport signal sur bruit S/B : pour définir séparément l'influence de chaque facteur sur la moyenne de la réponse (pour atteindre la valeur cible) et sur le ratio S/B (pour réduire la variabilité).
- Interprétation de l'écart-type : utile pour déterminer la signification statistique de l'influence de chaque facteur sur la réponse moyenne et le ratio S/B.
- Validation des effets des facteurs influents : l'analyse permet de déterminer quels facteurs sont les plus importants et quels niveaux de ces facteurs permettent d'atteindre la valeur cible de relargage minimum tout en minimisant la variabilité.

F. Optimisation et confirmation :

En sélectionnant le "meilleur" niveau de chaque facteur, il est possible d'atteindre la réponse de sortie optimale, autrement dit le relargage minimum. Cette combinaison correspond rarement à un des essais véritablement effectués dans la table. Le plus souvent il s'agit d'une combinaison non-réalisée qu'il est important de tester pour confirmer la simulation. La validation du plan d'expériences se déroule donc en deux étapes :

- Prédiction : Sur la base des résultats de l'analyse, on prédit la performance du système avec les niveaux des facteurs optimaux.

- Essai de confirmation : Il est important de réaliser un essai de confirmation avec la combinaison de facteurs jugée optimale pour valider les prédictions et s'assurer que l'amélioration est réelle et stable.

2.2.4. SYNTHÈSE

La méthode des plans d'expériences Taguchi possède de nombreux avantages déjà illustrés précédemment comme son efficacité, sa robustesse, sa rentabilité, ou encore sa capacité à réaliser une conception préventive. En revanche, quelques inconvénients sont tout de même à souligner dans le Tableau 5, comme la maîtrise totale des essais, le manque de liberté dans la construction des tables, ou encore la linéarité des résultats qui masque les interactions.

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
<u>Efficacité :</u> Réduction du nombre d'essais	<u>Cahier des charges :</u> Aucune erreur autorisée dans la réalisation des essais, respect total des combinaisons de niveaux
<u>Robustesse :</u> Réduction de la variabilité	<u>Liberté :</u> Restriction des facteurs/niveaux par le choix des tables
<u>Rentabilité :</u> Réduction des coûts par optimisation	<u>Lisibilité :</u> La linéarité des résultats empêchent de déceler les interactions entre les facteurs
<u>Conception préventive :</u> Prise en compte des facteurs en conception plutôt qu'à la fin de la chaîne	

Tableau 5 - Avantages et inconvénients de la méthode Taguchi.

En résumé, la méthodologie Taguchi donne une méthode structurée et statistiquement efficace pour concevoir des produits de qualité ou optimiser des procédés performants.

2.3. PROTOCOLE DE DÉVELOPPEMENT DES ÉCHANTILLONS TEXTILES

Maintenant que la méthodologie des plans d'expériences Taguchi est maîtrisée, il est temps de l'appliquer aux procédés textiles étudiés. Les différents facteurs, niveaux, et tables seront explicités dans le chapitre 3 pour l'étude des multifilaments en filage voie fondue et dans le chapitre 4 pour les procédés de filature, tricotage, tissage, et traitements de finitions. Cependant, il est bon de rappeler que chaque procédé est tour à tour au cœur du dispositif Taguchi. Quand c'est le cas, les paramètres du procédé étudié sont variables tandis que le reste de la chaîne de transformation reste fixe. Cette partie définit le cadre de l'étude de chaque procédé en distinguant les facteurs variables des facteurs fixes, déterminés par les groupes de travail de chaque procédé.

2.3.1. FILAGE ET TEXTURATION

Dans le premier plan d'expériences, c'est l'étape de fabrication des multifilaments qui est au centre du dispositif Taguchi. La Figure 46 nous indique alors que les facteurs variables sont situés dans les étapes de fabrication des multifilaments (type de polymères, filage voie fondue, et texturation). Ces facteurs vont donc varier selon leurs niveaux pour constituer la matrice Taguchi. Une fois cette dernière construite, la liste des essais est obtenue et les multifilaments aux compositions variées selon les combinaisons de niveaux sont produits. Cependant, la chaîne de transformation textile continue. En effet, avant le premier lavage du textile, les multifilaments doivent encore traverser d'autres procédés pour devenir des étoffes commercialisables. Il est donc important de les tricoter tous de la même manière, pour ne pas avoir de variation dû à cette étape. De même que leurs traitements de finitions en ennoblissement doivent être identiques. Ces procédés auront forcément un impact sur la réponse de sortie pour quantifier les FFMP. Néanmoins cet impact sera le même pour tous les échantillons étant donné que les procédés appliqués sont similaires. Ainsi, seuls les effets des facteurs des multifilaments sur le relargage de FFMP seront analysés. Le fournisseur espagnol de multifilaments ANTEX a été intégré aux discussions internes au projet de thèse DECATHLON-GEMTEX pour définir les paramètres industriels à étudier dans ce plan d'expériences. Ils ont ensuite produit les multifilaments sur une machine pilote de filage, puis texturé les multifilaments sur une ligne de production industrielle. Le tricoteur portugais SAMPAIO a finalement réceptionné les multifilaments pour les tricoter et les ennoblir de manière identique avec ses machines industrielles.

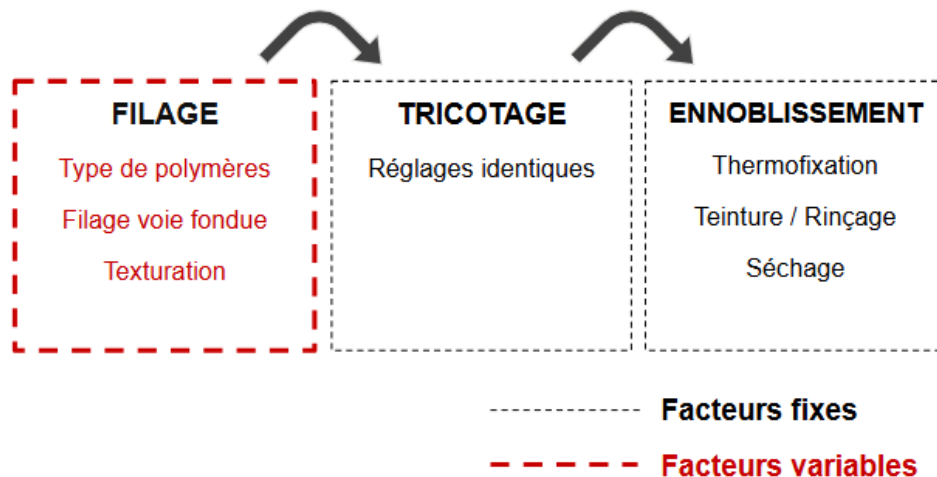


Figure 46 - Protocole simplifié du plan d'expériences centré sur la fabrication des multifilaments.

2.3.2. FILATURE

Le même principe est appliqué pour l'étude centrée sur la filature en Figure 47. Les paramètres de filature à étudier ont été définis en collaboration avec le fabricant suisse de machine de filature RIETER. Les filés de fibres sont issus du plan d'expériences Taguchi à partir de plusieurs types de fibres, de réglages de cardage variés, et de différents procédés de filature. Huit balles de fibres aux caractéristiques différentes ont été fournies par le fabricant chinois BENMA. Elles ont ensuite été transformées en filés de fibres variés sur les machines pilotes industrielles du centre de conception RIETER. Ensuite, SAMPAIO s'est à nouveau chargé de tricoter et d'ennoblir les filés de fibres de la même manière afin d'observer uniquement l'effet de la filature sur le relargage de FFMP.

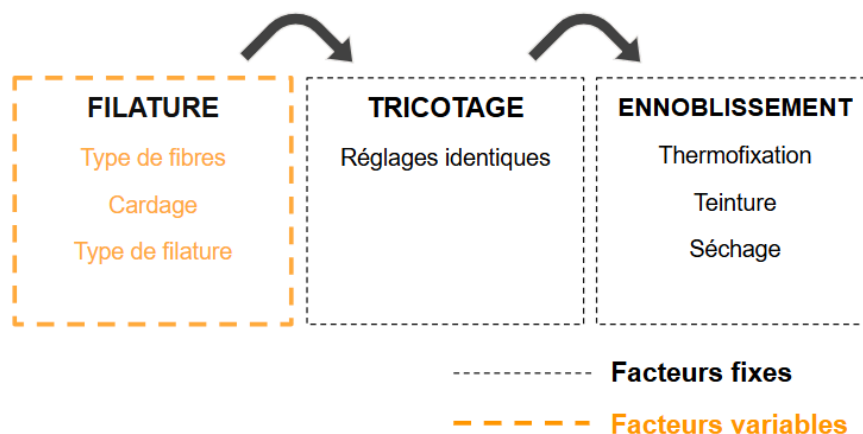


Figure 47 - Protocole simplifié du plan d'expériences centré sur la fabrication des filés de fibres.

2.3.3. TRICOTAGE ET TISSAGE

Dans cette partie, les procédés de fabrication du fil sont relégués au second plan au détriment du tricotage et du tissage. Cela signifie que toutes les étoffes de ces deux plans d'expériences vont être constituées d'un même fil aux caractéristiques connues et fixes. Ce fil est un multifilament en polyester en adéquation avec le type de fil le plus utilisé sur le marché textile. La méthode Taguchi est appliquée à la fabrication des étoffes en Figure 48, le tricotage ou le tissage deviennent alors centraux dans la chaîne de transformation textile. Les facteurs variables étudiés lors de la fabrication des différents tricots sont les structures de tricotage, les tensions appliquées, et les vitesses de production. Pour le tissage, la logique est identique avec les armures, les densités, et la vitesse de production comme facteur variable. Une fois les tricots et tissus produits, la chaîne de fabrication textile redevient fixe avec un protocole d'ennoblissement identique appliqués sur les différentes étoffes. Ainsi, les effets des facteurs des fils utilisés et des traitements de finitions appliqués sont masqués. Seuls les facteurs variables étudiés lors du tricotage ou du tissage seront analysés au regard des émissions de FFMP au premier lavage. A noter que le tisserand belge CONCORDIA et le tricoteur chinois DEJUN sont intervenus dans le tour de table pour définir les paramètres de tissage et de tricotage à étudier. De plus, ils ont permis de réaliser les tissus et les tricots sur leurs lignes de production textile.

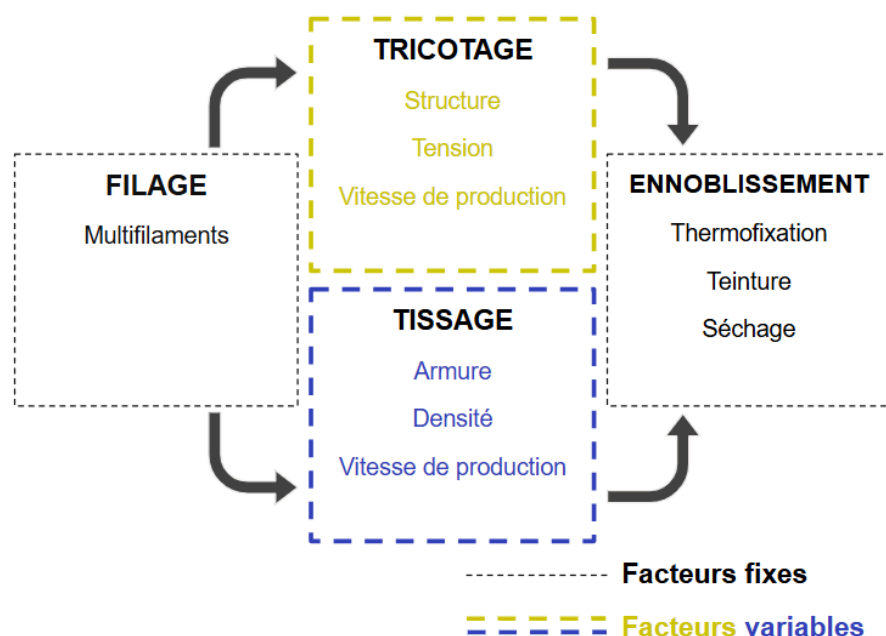


Figure 48 - Protocole simplifié des plans d'expériences centré sur la fabrication des étoffes tricotées et tissées.

2.3.4. TRAITEMENTS DE FINITIONS

Afin de se concentrer sur les derniers procédés de la chaîne de transformation textile en Figure 49, les premières étapes sont fixes. Le même multifilament est utilisé pour constituer un tricot interlock de caractéristiques standards. L'ennoblissement utilisé sur ces tricots est toujours similaire. Le dernier plan d'expériences concerne les finitions, autrement dit les traitements de surface appliqués sur les textiles. Les tricots étudiés offrent plus de possibilités avec différentes finitions mécaniques et chimiques. L'effet de ces différentes finitions sur le relargage vont donc être étudiés. Pour ce plan d'expériences, c'est le fournisseur chinois MINGZHOU qui est à l'origine de la fabrication des tricots sur leurs lignes de production industrielles.

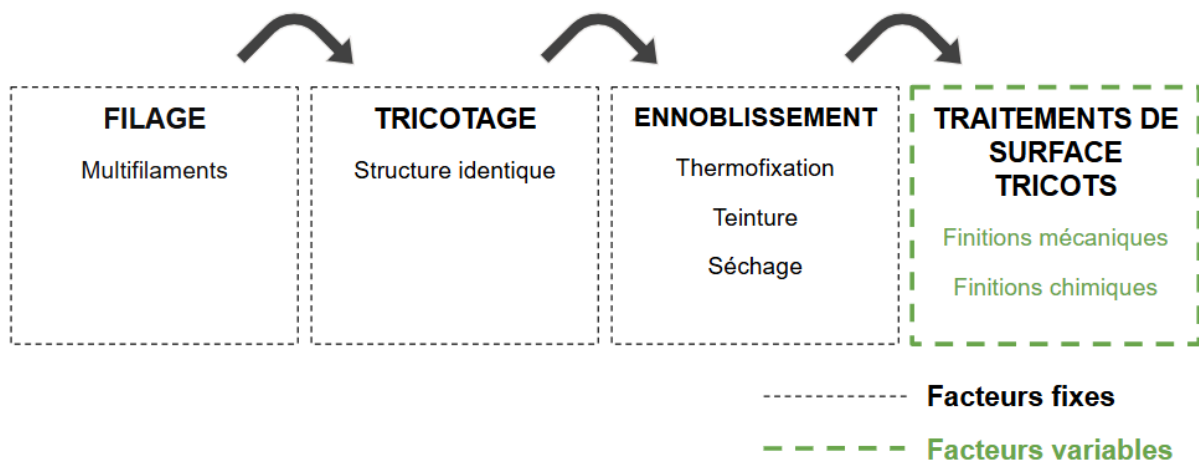


Figure 49 - Protocole simplifié des plans d'expériences centré sur les traitements de surface.

D'abord la chaîne de transformation textile est donc étudiée procédé par procédé dans les chapitres 3 et 4 selon les protocoles développés ci-dessus. Dans un second temps, une prise de recul est effectuée au chapitre 5 pour replacer chaque paramètre étudié dans l'ensemble de la chaîne de transformation textile et non plus simplement au sein de son procédé. Les liens entre chacun des plans d'expériences permettront de comprendre l'influence des combinaisons des paramètres des procédés textiles sur le relargage de FFMP. Cette quantification des FFMP s'effectue au premier lavage grâce à une simulation standardisée selon la méthode TMC.

2.4. SIMULATION DU PREMIER LAVAGE

Afin de quantifier les fragments de fibres microplastiques libérés par les étoffes, la méthode d'essai TMC 1.1 a été utilisée (TMC Test Method 1.1, 2021) [25]. Cette méthode a été développée par The Microfibre Consortium, l'Université de Leeds et l'European Outdoor Group. L'essai en laboratoire vise à quantifier la perte de fibres des tissus lors d'une simulation de lavage domestique. Cette méthode suit les étapes suivantes illustrées en Figure 50 :

1. **Préparation des échantillons** : Huit échantillons de dimensions 150x290mm sont découpés dans la surface textile, avec une équité en sens chaîne et en sens trame. Leurs bords sont ensuite cousus sur eux-même avec un ourlet. Cette couture permet de diminuer considérablement le relargage venu des bords des éprouvettes suite à leur découpe et donc à leur fragilisation sur cette zone. Les fibres collectées lors de cette simulation de lavage viendront donc largement de la surface des textiles directement. Cette couture est réalisée sur les quatre côtés de l'échantillon jusqu'à atteindre des dimensions de $100\pm 10\text{mm} \times 240\pm 10\text{mm}$.
2. **Simulation du lavage** : Les échantillons sont lavés dans des conditions standardisées, reproduisant les paramètres d'un lavage domestique (température de l'eau, durée du cycle, agitation) mais sans détergent. Des machines spécifiques, comme le James Heal RotaWash, sont utilisées pour assurer la reproductibilité des lavages. Des contenants en acier sont remplis avec 360 ml d'eau distillée et 50 billes en acier. Ils sont ensuite introduits dans l'appareil de lavage pendant 10 minutes pour un préchauffage à 40°C. Après 10 minutes, les contenants sont brièvement enlevés pour y introduire les échantillons textiles, le cycle de lavage est lancé pour 45 minutes.
3. **Filtration de l'effluent** : A la fin des 45 minutes, l'eau de lavage est ensuite filtrée à travers des filtres d'une taille de pores de 1,6 μm . L'eau de lavage de chaque contenant est filtrée pour collecter tous les FFMP.
4. **Séchage et pesée des filtres** : Les filtres contenant les FFMP sont séchés dans des conditions de température et d'humidité contrôlées. Ils sont ensuite pesés avec une balance de précision de quatre décimales. La masse de FFMP est mesurée pour les huit échantillons, le relargage final du textile est la moyenne des huit échantillons testés.



Figure 50 - Étapes de la simulation de lavage standardisé selon la méthode TMC pour quantifier le relargage de FFMP.

Ce relargage s'exprime alors en mg de FFMP collectés par kg de textile lavé (mg/kg) autrement appelé pourcentage de libération. Après séchage, la libération des fibres est exprimée en pourcentage par la perte en masse, à partir de l'équation suivante :

$$\text{Perte en masse (\%)} = (Fm2 - Fm1) \times 100 / Sm$$

Fm1 = masse (en grammes) du filtre avant le test,

Fm2 = masse (en grammes) du filtre après le test

Sm = masse (en grammes) de l'échantillon textile avant le test.

Dans cette étude, ce résultat en pourcentage est converti en mg de fibres microplastiques par kg d'échantillon textile lavé pour exprimer le relargage en mg/kg (soit en ppm). A noter qu'un lavage à blanc a été réalisé pour constater qu'il n'y a pas d'impuretés sur les filtres qui viendraient augmenter la masse avec des pollutions extérieures. Par la suite, cette méthode de test de lavage standardisé TMC est appliquée à l'ensemble des échantillons textiles développés dans chacun des procédés textiles étudiés. Cinq mètres de chaque référence de textile développé dans cette thèse est envoyée au laboratoire INTERTEK FRANCE, accrédité par TMC et partenaire du projet, pour mener tous les essais des différents plans d'expériences. Chaque essai est réalisé sur huit éprouvettes selon cette méthode de test. En fonction des textiles, les résultats ont donné lieu à plus ou moins de variabilité quantifiée par des coefficients de variation CV% allant de 3% à 33%. Le relargage étant mesuré par de très petites masses, les CV% sont considérés comme faibles jusqu'à 10%, modérés ensuite, et élevés au-delà de 25%.

Ce test quantitatif est la réponse de sortie à minimiser avec la méthode des plans d'expériences Taguchi. D'autres essais de caractérisation textiles peuvent également être réalisés pour compléter la compréhension de la fragmentation des fibres microplastiques.

2.5. CARACTÉRISATIONS TEXTILES COMPLÉMENTAIRES

Les essais de caractérisation textile complémentaires abordés dans cette thèse vont permettre d'étudier les corrélations entre le relargage de FFMP au premier lavage et les propriétés des textiles à plusieurs échelles.

2.5.1. À L'ÉCHELLE DES FILS

2.5.1.1. TRACTION

La méthode de test de traction d'un fil de polyester est essentielle pour comprendre ses propriétés mécaniques. Le test de traction vise à déterminer la résistance mécanique et l'allongement à la rupture d'un fil. Les caractéristiques mesurées sont illustrées en Figure 51, il s'agit de :

- La force à la rupture (en cN) : La force maximale que le fil peut supporter avant de se rompre.
- L'allongement à la rupture (en %) : La déformation maximale que le fil subit avant de se rompre.
- Le module d'élasticité (module de Young) : Une mesure de la rigidité du fil, c'est-à-dire sa résistance à la déformation élastique, correspondant à l'angle formé entre la courbe de traction et l'axe des ordonnées.
- La ténacité (en cN/dTex) : Le ratio de la force à la rupture (cN) en fonction de la finesse du fil (dTex).
- L'énergie à la rupture : L'énergie absorbée par le fil avant la rupture, indiquée par l'aire sous la courbe.

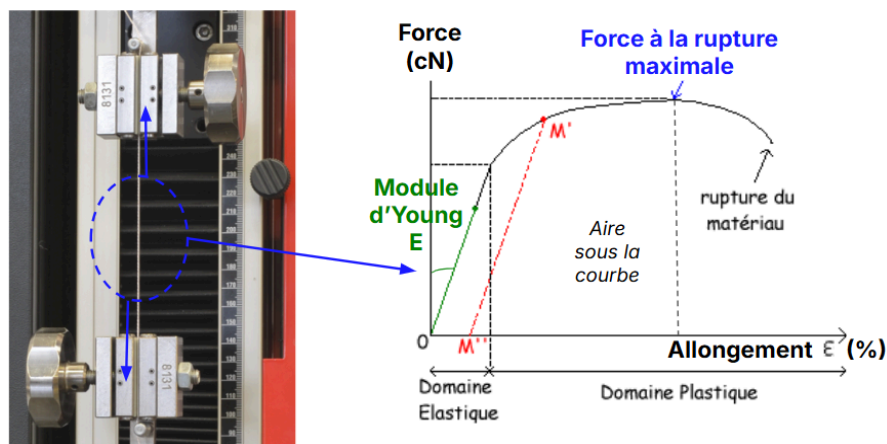


Figure 51 - Banc de traction pour fil (ZWICK ROELL) avec courbe de traction.

2.5.1.2. ABRASION FIL-FIL

Le "Staff-Tester G 556" présenté en Figure 52 est un équipement spécifique de la marque ZWEIGLE, conçu pour évaluer la résistance à l'abrasion des filés de fibres. Cette machine met en œuvre des frottements entre un filé de fibres et lui-même, ou bien entre un filé de fibres et des organes métalliques ou céramiques. Dans cette étude, c'est le comportement à l'abrasion du filé de fibres sur lui-même qui est mesuré. Pour cela une quantité de fil précise est dévidée (10g ou 1000m) afin de le frotter contre lui-même. Ce frottement émet des fragments hors de la structure linéique du fil qui sont collectés et pesés. La perte en masse de matière abrasée en mg est ainsi obtenue après avoir dévidé 10g ou 1000m de fil contre ce même fil.

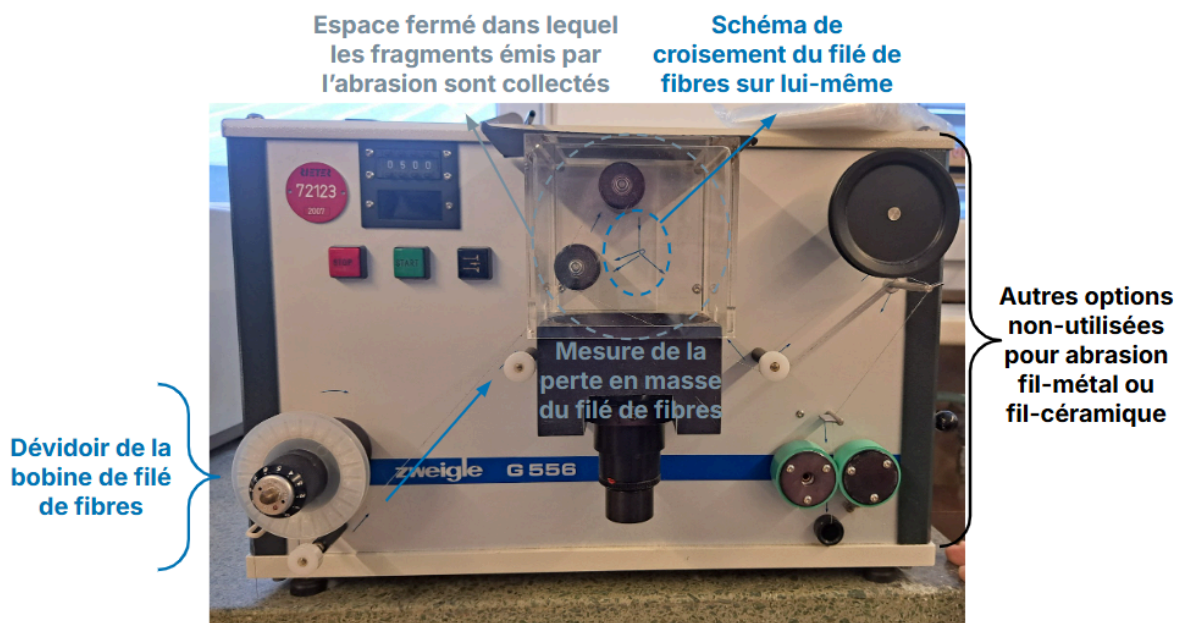


Figure 52 - Schéma de fonctionnement du Staff Tester G556 (ZWEIGLE) pour mesurer l'abrasion fil/fil. [RIETER]

2.5.1.3. TENSION

La tension des filés de fibres a été mesurée via le montage expérimental décrit en Figure 53. La bobine du filé de fibres a été placée sur le cantre pour être déroulée en passant d'abord entre 2 coupelles rappelées l'une contre l'autre par un ressort taré, puis en slalom autour des 3 cylindres de tension, et enfin dans un Uster Tester pour mesurer sa régularité en pilosité. Le capteur de tension (en cN) est relié à un logiciel d'exploitation du signal des fréquences.

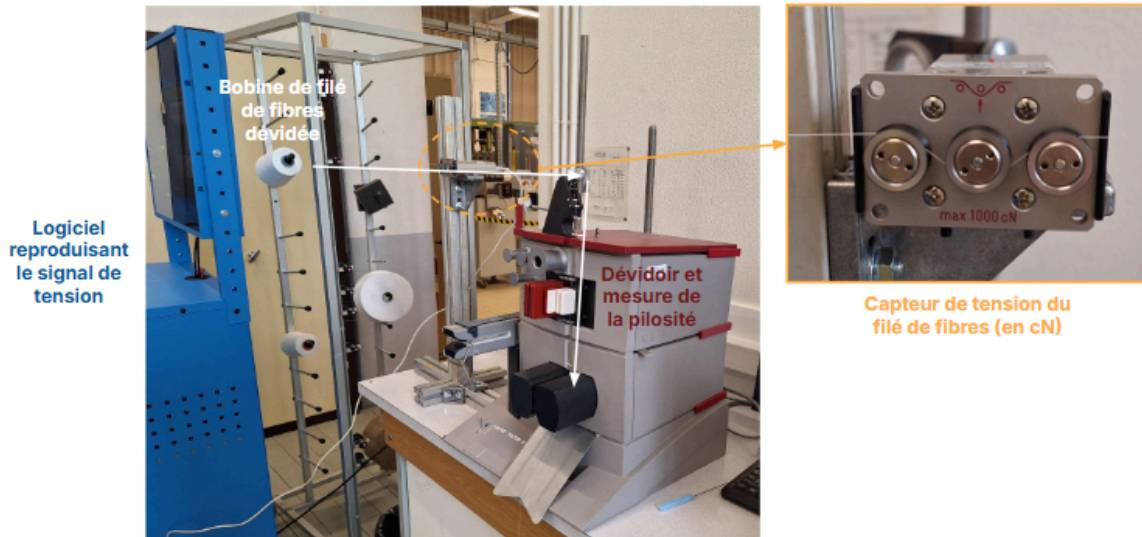


Figure 53 - Montage expérimental de mesure de tension des filés de fibres (USTER).

2.5.2. À L'ÉCHELLE DES ÉTOFFES

2.5.2.1. ABRASION

Contrairement au ZWEIGLE Staff-Tester G 556 qui se concentre sur les fils, le test d'abrasion sur l'appareil Martindale illustré en Figure 54 s'applique à la surface des étoffes. Cette caractérisation simule l'usure des étoffes due au frottement au contact d'un abrasant (généralement un tissu en laine standard). Des échantillons circulaires d'étoffe à tester sont découpés. Chaque échantillon est monté sur un support et frotté contre l'abrasant sous une pression définie (9 kPa). Le mouvement de frottement est un mouvement oscillatoire complexe, suivant la figure de Lissajous, qui assure que toutes les directions de l'étoffe sont soumises à l'abrasion. Le test compte le nombre de cycles de frottement. Un cycle d'abrasion complet correspond à la réalisation d'un mouvement d'abrasion. L'évaluation de la résistance à l'abrasion peut se faire de plusieurs manières, selon la partie de la **norme ISO 12947** utilisée.

- Soit par détermination de la rupture de l'échantillon (**ISO 12947-2** : le test est arrêté lorsqu'un trou se forme dans l'étoffe, le nombre de cycles à ce moment est enregistré).
- Sinon par détermination de la perte de masse (**ISO 12947-3** : l'échantillon est pesé avant et après un nombre défini de cycles d'abrasion, et la perte de masse est mesurée).
- Ou bien par évaluation visuelle d'un changement d'aspect de la surface (**ISO 12947-4** : pour noter l'apparition de boulochage, de feutrage ou d'autres altérations de surface après un certain nombre de cycles).

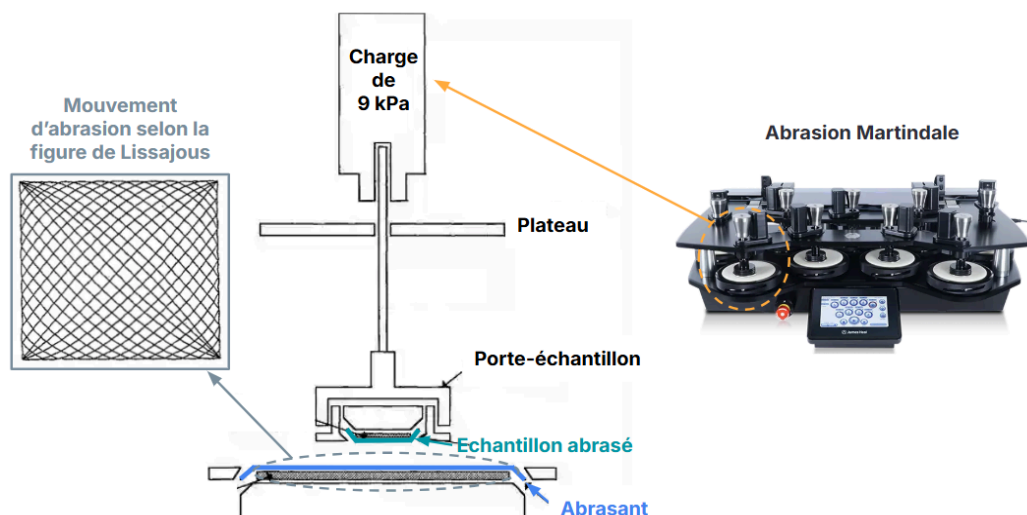


Figure 54 - Schéma d'abrasion de surface des étoffes au Martindale (JAMES HEAL).

2.5.2.2. ÉCLATEMENT

Le test d'éclatement est une méthode d'essai pour évaluer la résistance des textiles à une force appliquée perpendiculairement à leur surface par un vérin hydraulique. Cette sollicitation provoque une déformation et une rupture en "gonflement". Contrairement au test de traction qui applique une force unidirectionnelle le long de l'échantillon, le test d'éclatement simule des contraintes multidirectionnelles courantes dans l'usage quotidien des vêtements et autres articles textiles (par exemple, les genoux d'un pantalon, les coudes d'une veste, les chaussettes, les sacs, etc.). Ce test est basé sur la **norme ISO 13938-2** dont l'appareil est décrit en Figure 55. Le principe du test d'éclatement est de soumettre un échantillon textile à une pression multidirectionnelle croissante sur une zone circulaire de 50 cm², jusqu'à ce que l'échantillon soit rompu. La mesure principale est la pression maximale (en kPa) que le textile peut supporter avant l'éclatement, et également l'expansion de la matière (en mm) et la durée (en s).

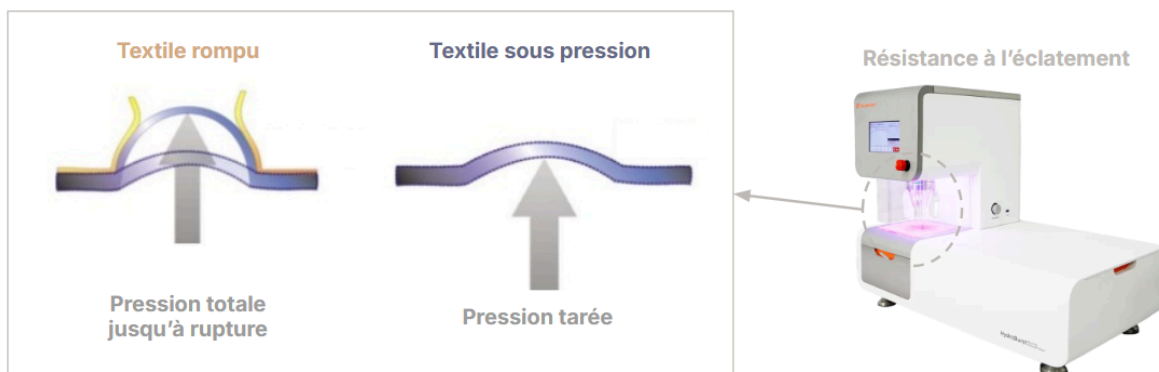


Figure 55 - Schéma de principe du test d'éclatement sur tricot (CHIUVENTION).

2.5.2.3. DRAPÉ

Le drapé d'un textile est lié à la souplesse du matériau et à sa capacité à former des plis sous son propre poids. Il s'agit dans le langage textilien d'observer le tombé du textile sur un drapéomètre illustré en Figure 56. Cette méthode de test suit la **norme ISO 9073-9**. Une éprouvette circulaire est découpée et placée sur le socle du drapéomètre. Ce socle s'abaisse pour laisser les bords de l'éprouvette textile tomber sous leur poids tandis que l'éprouvette est toujours maintenue en son centre. Une lumière s'allume, elle se réfléchit sur le miroir sous le textile pour faire apparaître l'ombre des bords de l'éprouvette sur un papier calque à la surface du drapéomètre. L'aire de l'ombre est comparée à l'aire de l'éprouvette textile initiale. L'écart entre les deux met ainsi le drapé du textile en évidence. Plus la surface de l'ombre mesurée est grande, plus le textile est rigide, à l'inverse plus il est souple.

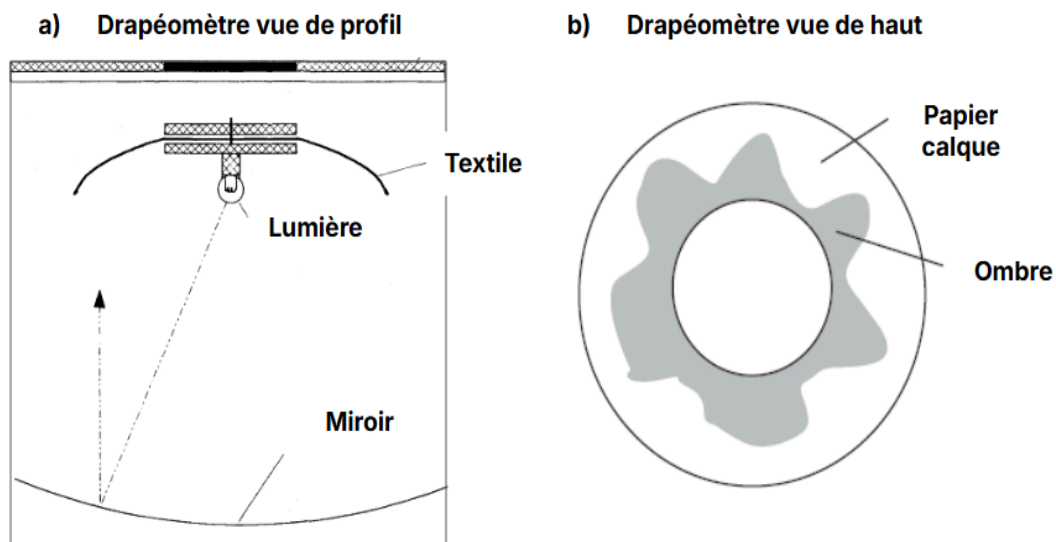


Figure 56 - Schéma de principe de la mesure du drapé sur étoffe.

2.5.3. À L'ÉCHELLE DES FILTRES

Une fois les FFMP collectés après la méthode de test standardisée du premier lavage, il est possible de les observer de plusieurs manières, notamment à l'œil nu, mais aussi au microscope optique ou MEB, ou encore via un module d'analyse infrarouge.

2.5.3.1. MICROSCOPE OPTIQUE

Pour observer les FFMP au microscope optique, le protocole est le suivant :

- Prélèvement des fragments de fibres sur le filtre avec une pince métallique.
- Placement des fragments dans une goutte de liquide pour préparer l'échantillon entre deux lamelles d'observations microscopiques.
- Placement des lamelles sous l'axe du microscope optique pour prendre des images avec différents grossissements.

2.5.3.2. MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE

Le Microscope Électronique à Balayage MEB est un outil d'investigation pour observer les FFMP à l'échelle microscopique et nanoscopique sur nos fibres de polyester. Le principe fondamental du MEB repose sur l'interaction d'un faisceau d'électrons avec la surface d'un échantillon. Ce faisceau d'électrons est ensuite balayé pour scanner la surface de l'échantillon de manière très précise. Ces observations permettent de comprendre les mécanismes de dégradation des FFMP, notamment leur profil de rupture (cassure nette ou fibrillation).

2.5.3.3. INFRAROUGE

En complément du microscope, il est possible de passer les FFMP sous un rayonnement infrarouge à transformées de Fourier ou Raman pour obtenir des informations sur leur composition chimique. Cela permet notamment de vérifier si les FFMP pesées sur le filtre sont bien du PET ou s'il s'agit d'autres polymères qui seraient qualifiés d'impuretés. Cette manipulation très chronophage a été réalisée sur un seul filtre pour toute l'étude. Le nombre d'impuretés est comptabilisé à 6% des microparticules sur le filtre dont 1,5% d'autres fibres, soit 92,5% de PET.

2.6. TRAITEMENT DES DONNÉES

Une fois le test de quantification du relargage de FFMP et les tests complémentaires réalisés, de nombreuses données sont acquises. D'abord, les données des plans d'expériences Taguchi qui associent chaque niveau de chaque facteur à un seuil de relargage de FFMP. Et ensuite les propriétés des structures textiles produites, comme la résistance à la traction des fils, ou la résistance à l'abrasion des tricots. Sans oublier que d'autres données qualitatives sont également acquises aux différents microscopes. En comparant ces données, il est possible de réaliser des estimations du relargage de FFMP au premier lavage, et également d'observer des corrélations entre le relargage et les propriétés textiles.

2.6.1. ESTIMATION DU RELARGAGE

L'estimation du relargage est l'objectif ultime de cette thèse. En rassemblant toutes les pièces du puzzle, il est possible de prédire le relargage d'un textile en fonction de ses paramètres de conception. La connaissance Taguchi de l'impact de chaque facteur du fil, de l'étoffe, et de la finition de surface appliquée, permet de retrancher des bonus ou d'ajouter des malus à la moyenne de relargage du procédé étudié. Cette méthode s'applique d'abord au sein de chaque plan d'expériences à l'aide d'un plan Taguchi complet. Cette première étape permet de calculer les relargages des autres combinaisons du plan d'expériences qui n'ont pas été véritablement produites. Cette logique est ensuite extrapolée à l'ensemble de la chaîne de transformation textile via des combinaisons des plans d'expériences. Ces méthodes seront appliquées concrètement au sein de chaque plan d'expériences de cette thèse.

2.6.2. CORRÉLATION DE PEARSON

Au-delà du relargage, les tests complémentaires quantitatifs effectués sur les matières développées dans les plans d'expériences sont potentiellement corrélés aux émissions de FFMP. La relation peut être insignifiante ou très prononcée. Pour mesurer ces relations, la corrélation de Pearson deux à deux est appliquée entre le relargage et les tests complémentaires comme la résistance à la traction ou l'abrasion entre autres. Cette méthode est une approche statistique utilisée pour évaluer la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Le coefficient de corrélation de Pearson est une valeur numérique qui varie entre -1 et +1. Lorsqu'il est égal à +1, il indique une relation linéaire positive parfaite. Cela signifie que lorsque l'une des variables augmente, l'autre variable augmente également dans une proportion égale. Les points sur un graphique en nuage de points forment une ligne droite croissante. Lorsque le coefficient de corrélation de Pearson est égal à -1, il indique une relation linéaire négative parfaite. Lorsque l'une des variables augmente, l'autre variable diminue dans une proportion égale. Les points sur un graphique en nuage de points forment une ligne droite décroissante. Enfin, lorsque le coefficient de corrélation de Pearson est égal à 0, il n'y a aucune relation linéaire entre les deux variables. Les variations d'une variable n'impliquent aucune prévisibilité quant aux variations de l'autre. Les points sont dispersés sans suivre de tendance linéaire. En résumé, plus le coefficient de corrélation de Pearson se rapproche de +1 ou -1, plus la relation linéaire entre les deux variables, et donc leur corrélation, est forte. Par exemples, un coefficient de 0,8 indique une forte corrélation positive et un coefficient de -0,6 indique une corrélation négative modérée. En complément, la valeur de p permet de déterminer si cette corrélation est statistiquement significative. Si la valeur de p est inférieure à un seuil de signification prédéfini (par exemple, 0,05), cela signifie que la corrélation observée dans l'échantillon est peu susceptible d'être due au hasard et qu'il est probable qu'il existe une corrélation linéaire réelle. En résumé, la corrélation de Pearson deux à deux est un outil puissant pour quantifier les relations linéaires entre deux variables, ici le relargage de FFMP (en mg/kg) et d'autres tests complémentaires quantitatifs. Ces corrélations sont souvent complétées par les courbes de tendances agrémentées de la valeur statistique R^2 . Plus cette dernière est proche de 1, plus la tendance est renforcée.

L'ensemble de ces méthodes vont être appliquées à chaque procédé de la chaîne de transformation textile. Le premier procédé étudié dans le chapitre suivant concerne la fabrication des multifilaments avec le filage en voie fondue des granulés de polymères de polyester. Viendront ensuite les autres procédés textiles dans le quatrième chapitre avec la filature, le tricotage, le tissage, et les traitements de finitions.

3. CHAPITRE 3 - INFLUENCE DU PROCÉDÉ DE FILAGE

Le premier chaînon de la chaîne de transformation textile est le procédé de filage en voie fondue. Cette étape a pour objectif de mettre en œuvre des granulés de polymères en fibres synthétiques appelées multifilaments. La fabrication de ces multifilaments détermine de nombreuses propriétés textiles qui peuvent avoir une influence sur la génération de FFMP lors du lavage. En effet, il est important de comprendre si des paramètres comme la nature du polymère, l'étirage des fibres, ou encore la texturation du multifilament, ont une influence sur le relavage de FFMP.

3.1. DÉVELOPPEMENT DES ÉCHANTILLONS

3.1.1. FILAGE ET TEXTURATION DES MULTIFILAMENTS

Afin de comprendre l'influence des paramètres du procédé de filage en voie fondue, plusieurs multifilaments ont été développés. Afin de comparer ces différents filaments entre eux, certains de leurs paramètres demeurent fixes pour l'entièreté du plan d'expériences. Tous les multifilaments sont en polyester, ce qui entraîne que leurs conditions de filage (températures et pressions) sont similaires. Le même lubrifiant est utilisé pour l'ensimage de tous les multifilaments. L'étirage appliqué vise à procurer une finesse finale de 70 deniers à tous les multifilaments. Ils sont tous texturés selon le procédé DTY Drawn Textured Yarn présenté au chapitre 2.

Les autres paramètres du le procédé de filage - texturation sont variables, c'est-à-dire qu'ils construisent le plan d'expériences Taguchi. Ils sont répartis en deux groupes, le premier concerne les paramètres de la matière première, notamment la nature du polyester et les additifs utilisés :

- Type de polyester PET et viscosité : **PET vierge** avec un Indice de Viscosité (IV) de 0,65, **RPET thermo-mécanique** issu du recyclage de bouteilles plastiques (IV 0,7), **RcPET chimique** issu en majorité du recyclage de textiles (IV 0,6). L'opacité des filières de tri et de recyclage ne donne pas plus d'informations sur la nature et les propriétés de ces trois polymères.

- Taux de dioxyde de titane (TiO_2) : **Opaque avec 1,3 %m de TiO_2 ou semi-opaque avec 0,3 %m de TiO_2 .**
- Teinture en masse (dope dyed DD) : **Fils noirs teints dans la masse (6 %m de noir de carbone) ou fils blancs bruts (absence de noir de carbone avec 0 %m).**

Le second groupe de facteurs étudiés se concentre sur les paramètres du procédé de filage - texturation tels que :

- Le diamètre d'un multifilament n'est pas constant, c'est pourquoi la masse linéique est préférée pour exprimer la finesse d'un fil. Elle se mesure en denier, autrement dit le poids en gramme de 9 kilomètres de fil. Dans cette étude, les multifilaments ont une finesse de 70 deniers. En revanche, le Denier Par Filaments (DPF) varie, il s'agit de la finesse de chaque filament individuel au sein du multifilament illustré en Figure 57. Trois DPF sont établis : **filaments épais (24 filaments de DPF 2,93 denier chacun, soit 17,3 microns), filaments standard (68 filaments = DPF 1,03 = 10,3 microns), ou microfibres (96 filaments = DPF de 0,73 = 8,6 microns).**

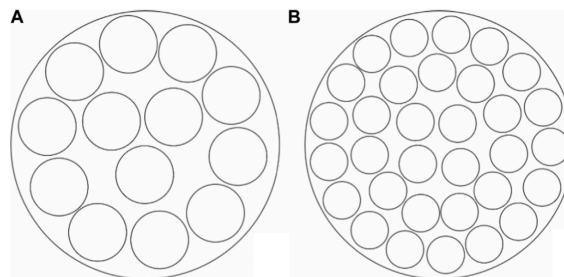


Figure 57 - Vue d'un multifilament en section identique avec un DPF A) plus élevé avec des filaments épais et B) plus faible avec des filaments plus fins.

- **La Fausse Torsion (FT) ou Fausse Torsion Fixée (FTF) avec une dernière chauffe.**
- L'entremêlement EM, présenté en Figure 58, s'exprime en nombre de nœuds par mètre : **fort (120 nœuds/m), moyen (80 nœuds/m), ou faible (40 nœuds/m).**

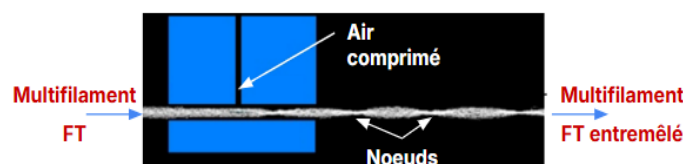


Figure 58 - Procédé d'entremêlement des filaments en texturation.

Ces six facteurs permettent de générer le plan d'expérience Taguchi composé de 3 facteurs variables à 4 niveaux et de 3 facteurs variables à 2 niveaux. A noter que les facteurs à 4 niveaux n'en ont en réalité que 3, car les niveaux intermédiaires sont doublés pour obtenir cette configuration (notamment le PET vierge, le DPF de 1,03, et l'entremêlement de 80 nœuds/m). Cela réalise une matrice Taguchi L16 4³ 2³ correspondants aux 16 multifilaments à produire mentionnés dans le Tableau 6.

Essais	Type de polyester	Denier Par Filaments DPF	Entremêlement (nœuds/m)	Teinture en masse (%m)	Taux de TiO2 (%m)	Fausse Torsion (Fixée)
1	RcPET	2,93	120	0	1,30	FTF
2	RcPET	1,03	80	0	0,30	FT
3	RcPET	1,03	80	6	0,30	FTF
4	RcPET	0,73	40	6	1,30	FT
5	PET	2,93	80	6	1,30	FTF
6	PET	1,03	120	6	0,30	FT
7	PET	1,03	40	0	0,30	FTF
8	PET	0,73	80	0	1,30	FT
9	PET	2,93	80	0	0,30	FT
10	PET	1,03	40	0	1,30	FTF
11	PET	1,03	120	6	1,30	FT
12	PET	0,73	80	6	0,30	FTF
13	RPET	2,93	40	6	0,30	FT
14	RPET	1,03	80	6	1,30	FTF
15	RPET	1,03	80	0	1,30	FT
16	RPET	0,73	120	0	0,30	FTF

Tableau 6 - Matrice Taguchi composé de 16 essais de multifilaments variés.

Les multifilaments obtenus sont ensuite transformés en tricot afin de mesurer leur perte de FFMP au premier lavage. Cependant, chaque multifilament est tricoté d'une manière identique pour ne pas masquer l'influence des paramètres de filage-texturation.

3.1.2. TRICOTAGE ET ENNOBLISSEMENT

Dans cette étape, seize multifilaments en polyester différents sont transformés en seize tricots interlock noirs. Tout d'abord, les seize multifilaments ont été tricotés sur la même machine fournie par le même fournisseur, avec des réglages similaires, dans la même structure interlock, pour produire des tricots d'une masse surfacique similaire. Comme l'étape de tricotage a été identique pour tous les multifilaments, il est possible de comparer le relargage des seize tricots interlock. A la sortie de la machine à tricoter, les échantillons sont appelés tricots non-ennoblis.

Ces seize tricotés non-ennoblis ont ensuite été soumis aux procédés d'ennoblissement, incluant la thermofixation, le traitement en voie humide, et enfin le séchage. D'abord, ils ont tous été thermofixés dans un stenter à 190°C à une vitesse de 12 m/min. Les traitements en voie humide ont ensuite été réalisés dans une machine de teinture jet. Les tricotés blancs, c'est-à-dire avec des filaments non-teints en masse, ont été teints dans une machine de teinture jet pendant 1 heure à 135°C, en utilisant un colorant dispersé noir. Les multifilaments teints en masse sont déjà teints en noir en raison des noirs de carbone ajoutés aux granulés de polyester au lancement du processus de filage voie fondue. Par conséquent, les tricotés fabriqués à partir de fils teints en masse ont simplement été lavés dans la même machine jet pendant 30 minutes à 80°C (sans colorant). Cela permet aux tricotés teints en masse de s'assouplir avec ce rinçage. Après leurs traitements en voie humide respectifs (teinture ou lavage), les seize tricotés ont été séchés dans un stenter à 110°C à une vitesse de 11 m/min. Ils atteignent finalement l'état de tricotés ennoblis.

La Figure 59 fournit un récapitulatif des étapes de transformation, depuis la fabrication des multifilaments en polyester de 70 deniers jusqu'aux tricotés ennoblis, en passant par le tricotage et le traitement en voie humide. Pour évaluer la libération de FFMP, la simulation de lavage standardisée TMC a d'abord été appliquée aux tricotés ennoblis, qui sont représentatifs de produits mis sur le marché, comme ceux étudiés dans la plupart des études. En complément, le test TMC a également été effectué sur les tricotés non-ennoblis directement après l'étape de tricotage. Cette double approche permet une compréhension plus complète des émissions de FFMP sur l'ensemble de la chaîne de valeur du textile.

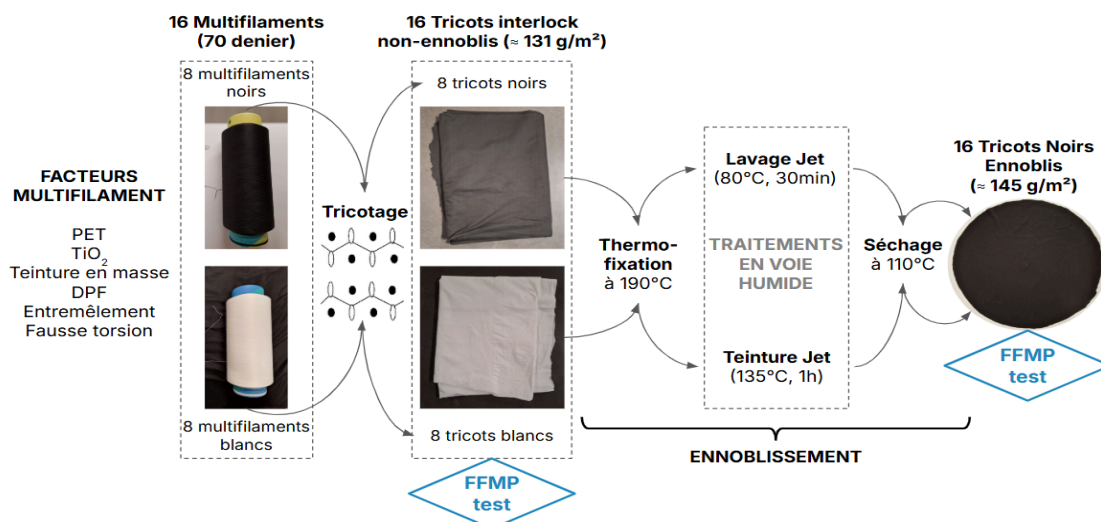


Figure 59 – Processus de fabrication des multifilaments jusqu'aux tricotés ennoblis en passant par les tricotés non-ennoblis et les traitements en voie humide.

3.1.3. CARACTÉRISTIQUES DES TRICOTS

Avant de procéder à la quantification des FFMP émis au lavage par chacun des tricots, certaines de leurs caractéristiques ont été mesurées. Le Tableau 7 présente les valeurs moyennes de la masse surfacique (g/m^2), de l'épaisseur (mm) et de la densité (kg/m^3) pour les seize tricots non-ennoblis et leurs seize tricots ennoblis correspondants. Au sein de chaque groupe, les propriétés physiques sont relativement homogènes. Les tricots non-ennoblis ont une masse surfacique moyenne de 131 g/m^2 (écart-type = 5,19), une épaisseur de 0,54 mm (écart-type = 0,02), et une densité de 245 kg/m^3 (écart-type = 9,92). Les tricots ennoblis ont montré une masse surfacique moyenne de 143 g/m^2 (écart-type = 6,58), une épaisseur de 0,43 mm (écart-type = 0,03), et une densité de 331 kg/m^3 (écart-type = 25,76).

	TRICOTS NON-ENNOBLIS			TRICOTS ENNOBLIS		
	MASSE SURFACIQUE g/m^2	EPAISSEUR mm	DENSITÉ kg/m^3	MASSE SURFACIQUE g/m^2	EPAISSEUR mm	DENSITÉ kg/m^3
MOYENNE	131	0,54	245	143	0,43	331
ECART-TYPE	5,19	0,02	9,92	6,58	0,03	25,76
MIN	121	0,50	227	133	0,40	280
MAX	139	0,57	261	159	0,50	373

Tableau 7 - Propriétés des tricots non-ennoblis et noir ennoblis.

Bien qu'au sein de chaque groupe, les tricots partagent des propriétés physiques similaires, des différences notables sont observées entre les deux groupes. Les tricots non-ennoblis sont plus légers et plus épais que leurs homologues ennoblis, ce qui se traduit par une densité de tissu plus faible (245 kg/m^3 contre 331 kg/m^3). Cet écart est sans doute dû à l'ennoblissement et notamment à la relaxation du polyester lors de la thermofixation en générant un retrait.

3.2. RELARGAGE DES TRICOTS ENNOBLIS

3.2.1. QUANTIFICATION DES FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES

La méthode de test TMC a d'abord été appliquée aux seize tricots ennoblis. Ils ont tous été soumis à un traitement en voie humide, soit par teinture en jet pour les tricots non-ennoblis blancs, soit par lavage au jet pour les tricots non-ennoblis noirs fabriqués à partir de multifilaments teints dans la masse. Comme le montre la Figure 60, la libération moyenne de FFMP sur l'ensemble des seize échantillons de tricots ennoblis est de 464 mg/kg. Une observation plus attentive des résultats révèle que trois échantillons se rapprochent fortement de cette valeur moyenne. Cependant, une large dispersion des valeurs de relargage de FFMP est observée. En effet, il y a une disparité entre deux sous-groupes : cinq tricots ont présenté des niveaux de relargage plus élevés que la moyenne, allant de 584 à 856 mg/kg, tandis que huit tricots ont relargué significativement moins de FFMP que la moyenne, soit entre 234 mg/kg et un minimum de 395 mg/kg. L'écart-type moyen à prendre en compte sur l'ensemble des échantillons est de 68 mg/kg.

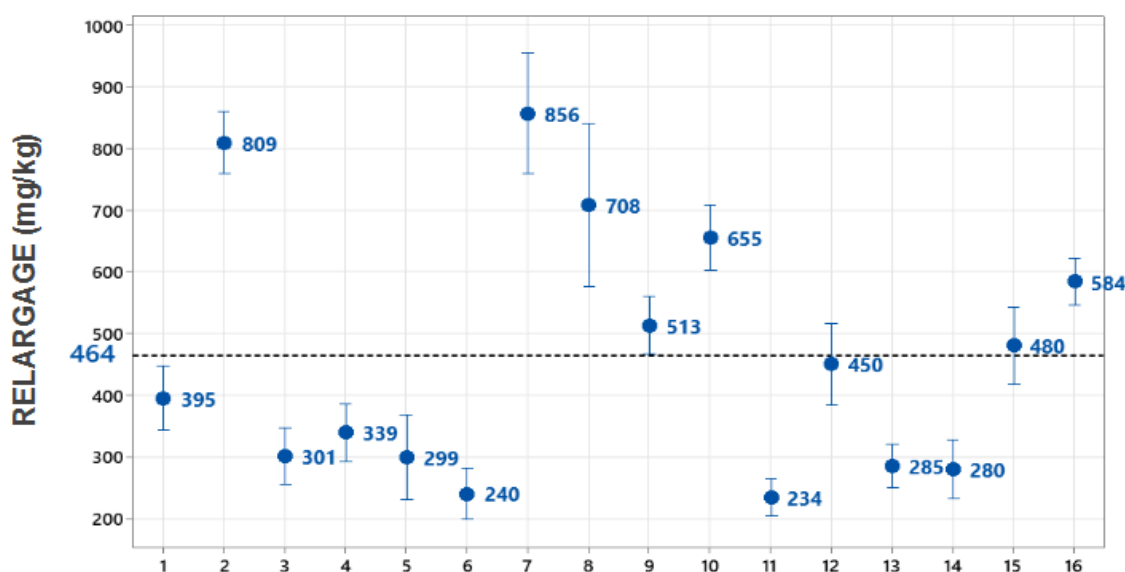


Figure 60 - Relargage de FFMP en mg/kg des 16 tricots ennoblis.

Ainsi, seize tricots en polyester aux propriétés physiques similaires, fabriqués à partir de multifilaments de 70 deniers, peuvent générer une quantité de FFMP allant du simple (234 mg/kg) à plus du triple après les traitements en voie humide (856 mg/kg). La variabilité du relargage de FFMP suggère que la composition du matériau et les paramètres de procédé des multifilaments jouent un rôle significatif dans la détermination de l'ampleur du relargage.

3.2.2. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILAGE SUR LE RELARGAGE

La méthode de Taguchi a été employée pour évaluer l'influence des paramètres liés à la matière et au procédé lors de la production de multifilaments en PET sur le relargage de FFMP. Comme spécifié dans le deuxième chapitre, cette méthode permet une identification efficace des facteurs clés tout en minimisant le nombre d'expériences requises. La Figure 61 montre l'effet moyen des niveaux des six facteurs par rapport à la moyenne de relargage de 464 mg/kg. Pour rappel, les facteurs étudiés sont : le type de PET, le taux de TiO_2 , la teinture en masse, le DPF, la fausse torsion, et l'entremêlement. Ces facteurs n'ayant pas le même effet sur le relargage de FFMP, les résultats sont présentés selon le classement d'influence suivant :

1. La teinture en masse des filaments est le facteur le plus influent (39%) pour le relargage de FFMP des tricots ennoblis. Les tricots issus de filaments noirs teints dans la masse ont relargué en moyenne 303 mg/kg, contre 625 mg/kg pour les tricots teints en noir en machine jet.
2. Ensuite, l'entremêlement représente 20% de l'influence sur le relargage de FFMP : les tricots composés de multifilaments avec un fort degré d'entremêlement, soit davantage de nœuds par mètre, présentent un faible relargage de FFMP (en moyenne 363 mg/kg). Au contraire, un faible entremêlement augmente la quantité de FFMP (en moyenne 534 mg/kg). Avec une valeur d'entremêlement intermédiaire de 480 mg/kg, cette tendance semble assez linéaire.
3. La finesse des filaments joue le troisième rôle le plus influent (18%) dans le relargage de FFMP. Bien que tous les multifilaments soient de 70 deniers, les fils avec le DPF le plus bas (0,73), c'est-à-dire 96 filaments de plus petits diamètres, ont relargué les plus grandes quantités de FFMP (en moyenne 520 mg/kg). En revanche, un DPF plus élevé (2,93), correspondant à 24 filaments plus épais pour la même section de fil, a entraîné le relargage le plus faible de FFMP (en moyenne 373 mg/kg). Cette tendance, avec un DPF moyen (68 filaments) au relargage moyen de 482 mg/kg, semble également être relativement linéaire.

4. Le quatrième facteur influent dans le classement est le type de PET caractérisé par son indice de viscosité (10%) : même si la moyenne suggère une légère tendance en faveur du polyester recyclé pour réduire le relargage de FFMP, les résultats individuels et l'écart-type ne fournissent pas de preuve claire qu'un type de PET relargue plus ou moins de FFMP. Globalement, le polyester recyclé et le polyester vierge se situent dans la même fourchette de relargage autour de la moyenne de 464 mg/kg pour des tricots ennoblis.
5. La présence de dioxyde de titane (TiO_2) représente également 10% du relargage de FFMP. Une teneur plus élevée en TiO_2 (opaque 1,3% m) semble réduire le relargage de FFMP, avec une moyenne de 424 mg/kg, contre 520 mg/kg pour une teneur plus faible en TiO_2 (semi-opaque 0,3% m). Cette tendance est similaire à celle observée avec les filaments teints en masse, bien que de moindre importance. Les additifs semblent réduire le relargage de FFMP issus des tricots ennoblis.
6. Le processus de texturation par fausse torsion a un effet relativement neutre sur le relargage de FFMP de +/- 13 mg/kg, bien en-dessous de l'écart-type et ne représentant que 3% de l'influence globale.

Lorsque l'on analyse les valeurs d'écart-type du relargage de FFMP pour chaque facteur, la moyenne se situe à 68 mg/kg, avec un minimum de 47 mg/kg observé pour un fort entremêlement, et un maximum de 84 mg/kg pour les multifilaments les plus fins.

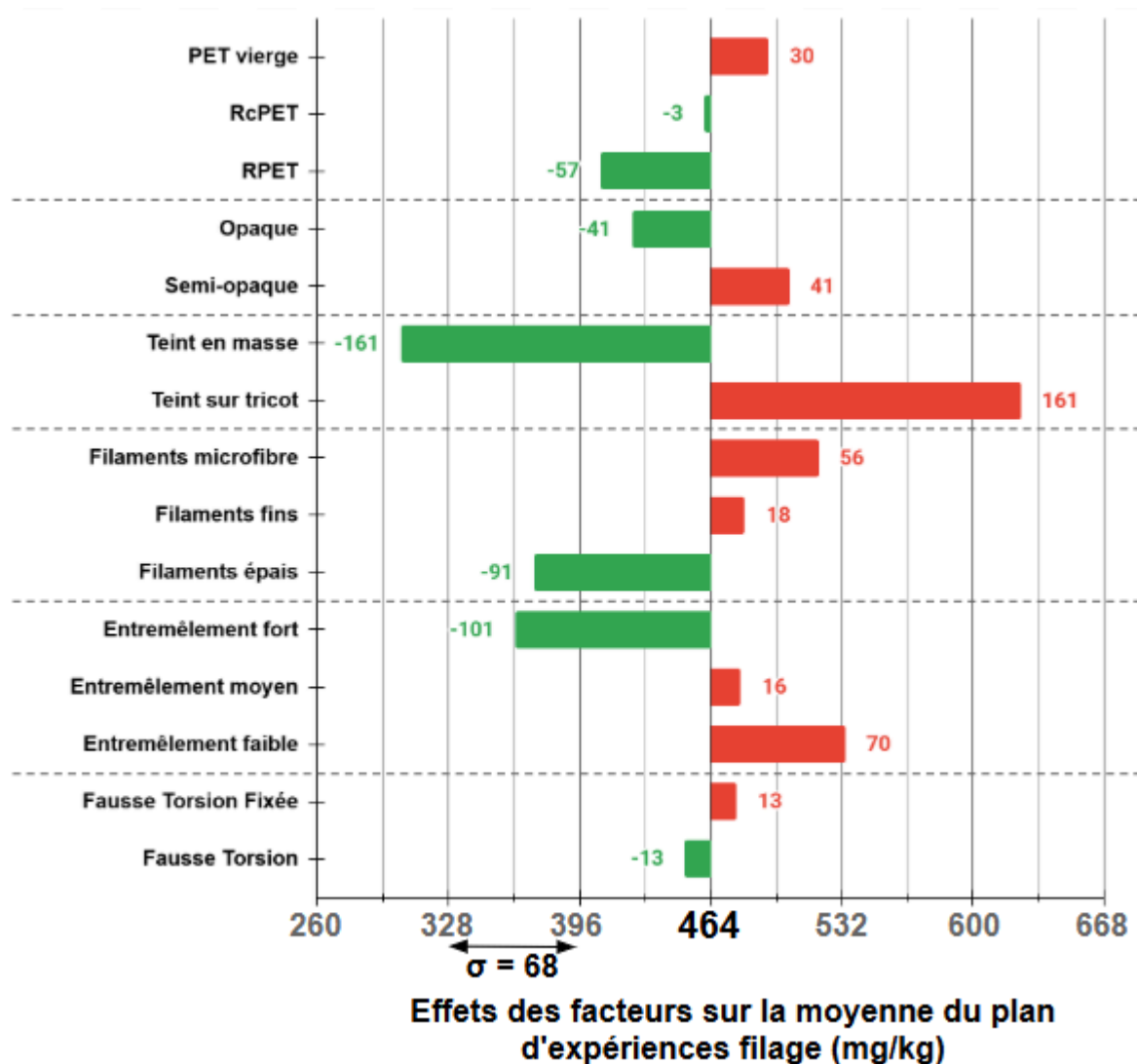


Figure 61 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filage à l'échelle des tricotés ennoblis.

En résumé, lorsque les valeurs de relargage de FFMP sont analysées pour les seize tricotés en polyester ennoblis fabriqués à partir de fils de 70 deniers et de propriétés physiques similaires, la teinture en masse est le principal facteur significatif qui semble réduire les émissions de FFMP. Un fort entremêlement des filaments et des filaments plus épais semblent également diminuer le relargage de FFMP, quel que soit le type de polyester.

À partir de cette première série d'expériences, la teinture en masse des filaments apparaît comme le facteur le plus influent, expliquant 39% de la variation observée dans le relargage de FFMP par les tricots ennoblis. Un paramètre important pourrait également être le type de traitements en voie humide : les tricots avec filaments teints dans la masse sont soumis au lavage en jet (à 80°C, 30 minutes) tandis que les tricots sans filaments teints dans la masse sont soumis à la teinture avec des colorants dispersés dans cette même machine jet (à 135°C, et 1 heure). La question est de savoir si le principal facteur identifié pour minimiser les FFMP — la teinture dans la masse — est dû aux additifs présents dans le multifilament ou à la variation des traitements en voie humide causée par les conditions du lavage au jet. Cela met en évidence la complexité du mécanisme de relargage de FFMP et suggère que la libération de fibres pourrait avoir lieu plus tôt dans la chaîne de fabrication. Pour vérifier cette hypothèse, des lavages standardisés selon la méthode TMC ont été réalisés sur des tricots non-ennoblis — avant le processus d'ennoblissement.

3.3. RELARGAGE DES TRICOTS NON-ENNOBLIS

L'objectif de cette seconde partie est d'étudier spécifiquement les paramètres de fabrication et de composition des filaments qui génèrent des FFMP dans un périmètre réduit. L'accent est mis sur les tricots non-ennoblis correspondant à des tricots tout juste tricotés tombés de métier. Il est probable que l'opération de tricotage génère également des FFMP, mais comme cette opération est identique pour tous les échantillons, elle n'aura pas d'impact sur la comparaison. Étant donné que le test de simulation de lavage TMC est réalisé avant l'ennoblissement dans ce scénario, il n'y a aucune influence des deux types de post-traitements appliqués dans la machine jet.

3.3.1. QUANTIFICATION DES FRAGMENTS DE FIBRES MICROPLASTIQUES

Le second test de simulation de lavage TMC a été réalisé sur les tricots non-ennoblis qui n'ont pas été soumis aux procédés d'ennoblissement. La Figure 62 montre les résultats de relargage pour les seize tricots non-ennoblis. Le relargage moyen de FFMP est égal à 1408 mg/kg, ce qui est plus de trois fois supérieur au relargage moyen des seize tricots ennoblis. Quinze des seize tricots ont des relargages situés entre 1128 et 1903 mg/kg, à l'exception de l'essai numéro 7 qui atteint un relargage minimal de 706 mg/kg. L'écart-type moyen pour toutes les expériences est de 104 mg/kg.

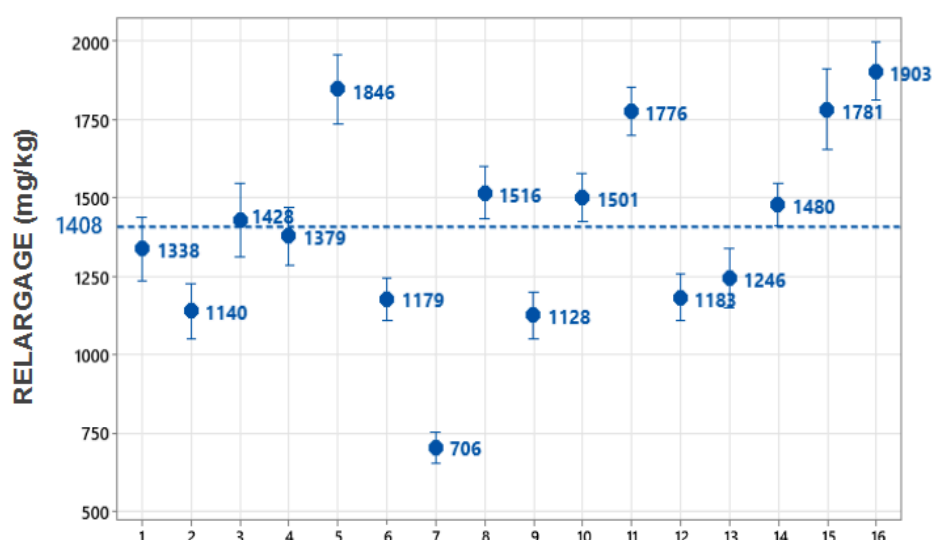


Figure 62 - Relargage de FFMP en mg/kg des seize tricots non-ennoblis.

Malgré des tricots similaires, la dispersion des résultats suggère à nouveau que la composition des multifilaments est déterminante sur le relargage de FFMP.

3.3.2. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILAGE SUR LE RELARGAGE

La méthode Taguchi a de nouveau été utilisée pour déterminer l'importance de chacun des six facteurs sur le relargage de FFMP, cette fois-ci plus tôt dans la chaîne de valeur à l'état de tricot non-ennoblis. Pour rappel, il s'agit du type de PET, du taux de TiO_2 , de la teinture en masse, du DPF, de la fausse torsion, et de l'entremêlement. Leurs effets par rapport à la moyenne de 1408 mg/kg sont exprimés dans la Figure 63. Ils se classent selon l'ordre suivant du plus influents au moins influents sur le relargage de FFMP des tricots non-ennoblis :

1. La présence de l'additif TiO_2 détermine 29% du relargage de FFMP : les multifilaments opaques à forte teneur (1,3% en masse) génèrent en moyenne 1577 mg/kg, contre 1239 mg/kg pour les semi-opaques (0,3% en masse).
2. Également à 29% d'influence, le processus d'entremêlement montre une tendance claire : un fort entremêlement entraîne un relargage de FFMP plus élevé (en moyenne 1549 mg/kg), comparativement à un faible degré d'entremêlement (en moyenne 1208 mg/kg). Ce résultat est contradictoire à la tendance observée sur les tricots ennoblis, où un entremêlement plus fort était associé à un relargage plus faible de FFMP.
3. Le type de PET affecte la génération de FFMP pendant la fabrication (24%) : des niveaux de relargage inférieurs à la moyenne ont été observés pour le PET recyclé chimiquement (RcPET, IV 0,60) et le PET vierge (IV 0,65), avec des moyennes similaires autour de 1335 mg/kg. En revanche, un relargage plus élevé de FFMP a été associé au PET recyclé thermo-mécaniquement provenant de bouteilles (rPET, IV 0,70), avec une moyenne de 1602 mg/kg.
4. La finesse des filaments (DPF) semble moins influente (10%) mais montre une tendance claire : les filaments plus fins ($\text{DPF} < 1$) tendent à générer un relargage plus élevé de FFMP, avec une moyenne de 1495 mg/kg, comparativement aux filaments plus épais. Ces conclusions sont cohérentes avec les résultats précédents obtenus sur les tricots ennoblis.

5. La teinture en masse est un paramètre bien moins déterminant pour le relargage des tricots non-ennoblis (5% d'influence) que précédemment pour les tricots ennoblis. En effet, les tricots non-ennoblis avec des multifilaments teints dans la masse et les tricots non-ennoblis avec des multifilaments blancs bruts ont des relargages moyens similaires. Ils se situent autour de la moyenne de 1408 mg/kg avec une différence de +/- 32 mg/kg inférieure à l'écart-type.
6. Le processus de texturation par fausse torsion a un effet neutre sur le relargage de FFMP (3%), qu'il soit fixé ou non.

Les écarts-types sont relativement constants, avec une moyenne de 104 mg/kg, allant d'un minimum de 91 mg/kg (pour le PET vierge) à un maximum de 119 mg/kg (dans le cas du PET recyclé chimiquement).

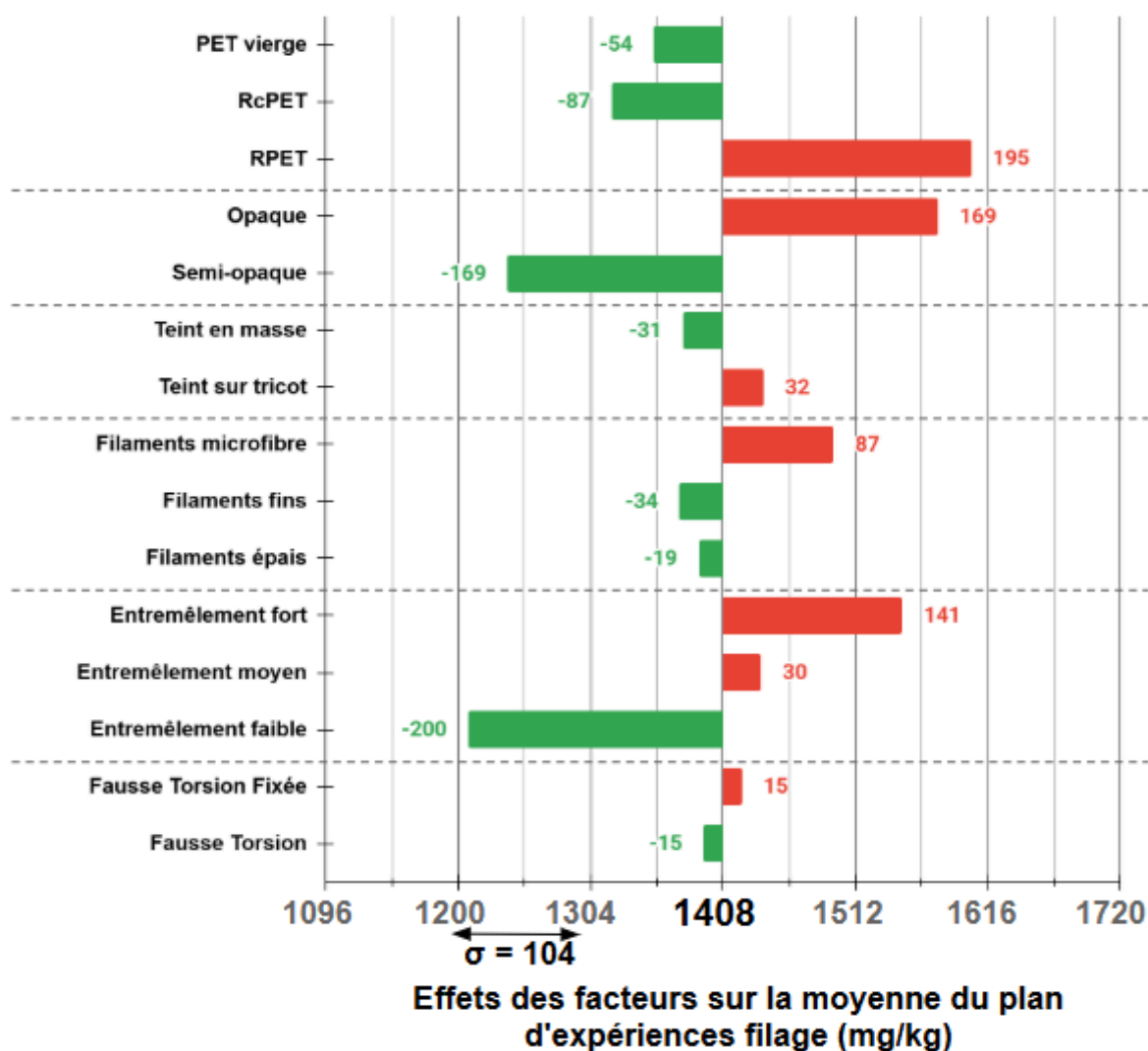


Figure 63 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filage à l'échelle des tricots non-ennoblis.

En résumé, les principaux facteurs contribuant à une moindre génération de FFMP à partir des tricots non-ennoblis sont une faible teneur en TiO_2 (semi-opaque 0,3% m), un faible entremêlement, et le PET recyclé chimiquement ou vierge. Ce nouveau classement des facteurs montre que le relargage varie en fonction de l'étape à laquelle le test de relargage est effectué dans la chaîne de valeur textile.

3.4. INFLUENCE DE LA CHAÎNE DE TRANSFORMATION TEXTILE

3.4.1. PHASE D'ÉLIMINATION DES FRAGMENTS DE FIBRES

Les différentes étapes de production ont eu lieu sur des lignes pilotes pour la fabrication des multifilaments en PET, et sur des lignes industrielles pour le tricotage et les ennoblissements (thermofixation, traitements en voie humide, et séchage). En utilisant un plan d'expériences Taguchi, seize tricots ennoblis avec une masse surfacique similaire ($\approx 145 \text{ g/m}^2$) ont été produits à partir de seize différents fils multifilaments de 70 deniers. Ces derniers ont été filés en faisant varier trois paramètres de la matière première (le type de PET, le taux de TiO_2 , la teinture en masse), et trois autres sur le procédé de filage-texturation (le DPF, la fausse torsion, et l'entremêlement). Les tricots ennoblis ont montré une large dispersion de relargage de FFMP, allant d'un minimum de 234 mg/kg jusqu'à 856 mg/kg, soit plus d'un coefficient 3. Cette fourchette de valeurs pour les tricots ennoblis est cohérente avec celles trouvées dans la littérature exprimée au premier chapitre. En revanche, dans cette étude, des générations de FFMP significativement plus élevées ont été observées à partir des tricots non-ennoblis, allant de 1128 mg/kg à 1903 mg/kg.

La première partie de l'étude a identifié la teinture en masse comme le facteur le plus influent pour réduire le relargage de FFMP à partir de tricots ennoblis. Pourtant le type de traitements en voie humide lors de l'ennoblissement (teinture ou lavage en jet) ne peut à lui seul expliquer les résultats observés, car les populations d'échantillons sont issues de deux étapes différentes de la chaîne de valeur et ne sont pas directement comparables. Néanmoins, la conclusion principale est que les traitements en voie humide sont l'étape la plus influente sur le relargage de FFMP à partir des tricots ennoblis. En effet, peu importe la teinture ou le lavage en jet, les traitements en voie humide semblent réduire significativement le relargage de FFMP, le faisant passer d'une fourchette de 1128–1903 mg/kg à 234–856 mg/kg.

Ainsi les traitements en voie humide sont responsables de l'élimination d'une grande partie des FFMP lors de la production des textiles.

3.4.2. PHASE DE GÉNÉRATION DES FRAGMENTS DE FIBRES

Pour comprendre d'où proviennent les FFMP émis lors des traitements en voie humide, le champ de l'étude a donc été réduit aux tricots non-ennoblis (sans aucun traitement en voie humide : ni teinture ni lavage au jet). Il est observé que le relargage de FFMP à partir de seize tricots non-ennoblis ayant des propriétés physiques similaires dépend des paramètres de fabrication des filaments. Ainsi, la sélection des matières premières et des paramètres de procédé pour le fil multifilament en PET de 70 deniers est particulièrement pertinente, car l'analyse du relargage de FFMP sur les échantillons a révélé des différences significatives. De plus, il est possible d'évaluer quantitativement la contribution de chaque paramètre sur le relargage. Ces paramètres sont classés selon l'ordre d'importance pour contrôler la génération de FFMP pendant la fabrication des multifilaments tricotés :

1. La présence de charges de TiO_2 dans les filaments. Cet additif est ajouté au polymère de PET pendant la production des filaments pour les rendre plus ou moins opaques en fonction de leur concentration massique. Cependant, ces charges peuvent affaiblir les filaments par divers mécanismes et cela pourrait expliquer la formation et donc le relargage de FFMP plus élevé pour les tricots non-ennoblis qui en contiennent [82].
2. L'opération d'entremêlement, qui assure la cohésion des multifilaments dans le fil en formant des points d'entremêlement à l'aide de pressions d'air comprimé. Trois densités de nœuds ont été testées (40 nœuds/mètre, 80 nœuds/mètre, 120 nœuds/mètre), entraînant respectivement un relargage de FFMP moyen de 1208 mg/kg, 1438 mg/kg, et 1549 mg/kg. Les résultats montrent une tendance claire : plus le nombre de nœuds est élevé, plus le relargage de FFMP est important. Cela peut être attribué à l'impact mécanique de l'air comprimé pendant la production, qui peut affaiblir l'intégrité du filament. On peut ainsi émettre l'hypothèse que les dommages induits par la pression d'air sont une source de génération de FFMP pendant la fabrication. Cette contradiction apparente peut s'expliquer par le moment et la visibilité des dommages du filament : pendant la production, la formation de nœuds d'entremêlement introduit des micro-dommages révélés par les

⁸² Zeghioud et al., 2017

traitements en voie humide. Alors qu'à la fin de la chaîne de valeur, les nœuds sont consolidés après l'ennoblissement, ils contribuent à la cohésion du multifilament et in-fine du tricot plutôt qu'à sa fragmentation, et ainsi réduisent le relargage. Dans cette étude, seul le nombre de nœuds par mètre a varié. Cependant, étant donné la complexité mécanique et structurelle du processus d'entremêlement — incluant des paramètres tels que la pression d'air, la vitesse du fil et la tension — cette opération mériterait une étude spécifique.

3. Le type de polymère PET utilisé : le PET vierge, le PET recyclé chimiquement (RcPET), et le PET recyclé thermomécaniquement (rPET) ont été comparés dans cette étude. Les travaux de la littérature sont principalement appliqués sur des tissus commercialisés où des résultats contradictoires sont observés au chapitre 1. Étant donné ces incohérences, il reste difficile de tirer des conclusions définitives de la littérature, tout comme avec les résultats des tricots ennoblis. Cependant, les résultats obtenus sur les tricots non-ennoblis confirment l'influence du type de recyclage du PET sur le relargage de FFMP. Avec des structures tricotées interlock identiques et des propriétés de multifilament similaires, le RPET recyclé thermo-mécaniquement a relargué plus de FFMP que le PET recyclé chimiquement et le PET vierge. Cette tendance peut être attribuée à la plus haute viscosité intrinsèque du RPET provenant de bouteilles (RPET, IV 0,70), comparée au PET recyclé chimiquement (RcPET, IV 0,60) et au PET vierge (IV 0,65). De plus, comme le processus de recyclage thermo-mécanique du PET de qualité bouteille implique souvent une dégradation par scission de chaîne, et une distribution de poids moléculaire plus large. Ces facteurs aboutissent à une matrice polymère plus cassante, avec des chaînes polymères plus courtes, rendant les fibres plus sensibles à la fragmentation due aux frottements. Cependant dans cette étude, cette conclusion doit être interprétée avec prudence, car elle n'est pas validée pour les tricots ennoblis, où le relargage de FFMP tend à converger autour de valeurs moyennes similaires, quel que soit le type de polyester.
4. Le denier par filament DPF représente 10% de l'influence : il confirme que les filaments très fins, en particulier ceux inférieurs à 1 denier, relarguent plus de FFMP (en moyenne 1495 mg/kg). La littérature du premier chapitre explique que la finesse de la fibre devrait être augmentée pour réduire la propension du fil à former des fragments de fibres. Par conséquent, cette étude confirme cette analyse après le tricotage et également après les traitements en voie humide.

A noter que la teinture en masse et la fausse torsion n'ont pas d'impact significatif sur le relargage des tricots non-ennoblis. Cependant, lorsque la masse de FFMP relarguée par les tricots non-ennoblis et les tricots ennoblis est comparée, en fonction des paramètres des multifilaments, une observation controversée est faite. Pour les tricots non-ennoblis, les additifs chargés en TiO_2 (opaque 1,3% m), un fort entremêlement, et l'utilisation de PET recyclé thermo-mécaniquement augmentent le relargage de FFMP. Dans le cas des tricots ennoblis, les réductions du relargage de FFMP sont liées à la teinture en masse et à un degré d'entremêlement de filament plus élevé. La même tendance n'est observée que pour les DPF élevés avec des filaments plus épais, qui diminuent les FFMP pour les tricots ennoblis et les tricots non-ennoblis.

Au-delà des paramètres des multifilaments, les interprétations peuvent également se porter sur les caractéristiques des tricots, étant donné que la différence de relargage est conséquente avant et après ennoblissement. Pour rappel, les tricots non-ennoblis ont des masses surfaciques moyennes (131 g/m^2) et des densités moyennes (245 kg/m^3) plus faibles que celles des tricots ennoblis (145 g/m^2 et 331 kg/m^3). L'ennoblissement a pour responsabilité de densifier les tricots. Les FFMP générés lors des opérations textiles précédant l'ennoblissement sont dus à des dégradations des fibres. Ils peuvent ensuite migrer hors de la structure des tricots non-ennoblis lors de l'ennoblissement, et ainsi baisser les émissions de FFMP final au premier lavage. Cela peut s'expliquer aussi par le fait que les tricots ennoblis sont devenus plus denses et retiennent ainsi mieux les migrations de FFMP à l'intérieur de leur structure.

3.4.3. PREMIÈRES CONCLUSIONS

Cette étude confirme que les tricots multifilaments en polyester—bien que fabriqués dans des conditions contrôlées et présentant des propriétés de tricotage similaires—relarguent des quantités de FFMP significativement différentes en fonction de la fabrication du multifilament. En moyenne, les tricots non-ennoblis ont relargué 1408 mg/kg de FFMP, ce qui est environ trois fois plus que les 464 mg/kg relargués après le traitement en voie humide des tricots ennoblis. Cette différence de 956 mg/kg confirme que la plupart des FFMP sont générés lors du filage, de la texturation et du tricotage, et sont ensuite éliminés pendant les traitements en voie humide. L'interprétation est que l'ennoblissement est responsable d'extraire de la structure textile les FFMP, à l'image d'un lavage domestique.

La variété des paramètres de multifilaments étudiés révèle des conclusions intéressantes. Même si tous les tricots sont des structures interlock en multifilaments en polyester, ils présentent une forte dispersion des résultats de relargage. Parmi les six facteurs étudiés à l'aide de la méthode Taguchi, la teneur en TiO_2 , le niveau d'entremêlement, et l'utilisation de PET recyclé thermo-mécaniquement ont eu la plus grande influence sur le relargage de FFMP après le tricotage. La finesse des filaments (DPF) a également joué un rôle secondaire. Après l'ennoblissement, la teinture en masse est apparue comme le paramètre principal réduisant le relargage de FFMP, quel que soit le type de PET. La texturation par fausse torsion n'a montré aucune influence significative sur la génération de FFMP à aucune étape de la chaîne de valeurs. Bien que la méthode de Taguchi ait efficacement mis en évidence les effets principaux des facteurs individuels, elle ne tient pas compte des interactions entre eux. Une analyse de données plus approfondie est nécessaire pour explorer ces relations et les valeurs aberrantes dans l'ensemble des données. De plus, un scénario de la chaîne de transformation textile est considéré, en effet les conditions expérimentales de ces essais sont vérifiées pour les procédés de filage – tricotage – ennoblissement. Le quatrième chapitre viendra compléter cette approche avec d'autres scénarios de production autour des procédés textiles comme la filature, le tissage, ou encore les traitements de surface.

Un aspect unique de cette étude est que les échantillons ont été fabriqués dans des conditions contrôlées sur l'ensemble de la chaîne de valeur, tandis que la plupart des publications scientifiques s'appuient sur des textiles disponibles sur le marché. Cela renforce la fiabilité des résultats et souligne la nécessité d'une meilleure normalisation dans la recherche sur les FFMP.

D'un point de vue industriel, les fabricants devraient viser à réduire les sollicitations sur la matière avant l'ennoblissement pour minimiser la génération de FFMP lors des traitements en voie humide. En conséquence, le flux de FFMP dans les eaux usées des usines de production semble être un point d'attention à maîtriser afin d'éviter les fuites dans l'environnement. Les concepteurs de produits textiles devraient prendre en compte l'ensemble des paramètres de la chaîne de valeur, du polymère à la mise sur le marché, pour concevoir des textiles à faible relargage, respectueux de l'environnement.

3.5. ÉTUDES DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES ÉCHANTILLONS

Les multifilaments et in-fine les tricots développés dans ce plan d'expériences avaient pour objectif de mettre en évidence le relargage de FFMP. Pourtant d'autres propriétés intrinsèques aux échantillons textiles ont été mesurées en laboratoire. Des essais de traction ont été réalisés sur les multifilaments, tandis que les tricots ont éprouvé la résistance à l'éclatement ou encore à l'abrasion. Ces méthodes de tests décrites dans le chapitre 2 peuvent laisser paraître de nombreuses informations sur les propriétés mécaniques des textiles. A l'échelle des multifilaments comme des tricots, les résistances mesurées peuvent également être liées aux émissions de FFMP. Effectivement, les corrélations de Pearson deux à deux réalisées indiquent de premières tendances.

3.5.1. RÉSISTANCE EN TRACTION DES MULTIFILAMENTS

Des essais ont été réalisés pour mesurer la résistance en traction des seize filaments du plan d'expériences sur le filage. Le coefficient de corrélation entre le relargage de FFMP et la force à la rupture des multifilaments en traction (en cN) est de 0,77. La force à la rupture (en cN) s'associe à la finesse des multifilaments (en dTex) pour donner la ténacité des multifilaments (en cN/dTex). Sachant que la finesse des multifilaments est similaire (en moyenne 85 dTex avec un écart-type de 4), il est possible de corrélérer également la ténacité avec le relargage de FFMP. Cette corrélation est confirmée par un coefficient de Pearson de 0,64 pour une valeur de p de 0,007. Ces corrélations se confirment légèrement par la courbe de tendance avec un R^2 de 0,38, illustrée en Figure 64.

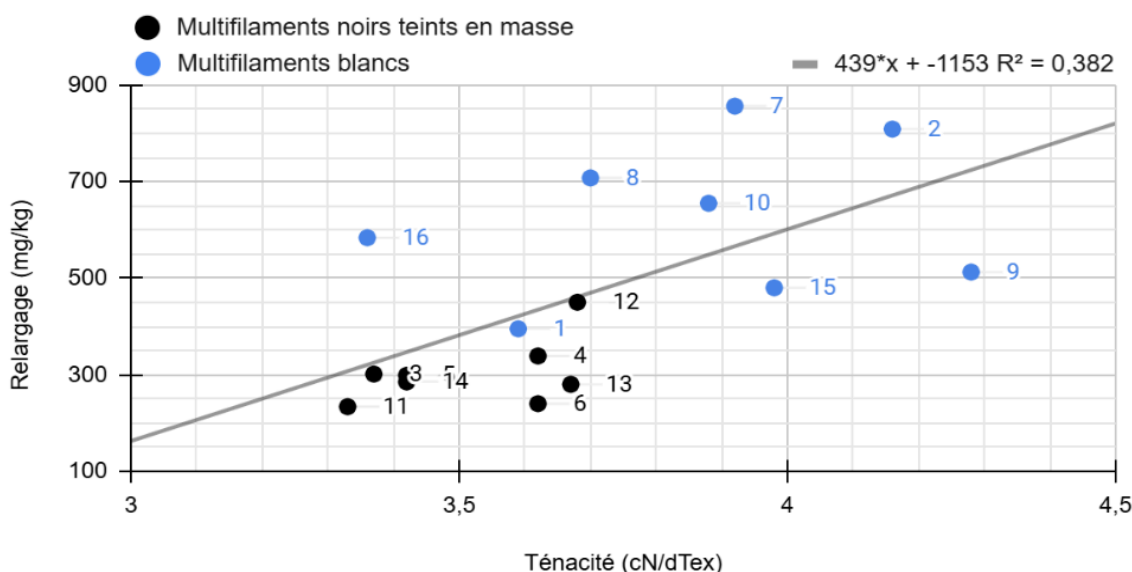


Figure 64 - Corrélation entre la résistance des multifilaments en traction et le relargage de FFMP.

Cette tendance signifie que pour un multifilament avec une résistance en traction plus faible, la quantité de FFMP émise est moins importante. Pourtant ce résultat semble contre-intuitif. Dans la logique, plus les matières sont résistantes, moins elles relarguent. En lien avec les analyses MEB du paragraphe précédent, l'hypothèse faite pour expliquer ce résultat est que la résistance en traction élevée provoque une cassure nette d'un fragment de fibres de taille imposante. A l'inverse, une faible résistance en traction entraîne une rupture progressive d'une fibrille d'une taille moins imposante. Ainsi lors du relargage mesuré en ratio de masse (mg/kg), les fragments émis avec une rupture nette pèsent plus lourd que les fragments collectés après une rupture progressive.

La bascule semble se faire pour une ténacité au niveau des 3,68 cN/dTex : avant cette valeur les multifilaments ont un faible relargage, au-delà les émissions de FFMP augmentent (à l'exception du multifilament 16, et seulement légèrement pour le 8). Cette première corrélation oriente à nouveau la discussion vers l'influence de la teinture en masse. Les multifilaments teints en masse, en noirs sur le graphique, sont justement ceux qui ont une ténacité inférieure à 3,68 cN/dTex. Les multifilaments blancs, en bleu sur le graphique, ont des relargages plus élevés. Ils composent le deuxième groupe avec des ténacités dépassant les 3,68 cN/dTex et allant jusqu'à 4,28 cN/dTex (excepté les essais 1 = 3,59 cN/dTex et 16 = 3,36 cN/dTex).

3.5.2. RÉSISTANCE À L'ÉCLATEMENT DES TRICOTS

A l'échelle des tricots, la résistance à l'éclatement a été mesurée. Cette méthode de test présentée au chapitre 2 a été appliquée sur les tricots ennoblis ainsi que sur les tricots non-ennoblis. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 65. A noter que les moyennes sont de 398 kPa pour les tricots ennoblis (en noir) et de 406 kPa pour les tricots non-ennoblis (en bleu), soient identiques. De plus, les valeurs individuelles sont sensiblement similaires pour chaque référence avec un écart minimum de 1 kPa et maximum de 36 kPa.

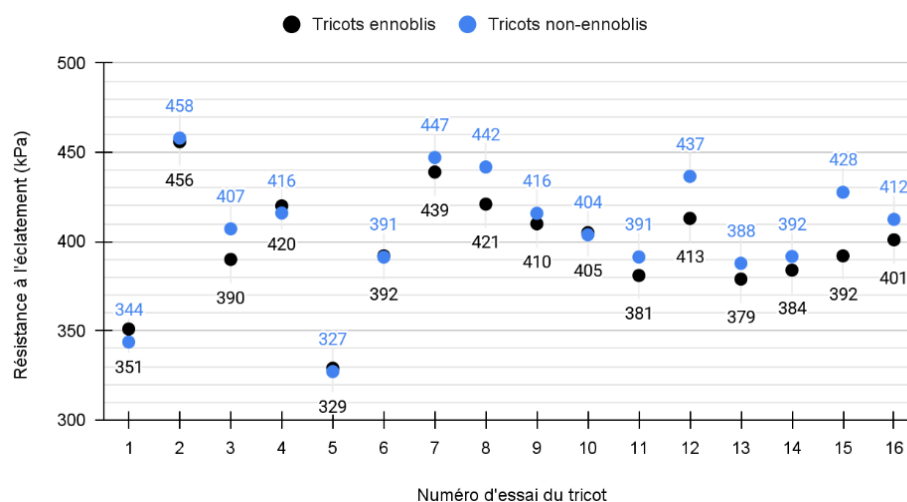


Figure 65 - Comparaison de la résistance à l'éclatement (en kPa) entre les références de tricots ennoblis et de tricots non-ennoblis.

Pour la suite de cette partie, il est convenu que les moyennes des résistances à l'éclatement des deux valeurs sont calculées pour chacun des 16 essais, afin de faciliter la lisibilité des figures suivantes. La résistance à l'éclatement des deux catégories de tricots est donc similaire. Or leurs relargages de FFMP sont bien différents. En effet, chaque référence de tricot a un relargage plus élevé à l'état de tricot non-ennobli qu'à l'état de tricot noir ennobli, comme évoqué plus tôt dans ce chapitre. Ainsi une corrélation forte entre la pression de rupture à l'éclatement des tricots ennoblis (en kPa) et le relargage (en mg/kg) est établie. En effet, le coefficient de Pearson est de 0,71 avec $p = 0,002$. Ce résultat est validé en Figure 66 par la tendance polynômiale avec un R^2 égal à 0,68. Cependant, cette tendance est inversée et moins marquée pour les tricots non-ennoblis, où le R^2 n'atteint que 0,25.

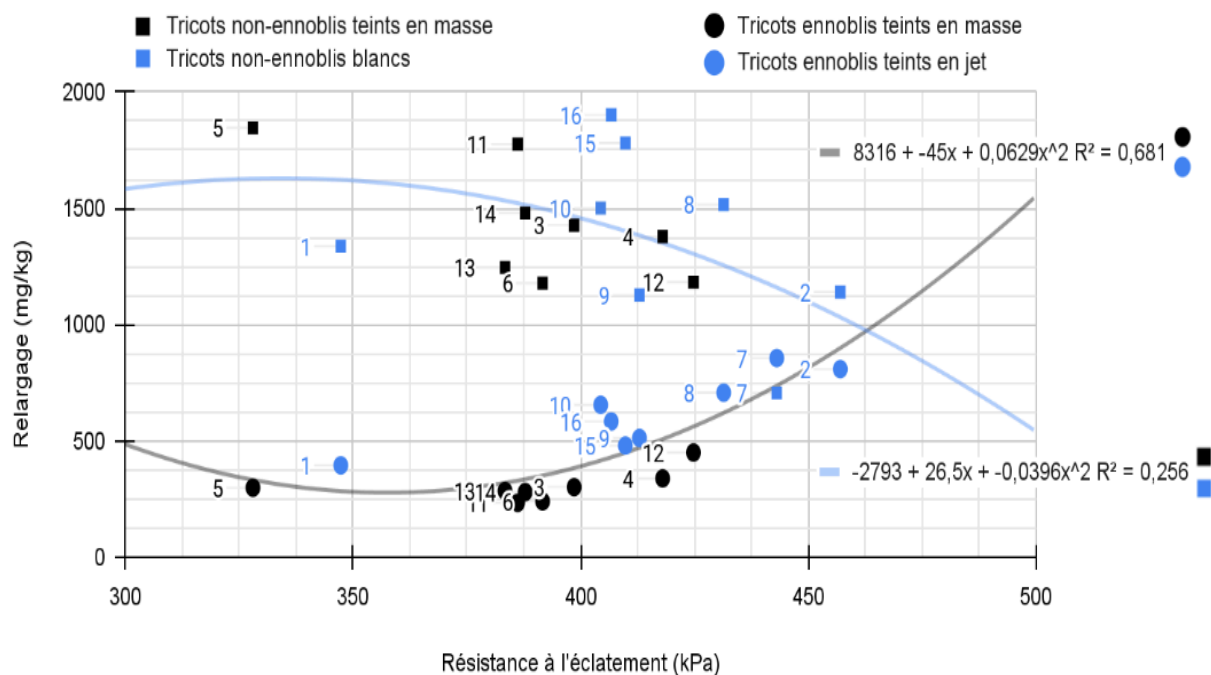


Figure 66 - Corrélation entre la résistance à l'éclatement (kPa) et le relargage de FFMP (mg/kg) pour les tricots embellis et les tricots non-embellis.

A l'état de tricots non-embellis, aucune tendance claire n'est observée entre la résistance à l'éclatement et le relargage de FFMP, et ce peu importe si les tricots non-embellis sont teints en masse (en noir sur le graphique) ou non (en bleu). Pourtant, lorsque les tricots sont embellis, la corrélation prend forme. Le relargage de FFMP est moins important pour des tricots embellis avec une plus faible résistance à l'éclatement. Cette relation va dans le même sens que ce qui a été observé précédemment sur la ténacité des multifilaments. De plus, elle montre à nouveau l'influence de la teinture en masse dont les échantillons concernés (en noir sur le graphique) se trouvent principalement dans le premier groupe avec des résultats inférieurs à la moyenne de 398 kPa (excepté les échantillons 4 à 418 kPa et 12 à 425 kPa). A l'inverse, les tricots embellis teints en jet (en bleu sur le graphique) ont une résistance à l'éclatement souvent supérieure à la moyenne de 398 kPa (sauf l'essai numéro 1 à 347 kPa). Ces premiers résultats vont être complétés par les mesures de résistance à l'abrasion des tricots embellis.

3.5.3. RÉSISTANCE À L'ABRASION DES TRICOTS

Certaines études du chapitre 2 annonçaient qu'une résistance à l'abrasion accrue diminuait les émissions de FFMP. Pourtant, dans cette étude, la relation n'est pas évidente. L'abrasion de chaque tricot noir ennobli a été mesurée au Martindale en relevant le nombre maximum de cycle d'abrasion effectué avant que le tricot ne se troue. Ces résultats ont été corrélés au relargage de FFMP et le coefficient de Pearson qui en résulte est de -0,1. Ce coefficient est négatif, il alimente donc le fait que les tricots généralement plus résistants à l'abrasion génèrent moins de FFMP. Mais la valeur de -0,1 reste très faible, et bien plus proche de 0 que de -1, ce qui montre que cette relation n'est pas significative. Cette interprétation se confirme dans le graphique en Figure 67 avec une grande dispersion des 16 mesures autour d'une tendance linéaire d'un R^2 égal à 0,01. La distinction des échantillons en deux groupes avec les tricots ennoblis teints en masse ou teints en jet indique une résistance à l'abrasion plus élevées pour les tricots avec des multifilaments teints en masse. A noter que la résistance à l'abrasion n'a pas été mesurée sur les tricots non-ennoblis.

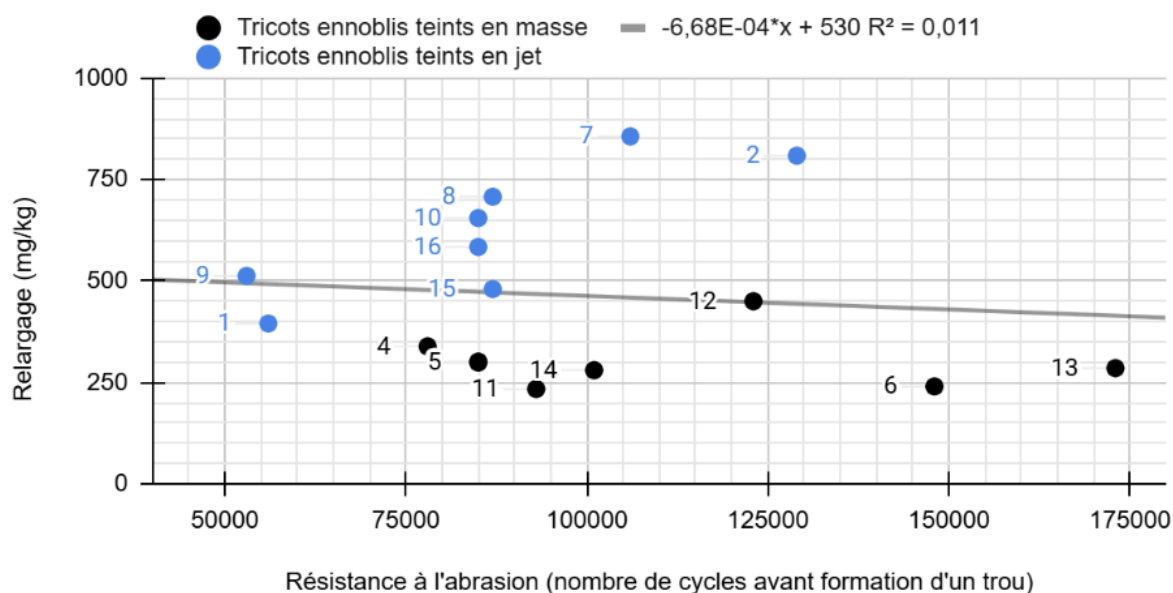


Figure 67 - Relation entre la résistance à l'abrasion (en nombre de cycles avant la formation d'un trou) et le relargage (en mg/kg) des tricots ennoblis.

Bien que l'abrasion n'ait pas de lien avéré avec le relargage dans notre étude, il est possible de la relier aux autres propriétés précédemment étudiées, comme la résistance à la traction des fils et la résistance à l'éclatement des tricots. Pour cela, il faut s'intéresser aux énergies de ruptures des multifilaments et des tricots lors de leurs mises sous tensions.

3.5.4. ÉNERGIES DE RUPTURE

Dans le cas de la résistance en traction des multifilaments, l'énergie de rupture a été mesurée en calculant l'aire sous la courbe de traction, comme expliqué dans le chapitre 2. Chacun des 16 multifilaments a donc l'expression de son énergie de rupture en cN.cm mesurée directement lors du test de traction. Les énergies de rupture des multifilaments vont de 1591 cN.cm à 3795 cN.cm avec une moyenne de 2658 cN.cm et un écart-type de 672 cN.cm.

Pour la résistance à l'éclatement des tricots, l'énergie de rupture E s'exprime en joules J et n'a pas été mesurée lors du test. Elle se calcule selon la formule suivante à partir de la pression P_{burst} (en Pa), l'aire A de l'éprouvette circulaire (en m²), et la dilatation h (en m) : $E = \frac{1}{4} \times P_{burst} \times A \times h$

Equation 1 – Formule du calcul de l'énergie de rupture à l'éclatement d'un tricot.

Dans cette étude, ces données ont été collectées pendant les essais sur les tricots avec une pression moyenne égale à 402 kPa, une aire de 50 cm² et une dilatation moyenne de 34 mm. Ainsi les énergies de rupture de chaque tricot ont pu être calculées. Comme pour les pressions d'éclatement, les énergies de rupture étant sensiblement proches pour les tricots non-ennoblis et les tricots ennoblis, il a été convenu de conserver la moyenne des deux valeurs. Celles-ci s'étendent de 13,9 J à 19,6 J avec une moyenne de 17,0 J et un écart-type de 1,5 J.

Sous des sollicitations mécaniques répétées (glissement fil/fil ou fil/organe, flexion, torsion), une partie de l'énergie mécanique fournie de la sollicitation est convertie en chaleur au contact de la surface textile. Ce phénomène se nomme la dissipation de surface : elle se produit au point de contact et alimente l'endommagement superficiel du textile par pilosité, microfissuration, pertes de masse [47] [83]. Dans des fils en polyester teints en masse contenant des noirs de carbone CB dispersés, une fraction de cette énergie peut être dissipée à l'intérieur du filament, par l'interface CB/PET [83]. Comme le CB possède une conductivité thermique plus élevée que le PET, la chaleur générée interne est plus répartie [84].

⁸³ Gurudatt et al., 2005

⁸⁴ Friedrich, 2018

L'hypothèse de la thèse est que ces effets pourraient diminuer pour des sollicitations trop brutales ou bien pour des CB en taille ou en concentration trop importante dans le polymère. Ce phénomène de dissipation de l'énergie par les noirs de carbone pourrait expliquer certains résultats précédents obtenus avec les multifilaments teints en masse à 6%. Par exemple, la traction des multifilaments et l'éclatement des tricots ne seraient pas des sollicitations suffisamment progressives pour être absorbées par les CB. Effectivement, en traction sur multifilament, le plafond de ténacité atteint à 3,7 cN/dTex serait synonyme d'une résistance en traction maximale limitée par l'énergie emmagasinée par les noirs de carbone. Le même constat est fait pendant la résistance à l'éclatement où une pression maximale est atteinte.

En revanche, pour des sollicitation progressives et prolongées comme l'abrasion, la sollicitation subie par le textile est plus progressive. Ainsi les noirs de carbone donnent à la matrice polymère renforcée la capacité de dissiper l'énergie mécanique générée par l'abrasion, réduisant la formation et la propagation des fissures de surface. En effet, les tricots en noir de carbone ont les meilleures résistances à l'abrasion. Ce constat peut également être fait lors du lavage pendant lequel a lieu une sollicitation progressive sur les tricots avec des multifilaments teints en masse. Celle-ci s'accompagne d'une dissipation de l'énergie, et finalement d'un relargage moins important. Suite à ces constats, l'hypothèse est que toutes ces énergies dissipées par les noirs de carbone mènent à une meilleure résistance à l'abrasion et un faible relargage de FFMP, à la différence des multifilaments blancs.

Etant donné que le relargage est lié à la teinture en masse, et que la littérature indique que les noirs de carbone présents dissipent de l'énergie lors des ruptures, il est intéressant d'observer ce phénomène à l'aide des énergies de rupture des multifilaments et des tricots. L'étude est alors dissociée en deux groupes : les tricots en multifilaments noirs teints en masse et les tricots en multifilaments blancs teints en jet. Ces énergies de rupture vont également venir alimenter les corrélations avec l'abrasion et le relargage et déterminer la relation finale entre ces deux grandeurs. Ces énergies qui mènent à des ruptures pour les multifilaments en traction et les tricots en éclatement ont été calculées.

3.5.4.1. ENERGIES ET ABRASION

Les multifilaments blancs sont considérés jusqu'ici comme plus tenaces, plus résistants à l'éclatement, et plus générateur de FFMP. Dans la Figure 68 ci-dessous, les énergies de rupture de ces multifilaments blancs en traction (a) et à l'éclatement (b) sont comparés à leur résistance à l'abrasion. La même relation est respectivement observée en (c) et (d) pour le groupe des multifilaments teints en masse.

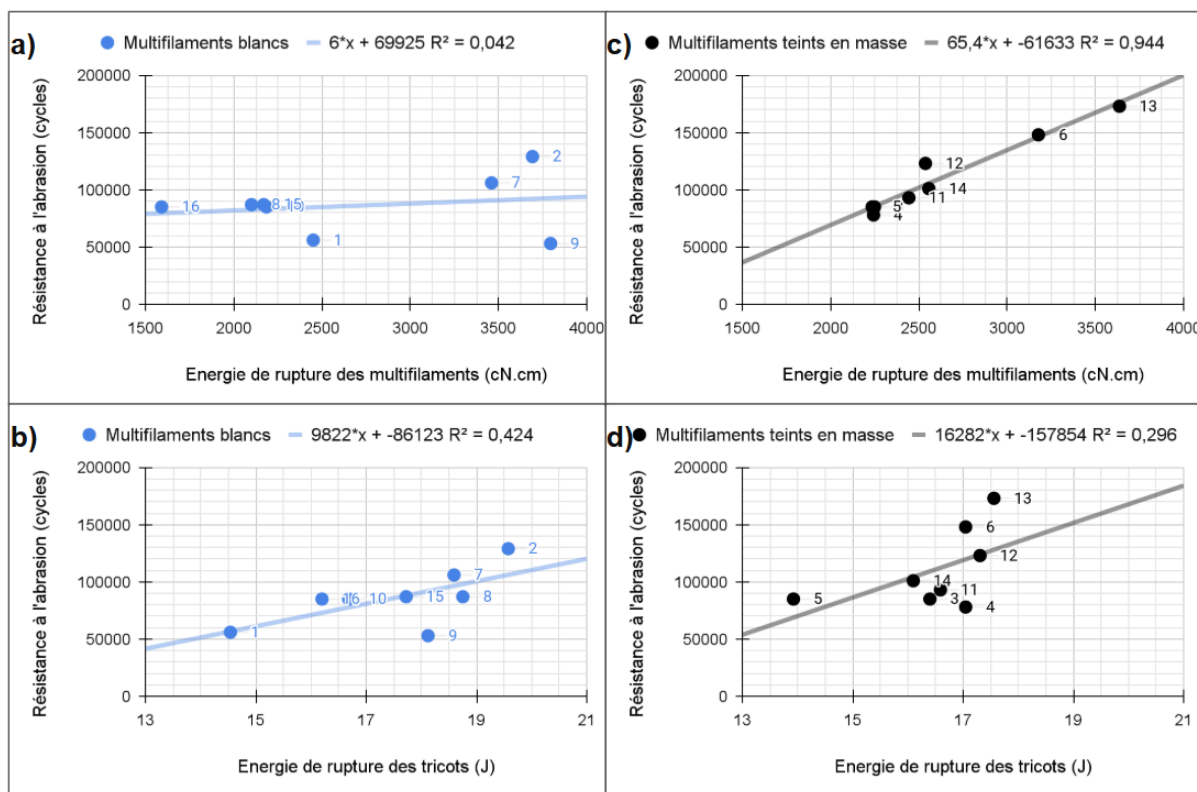


Figure 68 - Relations entre la résistance à l'abrasion des tricots et leurs énergies de rupture en fonction des multifilaments a)b) blancs ou c)d) teints en masse.

Trois observations se dégagent de ces graphiques :

- Le premier constat est un rappel : la résistance à l'abrasion des tricots avec des multifilaments teints en masse est plus élevée que celle des tricots avec des multifilaments blancs.
- Du point de vue de l'énergie de rupture à l'éclatement des tricots, les tendances avec la résistance à l'abrasion sont quasiment similaires pour les multifilaments blancs ($R^2 = 0,42$) et les multifilaments teints en masse ($R^2 = 0,3$). Pour rappel, l'abrasion est une action mécanique de surface continue avec un frottement répété en cisaillement et une compression locale. Cela se traduit par une agression directe de la surface. Ainsi, plus le tricot a une énergie de rupture élevée, plus il va résister à cette abrasion mécanique.

→ Ensuite la première relation montre que l'abrasion du tricot en multifilament blanc n'est pas liée à l'énergie de rupture du fil. Pourtant c'est totalement l'inverse qui se produit pour les tricots avec des multifilaments teints en masse. Effectivement, la distribution des points s'aligne presque parfaitement autour de la tendance linéaire d'un R^2 égal à 0,94 entre l'énergie de rupture à la traction des multifilaments teints en masse et la résistance à l'abrasion. Elle indique que plus l'énergie de rupture est importante, plus la résistance à l'abrasion augmente. A noter que pour la majorité des fils noirs cette résistance à l'abrasion est quasiment similaire autour des 85 000 cycles. Seuls les tricots 6, 12, et 13, sortent du lot avec une meilleure résistance à l'abrasion.

3.5.4.2. ENERGIES ET RELARGAGE

La Figure 69 prend toujours en compte les énergies de rupture des multifilaments blancs (a) et (b), ou des multifilaments teints en masse (c) et (d). Ces énergies de rupture sont cette fois-ci associées au relargage des tricots non-ennoblis et des tricots ennoblis.

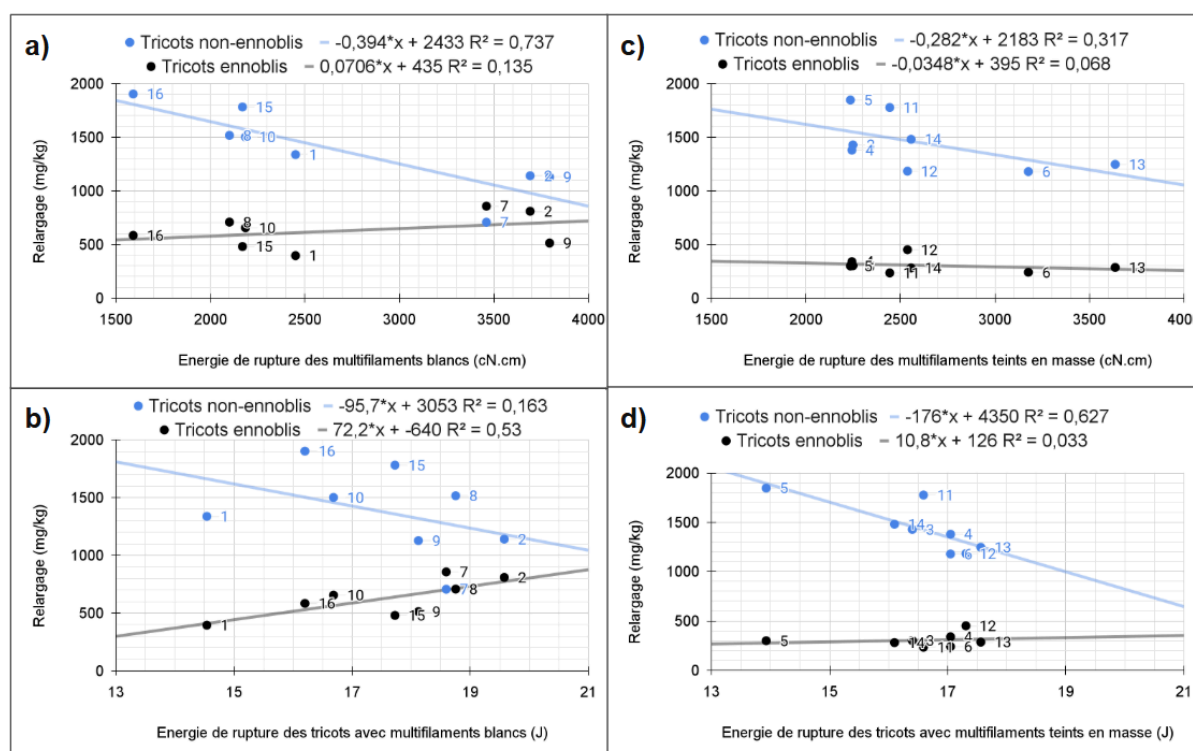


Figure 69 - Relations entre le relargage des tricots ennoblis et non-ennoblis avec leurs énergies de rupture en fonction des multifilaments a) b) blancs ou c) d) teints en masse.

Ces graphiques montrent trois relations principales :

- D'abord pour l'énergie de rupture des multifilaments, seuls les multifilaments blancs montrent une tendance claire avec le relargage des tricots non-ennoblis ($R^2 = 0,74$). Le constat est que plus l'énergie de rupture du multifilament blanc augmente, moins il y a de FFMP relargués. Cette relation entre le relargage et l'énergie de rupture des multifilaments n'est pas significative pour les tricots ennoblis avec les mêmes multifilaments, ni pour les multifilaments teints en masse.
- Du point de vue de l'énergie de rupture des tricots, les multifilaments blancs s'illustrent à nouveau. Les tricots ennoblis sont liés à l'énergie de rupture des tricots teints en jet avec des multifilaments initiaux blancs ($R^2 = 0,53$). L'agitation du bain de teinture, n'induit pas une rupture du tricot. Néanmoins, l'agitation mécanique du textile et le mouvement hydraulique sont sans doute convertis en énergie de frottement de surface sur les mailles du tricot. Ce frottement mécanique, couplé à la sollicitation hydraulique, provoque une abrasion superficielle qui libère des FFMP. Il est plausible qu'une résistance à la rupture plus élevée du multifilament ou du tricot conduise à une plus grande quantité de FFMP générées. Ce phénomène s'expliquerait par le fait qu'au lieu de subir une rupture complète, le matériau résiste aux contraintes et cède de manière progressive en libérant des fragments de surface, plutôt que de se désintégrer. Ces FFMP sont ensuite entraînées par le flux du bain de rinçage et évacuées avec l'effluent. Cette libération de FFMP expliquerait à la fois le relargage moins important des tricots ennoblis comparés aux tricots non-ennoblis, et l'influence des énergies de rupture des multifilaments et des tricots.
- Les échantillons avec des multifilaments teints en masse corréleront avec le relargage dans un seul cas. En regardant l'énergie de rupture à l'éclatement des tricots non-ennoblis cette fois-ci, le R^2 de la courbe de tendance linéaire atteint 0,63 et voit la corrélation négative suivante s'installer : plus l'énergie de rupture des tricots non-ennoblis avec des multifilaments teints en masse est élevée, moins il y a de FFMP relargués.

3.5.5. CONCLUSIONS INTERMÉDIAIRES

La première partie de ce chapitre démontrait que la chaîne de transformation textile a une influence sur le relargage avec les procédés pré-ennoblissement comme générateurs de FFMP et les traitements en voie humide comme éliminateurs de ces FFMP. Maintenant, cette deuxième partie a permis de réaliser des tests complémentaires sur les échantillons textiles pour mieux appréhender ce relargage. Il a été montré qu'il existe des corrélations positives entre le relargage de FFMP des tricotés ennoblis et la résistance à la traction des multifilaments qui les composent, ainsi qu'avec la résistance à l'éclatement des tricotés eux-mêmes. Ces tendances sont accentuées par les noirs de carbone. Ces derniers dissipent l'énergie de sollicitation en chaleur et par répartition des contraintes. Dans le cas de la traction et de l'éclatement, l'hypothèse de ces travaux est que la sollicitation est brutale ce qui explique une plus faible résistance en traction et à l'éclatement des échantillons teints en masse. Pourtant ces noirs de carbone repoussent les ruptures pour des sollicitations plus progressives comme l'abrasion ou encore le lavage. Dans ces deux cas, les multifilaments teints en masse sont les plus résistants à l'abrasion et les moins relarguants en FFMP.

Avant l'ennoblissement plus la résistance à l'abrasion est élevée, moins les tricotés non-ennoblis émettent de FFMP, et ce pour les deux catégories de multifilaments. Cependant les traitements en voie humides ont rendu la relation entre le relargage et l'abrasion plus complexe à l'échelle des tricotés ennoblis puisque les liens directs entre abrasion et relargage ne sont pas visibles. Les relations entre l'abrasion et les énergies de rupture permettent de dégager des liens indirects. Une forte corrélation positive entre l'abrasion et l'énergie de rupture des multifilaments teints en masse est relevée. Néanmoins le relargage de tricotés teints en masse est globalement faible peu importe le niveau de l'énergie de rupture des multifilaments. Ce sont les noirs de carbone qui expliquent ce lien indirect. Pour les multifilaments blancs, une faible énergie de rupture des tricotés ennoblis entraîne un faible relargage. Pourtant cette faible énergie de rupture est également liée à une faible résistance à l'abrasion. Ainsi, une résistance à l'abrasion élevée a peu d'effet sur le relargage des tricotés ennoblis avec des multifilaments teints en masse et peut même augmenter les émissions de tricotés ennoblis avec des multifilaments non-teints en masse. Ces premiers résultats montrent la complexité des liens entre les propriétés physiques des textiles et leur capacité à générer des fragments de fibres microplastiques.

4. CHAPITRE 4 - INFLUENCE DES AUTRES PROCÉDÉS TEXTILES

L'étape de filage des multifilaments est la base de la chaîne de transformation textile. Le troisième chapitre a permis de constater que les facteurs de composition des multifilaments sont déterminants sur la fragmentation des fibres. Pourtant d'autres procédés interviennent ensuite pour passer d'un multifilament à un vêtement. Ces autres procédés ont sans doute un rôle à jouer dans cette problématique. Dans ce quatrième chapitre, l'influence sur le relargage de FFMP au premier lavage des procédés de filature, de tissage, de tricotage, et de traitements de surface, sont étudiés. Un travail similaire au premier plan d'expériences avec une méthodologie identique sur les échantillons ennoblis a été mené. L'objectif est de comprendre le relargage au premier lavage lorsque le procédé étudié est mis au centre de l'équation. Autrement dit, l'idée est de cerner l'influence des facteurs de conception dans chaque procédé textile. Ces facteurs sont étudiés tour à tour de façon variable, tandis que le reste de la chaîne de valeur est fixe. Par exemple, lors de l'étude du tricotage, seuls les paramètres de tricotage sont étudiés, ils sont au cœur du dispositif et sont donc variables. En revanche, les paramètres des fils qui composent les tricots sont fixes, c'est-à-dire que le même fil est utilisé pour réaliser différents tricots. De même à la sortie de la machine de tricotage, où les différents tricots suivent un ennoblissement identique (même colorant de teinture, même vitesse de séchage, aucune finition de surface, etc ...). Ce chapitre traite donc les procédés de transformation textiles un par un selon une vue isolée.

4.1. PROCÉDÉ DE FILATURE

Dans l'ordre de la chaîne de transformation textile après l'étape de filage puis de découpe des multifilaments, le procédé de filature permet de transformer les fibres des multifilaments coupés en un fil. Ce procédé se compose de plusieurs étapes : l'ouverture des balles des fibres, le cardage, le doublage, l'étirage, la filature et le bobinage. Toutes ces étapes, décrites au chapitre 2, permettent de transformer les fibres en un fil par parallélisation des fibres, étirage et torsion en fonction des propriétés mécaniques désirées.

4.1.1. DÉVELOPPEMENT DES FILÉS DE FIBRES

Dans ce plan d'expérience, la filature est donc au cœur du dispositif. La Figure 70 décompose les étapes du procédé de filature de l'ouverture des fibres jusqu'à la filature, en passant par le cardage et le doublage-étirage. Les paramètres qui demeurent fixes dans la conception des filés de fibres sont le type de polymère qui est un fil en polyester recyclé issu de déchets bouteille RPET. Les filés de fibres contiennent du dioxyde de titane à 0,3% en masse pour avoir une semi-opacité. La garniture de la cardé utilisée est spécifique au polyester et similaire pour tous les essais. Pour chaque doublage, six rubans de cardé ont été rassemblés. Enfin la finesse et la torsion de tous les filés de fibres sont identiques avec un titre Ne 30 (soit 197 deniers ou 217 dTex équivalent à 50 Nm) et une torsion équivalente selon les types de filature. Pour être équivalente, la torsion appliquée est exprimée en angle de torsion α équivalent égal à 3,2 pour les procédés de filature traditionnels ring et siro-compact (soit 700 T/m), et 3,5 pour l'open-end. La filature airjet n'est pas exprimée en α_{eq} , pour avoir une torsion équivalente, il a été décidé de produire les filés de fibres airjet à une vitesse de 420 m/min selon le savoir-faire du fournisseur.

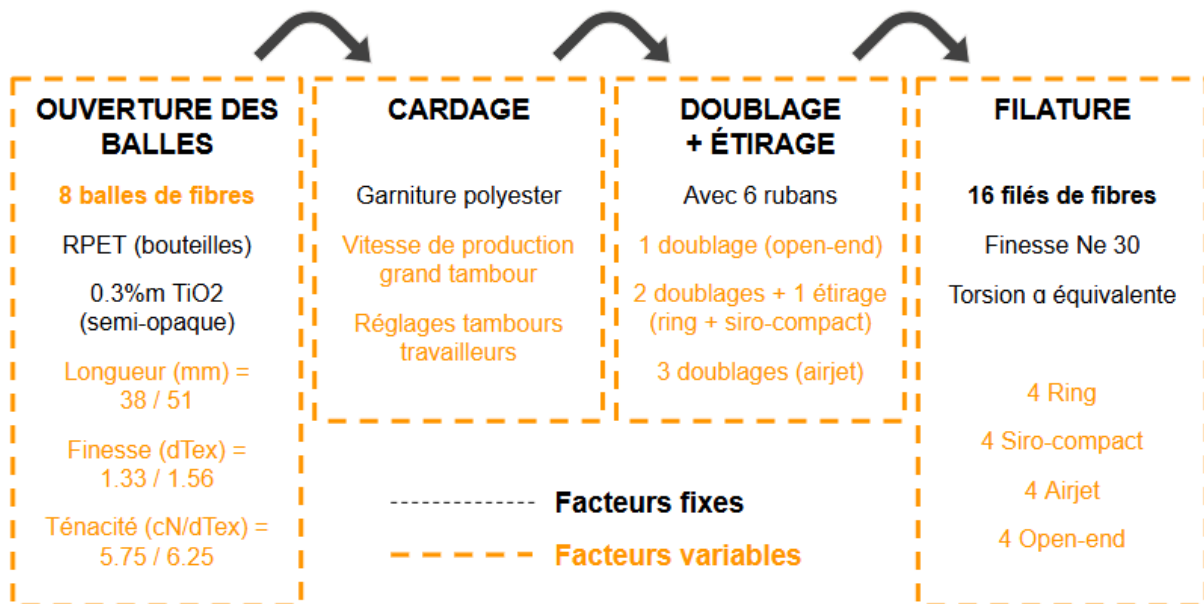


Figure 70 - Paramètres variables étudiés dans le plan d'expériences de filature.

Les autres facteurs, mentionnés en orange dans la Figure 70 précédente, sont variables, c'est-à-dire qu'ils font partie intégrante de la table Taguchi développée dans la prochaine section. Il s'agit des caractéristiques des fibres utilisées (longueur, finesse, ténacité), des réglages de cardes (vitesse, intensité), et du type de filature appliquée (ring, siro-compact, airjet, open-end) :

- La longueur des fibres : **courtes (38 mm) ou longues (51 mm)**.
- La finesse des fibres : **finies (1,33 dTex) ou moins fines (1,56 dTex)**.
- La ténacité des fibres : **standard (5,75 cN/Tex) ou haute (6,25 cN/Tex)**.
- La vitesse de production du grand tambour de la carde : **faible (60 kg/h) ou optimale (120 (kg/h))**.
- La différence des réglages de la carde (Écart entre le grand tambour et les chapeaux travailleurs de la carde et vitesse plus ou moins élevées de ces derniers) : **souple** (Grand écart et vitesse faible des chapeaux) ou **agressive** (Petit écart et vitesse élevées des chapeaux).
- Le procédé de filature : **ring, siro-compact, airjet, open-end** (pour lesquels les angle de torsion α des fibres dans les filés sont légèrement différents pour parvenir à garder la même finesse du fil en sortie du procédé de filature).

Une fois la filature effectuée, les filés de fibres sont transformés en étoffes afin de pouvoir appliquer la simulation de lavage standardisée TMC. Pour éviter toute autre modification des paramètres de production, la suite des étapes de fabrication en Figure 71 est identique pour chacun des 16 filés de fibres réalisés. D'abord ils sont tricotés en une structure de côte 1x1 selon les mêmes réglages, puis teints en noir, et enfin séchés dans des conditions identiques. Les 16 tricots ennoblis similaires composés de filés de fibres aux paramètres variés sont prêts à être testés pour quantifier le relargage de FFMP lors de leur premier lavage.

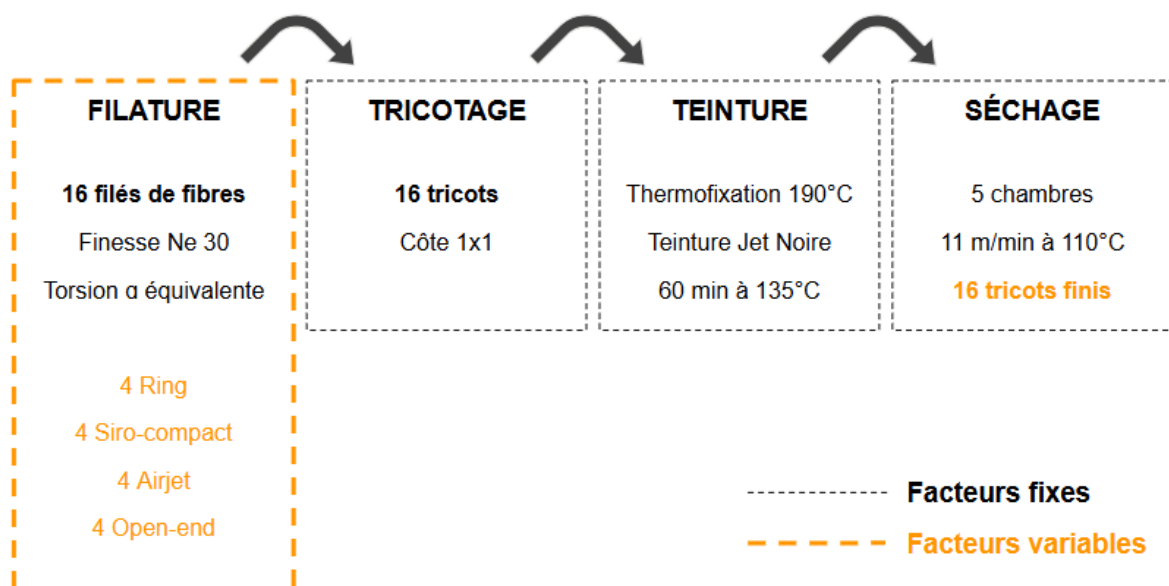


Figure 71 - Description des étapes de fabrication des filés de fibres en tricots ennoblis.

4.1.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE

Le choix des six facteurs de filature permet de mettre en place une table Taguchi L16. Elle est composée de 1 facteur à 4 niveaux (le type de filature) et des 5 autres facteurs à 2 niveaux (caractéristiques des fibres et de la carte). Cette construction représente 16 essais à effectuer pour un total de $4 \times 2^5 = 128$ combinaisons possibles. La matrice des seize essais avec les résultats de relargage associés sont explicités dans le Tableau 8 ci-dessous.

Essais	Procédé de filature	Longueur des fibres (mm)	Finesse des fibres (dTex)	Ténacité des fibres (cN/dTex)	Vitesse de carte (kg/h)	Intensité de cardage	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
1	Ring	38	1,33	5,75	60	Souple	700	122	17
2	Ring	38	1,56	5,75	60	Agressive	679	36	5
3	Ring	51	1,56	6,25	120	Souple	643	30	5
4	Ring	51	1,33	6,25	120	Agressive	579	40	7
5	Siro-compact	38	1,33	6,25	120	Souple	593	74	13
6	Siro-compact	38	1,56	6,25	120	Agressive	720	96	13
7	Siro-compact	51	1,56	5,75	60	Souple	711	104	15
8	Siro-compact	51	1,33	5,75	60	Agressive	676	38	6
9	Airjet	38	1,56	5,75	120	Souple	694	69	10
10	Airjet	38	1,33	5,75	120	Agressive	616	48	8
11	Airjet	51	1,33	6,25	60	Souple	566	16	3
12	Airjet	51	1,56	6,25	60	Agressive	503	24	5
13	Open-end	38	1,56	6,25	60	Souple	2070	98	5
14	Open-end	38	1,33	6,25	60	Agressive	1848	104	6
15	Open-end	51	1,33	5,75	120	Souple	1556	84	5
16	Open-end	51	1,56	5,75	120	Agressive	1640	76	5
Moyennes =							925	66	8

Tableau 8 - Tableau récapitulatif des relargages pour le procédé de filature

Le procédé de filature relargue en moyenne 925 mg/kg pour l'ensemble des 16 essais, avec un écart-type moyen de 66 mg/kg. Cela représente quasiment 2 fois plus de FFMP émis que le relargage moyen des multifilaments du filage, équivalent à 464 mg/kg. Ce premier résultat renforce la tendance de la littérature qui valorise les fibres longues des multifilaments pour minimiser le relargage de FFMP, plutôt que les fibres courtes des filés de fibres. Ce constat est à nuancer par la présence de deux catégories de filés de fibres en termes de relargage. Le premier se compose des résultats des procédés de filature ring, siro-compact et airjet, avec des valeurs de relargage comprises entre 503 mg/kg et 720 mg/kg pour cette douzaine d'essais. Le deuxième groupe se compose des quatre essais du procédé de filature open-end, qui ont des résultats significativement plus élevés entre 1556 et 2070 mg/kg. Ces résultats peuvent s'expliquer par la faible cohésion fournie aux fibres par le procédé de filature open-end avec seulement un doublage et aucun étirage. La moyenne du plan de 925 mg/kg est donc à nuancer avec l'apport des fils open-end qui tirent cette moyenne à la hausse. Pour une comparaison relative, la médiane de ces 16 essais se situe à 686 mg/kg. L'écart-type moyen de 66 mg/kg et un CV% moyen de 8% complètent les données statistiques.

4.1.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DE FILATURE

Avec l'aide de la méthode Taguchi, l'effet de chacun des facteurs par rapport au relargage moyen de 925 mg/kg du procédé de filature est déterminé. Autrement dit, chaque facteur de filature a obtenu en moyenne un relargage inférieur, équivalent ou supérieur à la moyenne. Cet écart avec la moyenne correspond à l'effet du facteur et est représenté en Figure 72.

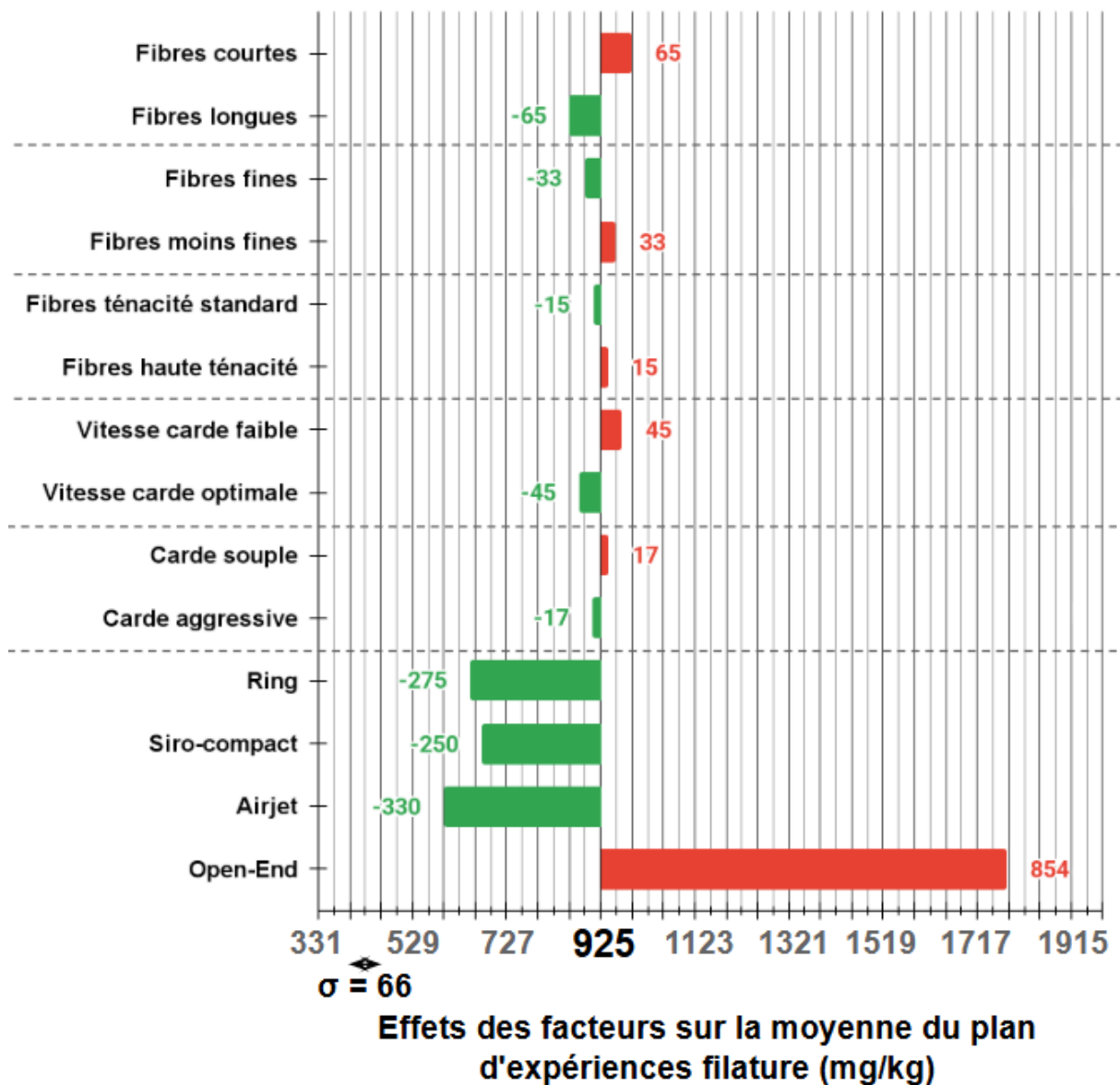


Figure 72 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de filature.

Les effets des facteurs de filature mettent avant tout en évidence la disparité entre les deux groupes cités précédemment. Les processus airjet, ring et siro-compact ont des impacts très importants sur la réduction des rejets de FFMP, en moyenne 285 mg/kg de moins que l'ensemble du plan. Cela donne un relargage moyen de 640 mg/kg pour ce groupe de filés de fibres. Tandis que le procédé open-end augmente énormément les émissions, en l'occurrence de 854 mg/kg par rapport à la moyenne. L'amplitude de ces effets dissimulent les tendances des autres facteurs. Il est tout de même important de noter que peu importe le type de filature, plus les fibres dans le fil sont longues, moins il y a de génération de FFMP. La réduction est estimée à 130 mg/kg pour des fibres de 51 mm de longueur contre des fibres de 38 mm. Ce résultat est en accord avec la littérature du chapitre 1 et prouve à nouveau que les fibres longues apportent plus de cohésion au filé de fibres bien qu'elles soient moins privilégiées par les industriels textiles.

En revanche, les effets de la finesse et de la ténacité des fibres sont négligeables car respectivement inférieurs ou égaux à la moyenne des écart-types de 66 mg/kg. C'est également le cas des deux derniers facteurs concentrés sur la carde. Les attentes auraient pu prédire qu'une vitesse ralentie et des réglages plus délicats entraîneraient moins de relargage de FFMP. Pourtant le phénomène inverse s'est produit avec une diminution du relargage grâce à une vitesse de production optimale et des réglages de carde agressifs. Cela peut s'expliquer par le fait que la carde rapide et abrasive est plus exigeante avec la matière première. Des pertes de fibres vont donc avoir lieu à cette étape, et seules les fibres d'une meilleure qualité vont constituer le ruban de carde. Ainsi ce dernier est composé de propriétés mécaniques accrues, ce qui va lui permettre de générer moins de FFMP une fois transformé en filé de fibres, puis en tricot.

Le relargage de FFMP de tricots similaires composés de filés de fibres variés est donc influencé par les paramètres du procédé de filature lui-même. Il est possible d'aller plus loin en analysant si les caractéristiques intrinsèques des filés de fibres et des tricots sont aussi corrélées avec les émissions de FFMP.

4.1.2.2. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES

Maintenant que le lien entre le procédé de filature et le relargage est avéré, il est intéressant de déterminer si d'autres caractéristiques des textiles peuvent aussi avoir un lien avec les émissions de FFMP. Dans ce sens, la Figure 73 oppose les filtres du test TMC des filés de fibres ring - siro-compact - airjet qui sont similaires aux filtres open-end. De manière générale, les filtres issus des échantillons en filature ring, siro-compact, ou airjet sont semblables, ils possèdent des fragments de fibres visibles à leurs surfaces sur un fond grisé. Tandis que les filtres des échantillons en filature open-end sont bouchés par les fragments de fibres : le filtre semble saturé visuellement. Cette observation est complétée par des images des fragments de fibres au microscope optique. Les fragments observés pour les échantillons ring - siro-compact - airjet sont sous forme de filaments. Ces derniers sont aussi visibles à partir des filtres open-end mais sont accompagnés de FFMP de tailles beaucoup plus petites équivalant à des poussières.

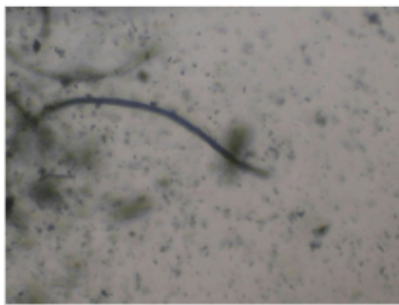
Cas des tricot en filés de fibres ring - siro-compact - airjet	Cas du tricot en filés de fibres open-end
<u>Visuel du filtre obtenu après lavage standardisé TMC</u> 	<u>Visuel du filtre obtenu après lavage standardisé TMC</u> 
<u>Image microscopique des fragments prélevés sur le filtre</u>  x40	<u>Image microscopique des fragments prélevés sur le filtre</u>  x40

Figure 73 - Exemples de deux filtres issus de tricot en filés de fibres après le lavage standardisé TMC.

Ces données exploitées avec les autres airjet, les ring, et les siro-compact, montrent que le relargage est maximal pour une tension de fil comprise entre 7 et 10 cN. A l'inverse, le relargage est minimisé sous les 650 mg/kg pour des valeurs de tensions inférieures à 7 cN ou supérieures à 10 cN. Une courbe de tendance d'équation polynomiale d'un R^2 supérieur à 0.93 permet de confirmer cette tendance.

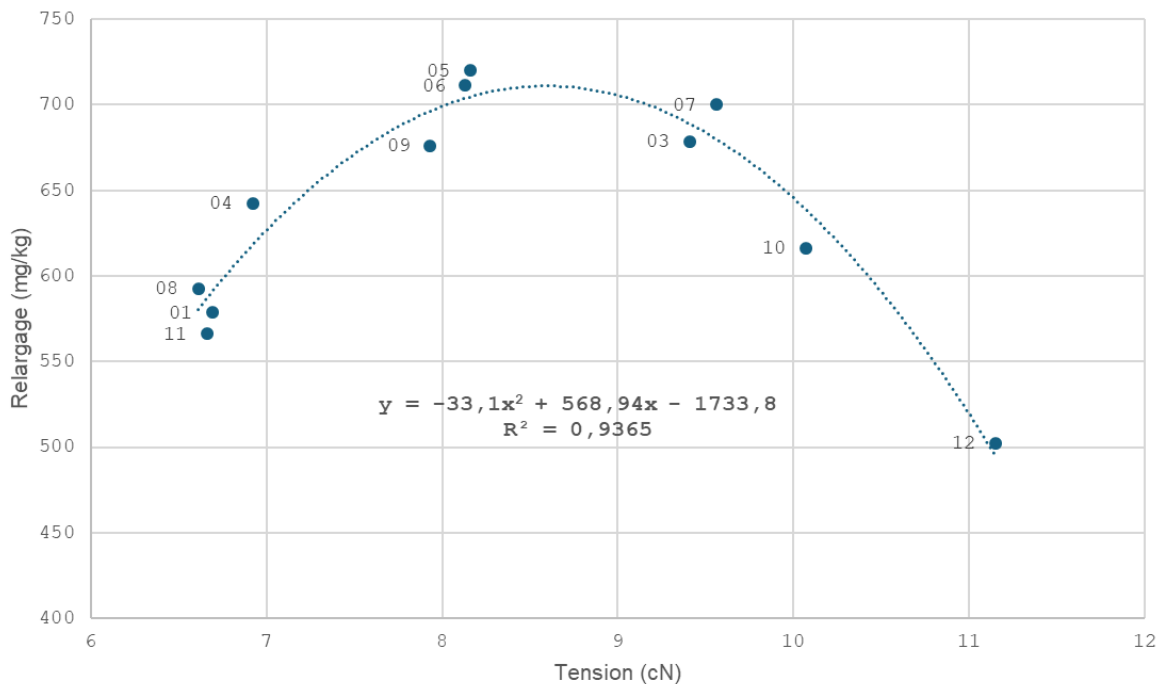


Figure 75 - Corrélation entre la tension des filés de fibres et le relargage de FFMP.

A l'échelle des tricots obtenus à partir des seize filés de fibres, de faibles corrélations apparaissent entre le relargage et certaines propriétés textiles. Il s'agit de la masse surfacique (coefficient de Pearson = 0,72, $p = 0,002$), la résistance à l'éclatement (coefficient de Pearson = -0,56, $p = 0,024$), et l'abrasion de surface (coefficient de Pearson = -0,71, $p = 0,002$). Mais ces tendances sont à nouveau dictées par les performances des filés de fibres open-end. C'est le cas dans la Figure 76, où la résistance à l'abrasion des tricots en filés de fibres open-end est moins bonne et plus relarguante. D'autant plus que le groupe de résultats sur les ring - siro-compact - airjet ne semble pas s'aligner le long de cette régression linéaire.

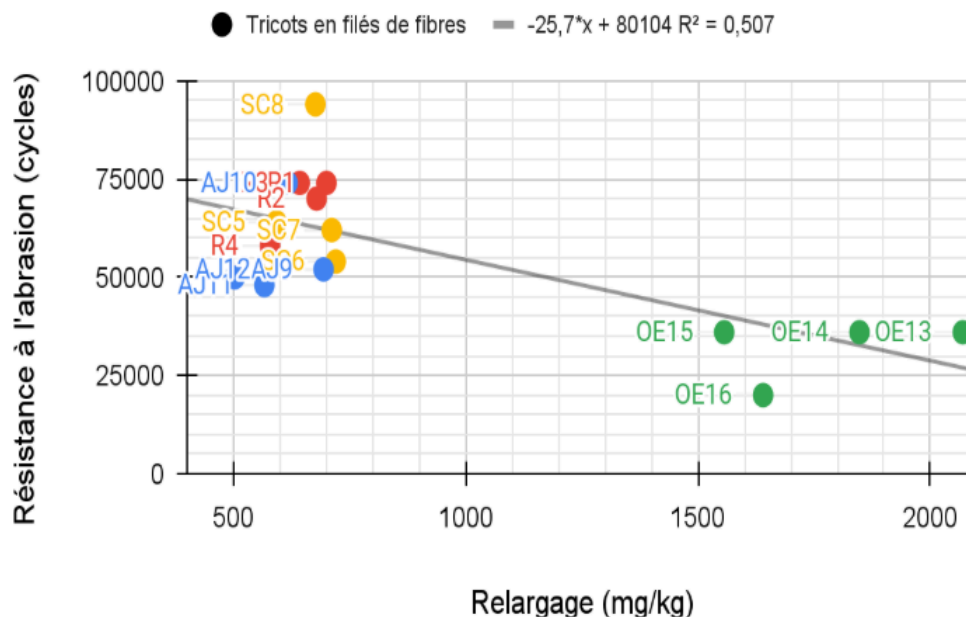


Figure 76 - Corrélation entre l'abrasion en surface des tricots et leur relargage.

4.1.3. SYNTHÈSE - INFLUENCE DE LA FILATURE SUR LE RELARGAGE

Ainsi le plan d'expériences sur la filature a permis d'étudier 16 filés de fibres aux propriétés variées. Pourtant le nombre de combinaisons totales entre tous les niveaux des facteurs est de 128 (ici 4×2^5). L'influence de chaque facteur de filature sur le relargage est maintenant connue dans les conditions expérimentales définies. Grâce à cette analyse, le plan complet de Taguchi est déterminé pour estimer les 128 combinaisons possibles et leurs relargages associés. En l'occurrence :

- Le filé de fibres avec le relargage minimum de **445 mg/kg** est composé de :
 - **Fibres longues, fines, et de ténacité standard - Carde agressive avec une vitesse optimale - Filature Airjet**
- Le filé de fibres avec le relargage maximum de **1997 mg/kg** est composé de :
 - **Fibres courtes, moins fines, et de haute ténacité - Carde souple avec une vitesse faible - Filature Open-end**

Ces estimations minimales et maximales du relargage de FFMP par une structure en filés de fibres montrent que le procédé de filature a donc une influence sur le relargage de FFMP. Le facteur déterminant est le type de filature utilisé avec les filatures airjet - ring - siro-compact qui minimisent le relargage, en opposition avec la filature open-end. L'utilisation de fibres longues est également un facteur significatif secondaire pour diminuer le relargage. Concernant les propriétés des filés de fibres, une mauvaise résistance en abrasion fil-fil peut indiquer un relargage de FFMP accru.

4.2. PROCÉDÉ DE TRICOTAGE

Maintenant que l'influence des fils sur le relargage a été étudiée, la prochaine étape de la chaîne de transformation textile est la fabrication des étoffes. A partir du même fil, plusieurs étoffes différentes sont développées. Dans cette partie, les étoffes sont les tricots. L'objectif est de déterminer l'influence du procédé de tricotage sur le relargage de FFMP.

4.2.1. DÉVELOPPEMENT DES TRICOTS

Afin de produire des tricots comparables, le même fil est utilisé. Il s'agit d'un multifilament avec des caractéristiques standards étudiées précédemment : polyester recyclé, DPF proche de 1 denier (car la finesse du fil est de 75 dTex pour 72 filaments), semi-opaque, fort entremêlement, et texturation DTY. A partir de ce même fil, 9 tricots circulaires et 8 tricots indémaillables sont produits. Il y a donc deux plans d'expériences Taguchi, un pour chaque procédé de tricotage. La Figure 77 décrit le flux de procédé étudié avec les variations en tricotage. Dans les deux plans, les facteurs étudiés sont les structures, les tensions appliquées, et les vitesses de production. Une fois les tricots réalisés, ils sont teints en noir de la même manière en cuve jet puis séchés dans les mêmes conditions.

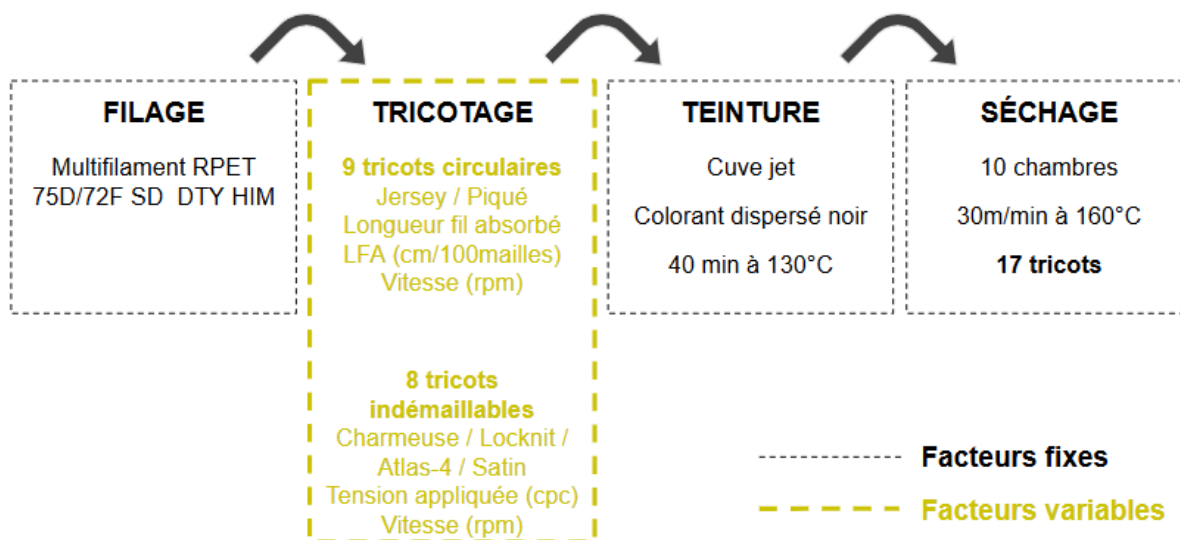


Figure 77 - Paramètres fixes et variables étudiés dans les plans d'expériences des procédés de tricotage circulaire et indémaillable.

4.2.1.1. TRICOTS CIRCULAIRES

Le premier plan d'expériences étudie le procédé de tricotage circulaire. La machine utilisée est la même pour tous les essais. C'est un métier simple fonture avec une jauge de 28 aiguilles par pouces adaptée au titre du multifilament utilisé. Il a été nettoyé pour éviter les pollutions, puis lubrifié pour faciliter le passage des fils et il possède des aiguilles fonctionnelles. Les paramètres variables étudiés lors du tricotage circulaire composent une table Taguchi L9 considérant 3 facteurs à 3 niveaux avec :

- La longueur de fil absorbée LFA : **élevée (33 cm pour 100 mailles), moyenne (28,5 cm pour 100 mailles) ou faible (24 cm pour 100 mailles).**
- Les structures de mailles simple fonture détaillées dans le Tableau 9 : **un jersey et deux piqués.**
- La vitesse de rotation du métier circulaire : **optimale (25 tours/min), moyenne 20 tours/min, ou faible (15 tours/min).**

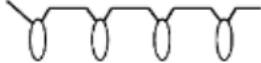
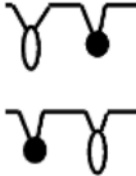
JERSEY	PIQUE 1	PIQUE 2
		

Tableau 9 - Schémas de maille simple fonture étudiés.

4.2.1.2. TRICOTS INDÉMAILLABLES

Le second plan d'expériences Taguchi étudie le tricotage indémaillable. A nouveau, la même machine est utilisée pour l'ensemble des essais. C'est une machine de type Tricot avec un tirage vers l'avant, composée de deux barres guides, avec une jauge de 28 aiguilles par pouces adaptée au titre du multifilament utilisé. Elle a été nettoyée pour diminuer les risques de pollutions, puis lubrifiée pour réduire les frottements sur le fil, et les aiguilles utilisées sont opérationnelles. Les paramètres étudiés dans le procédé de tricotage indémaillable sont intégrés dans une table Taguchi L8. Elle est composée d'un facteur à quatre niveaux et de deux facteurs à deux niveaux. Sont pris en considération :

- La structure de tricotage présentée dans le Tableau 10 : **Charmeuse (aussi appelé locknit), Atlas-4, Tricot stitch, ou Satin.**
- La vitesse de rotation du métier à tricoter : **optimale (1800 tours/min) ou faible (1200 tours/min).**
- Le tirage sur le tricot lors de son enroulement : **fort (26 mailles/cm) ou faible (13 mailles/cm).**

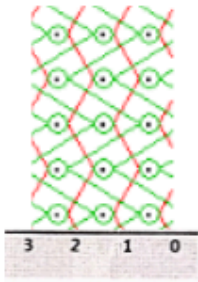
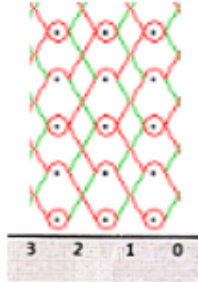
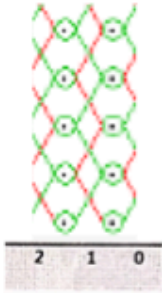
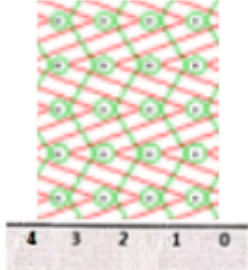
CHARMEUSE (Locknit)  1-0 / 2-3 // (vert) 1-2 / 1-0 // (rouge)	ATLAS-4  1-0 / 1-2 / 2-3 / 2-1 // (rouge) 2-3 / 2-1 / 1-0 / 1-2 // (vert)
TRICOT STITCH  1-0 / 1-2 // (rouge) 1-2 / 1-0 // (vert)	SATIN  1-0 / 3-4 // (rouge) 1-2 / 1-0 // (vert)

Tableau 10 - Schémas de maille verticaux réalisés sur deux barres guides.

4.2.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE

4.2.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DU TRICOTAGE CIRCULAIRE

Dans le cas du procédé de tricotage circulaire, l'étude comporte trois facteurs à trois niveaux. Ils composent une table Taguchi de neuf essais à réaliser pour un total de $3^3 = 27$ combinaisons possibles. Une fois fabriqués, les neuf tricots sont soumis à la simulation laboratoire TMC de quantification de FFMP au premier lavage. Les relargages de chacun, ainsi que les écarts-types et les coefficients de variations associés aux 8 éprouvettes de chaque tricot sont présentés dans le Tableau 11.

Essais	Longueur de fil absorbé LFA (cm/100mailles)	Structure	Vitesse (tr/min)	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
1	33	Jersey	25	319	59	19
2	33	Piqué 1	20	344	70	20
3	33	Piqué 2	15	469	44	9
4	28	Jersey	20	600	137	23
5	28	Piqué 1	15	539	148	28
6	28	Piqué 2	25	443	74	17
7	24	Jersey	15	559	112	20
8	24	Piqué 1	25	366	50	14
9	24	Piqué 2	20	520	82	16
Moyennes =				462	86	18

Tableau 11 - Table L9 Taguchi complétée avec les facteurs de tricotage circulaire et leurs résultats de relargage de FFMP.

L'ensemble de ces neuf essais indique un relargage de FFMP moyen de 462 mg/kg pour un écart-type moyen de 86 mg/kg et un coefficient de variation moyen de 18%. Ces neuf résultats sont sensiblement proches du premier plan d'expériences orienté sur les multifilaments. En effet, ils avaient été tricotés en interlock avec une machine double fonture, où le relargage moyen mesuré était de 464 mg/kg. Cela signifie que peu importe la structure, le relargage moyen des tricots circulaires en multifilaments est du même ordre de grandeur. En comparant individuellement les essais, cette tendance se confirme car le minimum de relargage est de 319 mg/kg contre 600 mg/kg pour le maximum, sachant que tous les deux sont obtenus par une structure jersey. La méthode Taguchi permet de remonter à l'effet de chaque facteur sur le relargage en Figure 78 afin de voir si cette tendance sur les structures se confirme, et si les autres facteurs sont plus significatifs.

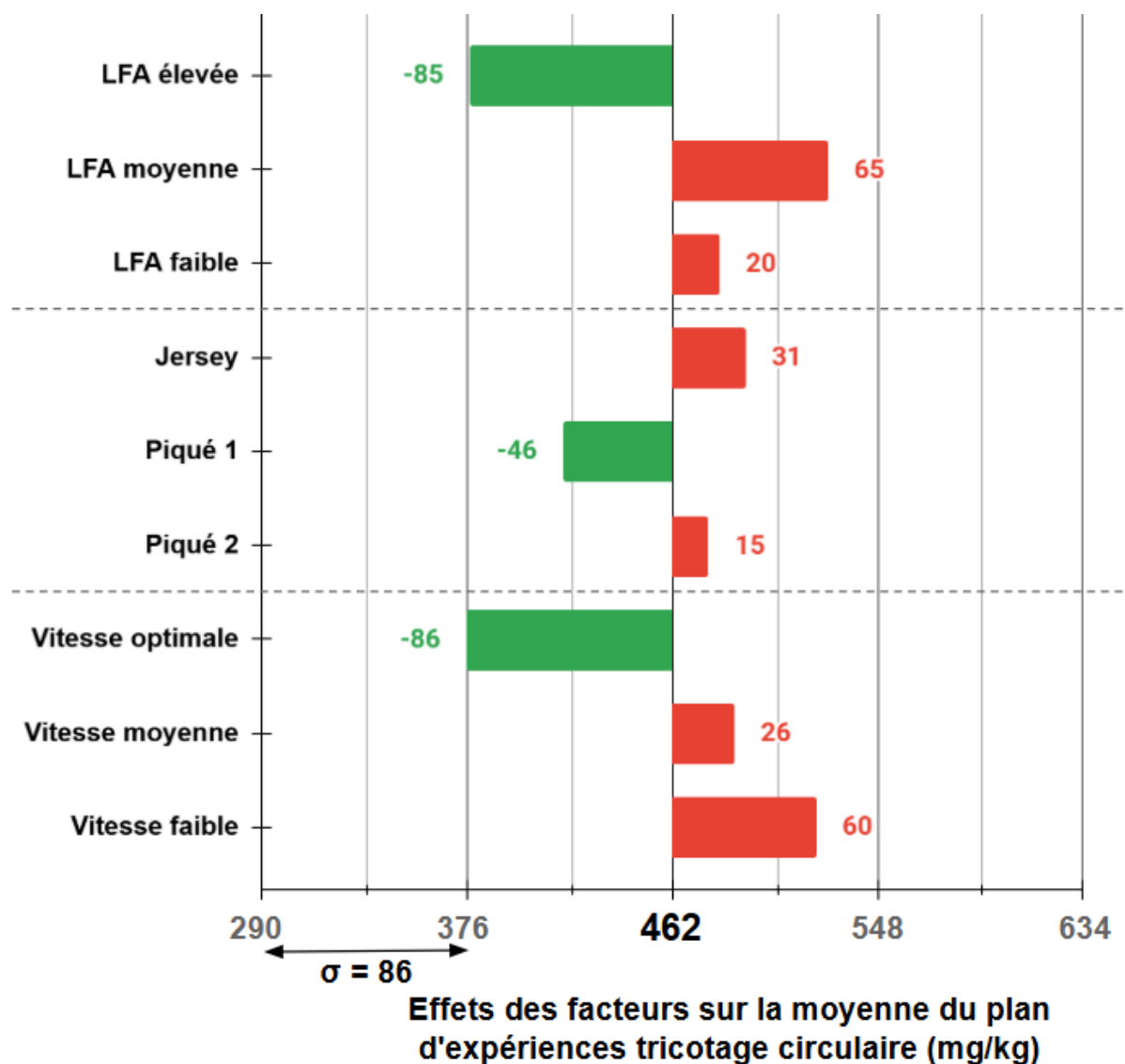


Figure 78 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tricotage circulaire.

Cette figure montre que les mêmes ordres de grandeur de relargage sont atteints peu importe les facteurs qui composent le tricot circulaire. Les effets des facteurs sont au même niveau voir inférieurs à l'écart-type moyen des résultats de relargage de 86 mg/kg. A noter que deux effets tirent tout de même le relargage à la baisse : la longueur de fil absorbée à un niveau élevé et la vitesse de rotation du métier à un niveau optimal. Ces facteurs entraînent respectivement une réduction moyenne de 85 et 86 mg/kg sur le relargage de FFMP issus des tricots circulaires, soit du même rang que l'écart-type moyen.

Lorsque la longueur de fil absorbé LFA est élevée, cela signifie qu'il y a plus de fils utilisés pour parcourir un nombre de mailles identique, le tricot final devient donc plus lâche. Cette observation contredit la littérature initiale qui annonçait que les structures denses relarguent moins car elles sont plus serrées. Pourtant, ce phénomène peut aussi s'expliquer par le fait que moins de tension est appliquée sur les fils avec une LFA plus élevée, ce qui pourrait diminuer les frottements et laisser plus de mouvements aux fils. Néanmoins cette relation n'apparaît pas linéaire mais semble plus complexe au regard des deux autres niveaux de LFA.

La diminution du relargage de -86 mg/kg grâce à une vitesse de rotation optimale est également un résultat surprenant. Pourtant c'est bien l'observation faite, avec une certaine linéarité au regard des deux autres niveaux à +26 mg/kg pour une vitesse moyenne, et +60 mg/kg pour une vitesse faible. Ainsi la vitesse optimale signifierait que les frottements entre le fil et les aiguilles sont plus brefs et qu'ils sont adaptés au paraffinage des fils, ce qui permet de les préserver et donc de diminuer le relargage de FFMP, bien que les attentes sur ce paramètre étaient inverses.

Enfin, pour revenir sur les différentes structures de tricotage étudiées, le constat est que ce facteur est sous l'écart-type moyen donc moins influent sur le relargage de FFMP que les LFA ou les vitesses. Les effets des jerseys (+ 31 mg/kg), des piqués 1 (-46 mg/kg) et des piqués 2 (+15 mg/kg) sur le relargage de FFMP sont plus centrés autour de la moyenne. Le relargage est donc équivalent peu importe la structure tricotée. Pourtant le piqué 1 s'oriente vers une réduction du relargage et cela peut s'expliquer par les charges qui le composent une aiguille sur deux (contre une aiguille sur quatre pour le piqué 2 et aucune charge pour le jersey). Le rôle de ces charges dans le tricot est de permettre plus de flexibilité aux fils dans la structure. A noter que le frottement avec l'aiguille est absent également. Ces deux aspects du piqué deviennent des atouts pour diminuer légèrement le relargage de FFMP. Il reste à déterminer si ces constats sur les tricots circulaires concernant les structures, tensions, et vitesses, sont aussi transposables aux tricots indémaillables.

4.2.2.2. INFLUENCE DES FACTEURS DU TRICOTAGE INDÉMAILLE

Le procédé de tricotage indémaillable est étudié selon trois facteurs : quatre structures différentes, deux tensions appliquées, et deux vitesses de production. Ces facteurs composent donc les huit tricots indémaillables à réaliser, pour un total de 4×2^2 soient 16 combinaisons possibles. Une fois produits, les relargages associés aux 8 éprouvettes de tricot sont intégrés au Tableau 12.

Essais	Structure	Vitesse (tr/min)	Tirage (mailles/cm)	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
1	Charmeuse	1800	26	144	47	33
2	Charmeuse	1200	13	126	28	22
3	Atlas-4	1800	26	123	23	18
4	Atlas-4	1200	13	200	37	18
5	Tricot stitch	1800	13	218	49	23
6	Tricot stitch	1200	26	129	19	15
7	Satin	1800	13	161	31	19
8	Satin	1200	26	89	18	20
Moyennes =				149	31	21

Tableau 12 - Table L8 Taguchi complétée avec les facteurs de tricotage indémaillable et leurs résultats de relargage de FFMP.

L'ensemble de ces huit essais indique un relargage de FFMP moyen de 149 mg/kg. Ce résultat est considéré comme relativement faible, car trois fois inférieur au relargage moyen des tricotés circulaires. Cela peut s'expliquer par le fait que la tension et les frottements sont répartis entre tous les fils de l'ensouple, en comparaison du tricotage circulaire où un seul fil passe dans toutes les aiguilles. L'écart-type moyen est de 31 mg/kg et le coefficient de variation moyen est de 21%. Ces écarts raisonnables indiquent que les effets des facteurs restent proches de la moyenne, comme l'indique la Figure 79.

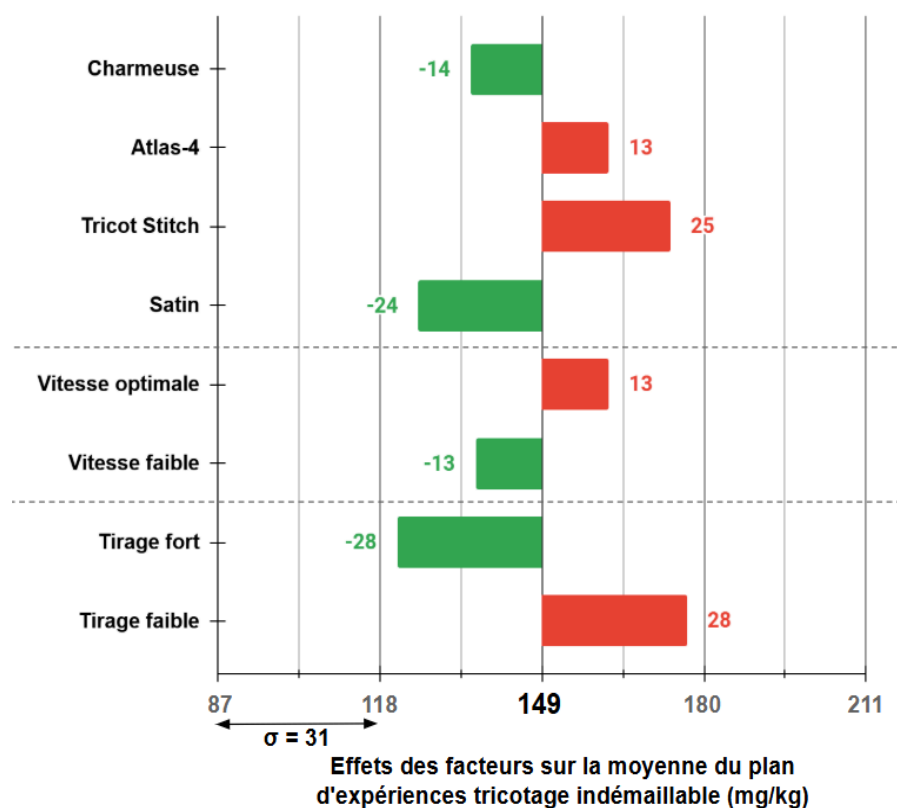


Figure 79 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tricotage indémaillable.

Le premier constat est que les facteurs ne sont pas significatifs devant l'écart-type moyen des résultats de relargage de 31 mg/kg. Cela montre que les mêmes ordres de grandeur de relargage sont atteints peu importe les caractéristiques du tricot indémaillable.

Quelques indications peuvent tout de même être comprises dans le détail des effets des facteurs. La vitesse de production est la moins influente sur le relargage de FFMP, bien qu'une vitesse plus faible semble minimiser le phénomène. Le tirage appliqué et les structures utilisées sont des facteurs légèrement plus influents, au niveau de l'écart-type moyen.

Le tirage fort tend à diminuer le relargage moyen de -28 mg/kg. L'effet inverse est observé pour le tirage plus faible. Le tirage fort implique que le tricot est composé de plus de mailles au centimètre. Le tricot obtenu serait donc plus élastique et déformable. Ces attributs lui permettent de mieux se mouvoir lors des sollicitations et de générer moins de FFMP au lavage.

L'atlas et le tricot stitch augmentent le relargage moyen respectivement de +13 et +25 mg/kg. Le point commun entre ces deux structures est qu'elles transposent les fils d'une colonne de maille à la colonne voisine directe. A l'inverse, la charmeuse et le satin réduisent le relargage moyen respectivement de -14 et -24 mg/kg. Ces structures sont similaires aux deux précédentes pour un de leur fil avec le même mouvement d'une barre guide en alternance entre deux colonnes voisines. Mais leur autre fil se déplace d'une colonne de mailles à celle d'après la colonne voisine. C'est encore plus marqué dans la structure satin, et cela minimise le relargage de FFMP. Le fil passe dans moins d'aiguilles et le tricot est ainsi plus mobile. Cela pourrait être lié à l'observation de la charge dans les tricots circulaires en structure piqué.

4.2.2.3. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES

Après avoir réalisé les tests qualité sur les tricotés circulaires et indémaillables à la sortie de la chaîne de production, les corrélations de Pearson deux à deux ont été calculées. Pour les tricotés indémaillables, les coefficients obtenus mettent en évidence des relations linéaires principalement entre le relargage (mg/kg) et la masse surfacique en g/m² (coefficients de Pearson = -0,88, p = 0,021), la laize en cm (coefficients de Pearson = 0,85, p = 0,028) et l'élongation (%) en traction en sens trame (coefficients de Pearson = 0,79, p = 0,039). Pour les tricotés circulaires, les principales relations linéaires sont observées entre le relargage (mg/kg) et les élongations (%) obtenues en traction en sens trame également, mais aussi en sens chaîne, avec des coefficients de Pearson respectifs de 0,75 (p = 0,055) et -0,64 (p = 0,037).

La Figure 80 met en évidence les relations linéaires entre le relargage de FFMP par les tricotés lors du premier lavage et leur masse surfacique (en g/m²). Le premier constat est que les deux procédés n'ont pas du tout les mêmes propriétés en termes de masses surfaciques. Les tricotés circulaires sont très légers avec des masses surfaciques comprises entre 47 et 72 g/m², tandis que les tricotés indémaillables sont plus lourds entre 131 et 203 g/m². De plus, les masses surfaciques des tricotés circulaires ne corréleront pas avec le relargage, à l'inverse des tricotés indémaillables. En effet, les tricotés indémaillables plus lourds relarguent moins de FFMP que les tricotés indémaillables plus légers. Cette tendance est d'ailleurs confirmée par un R² de 0,78.

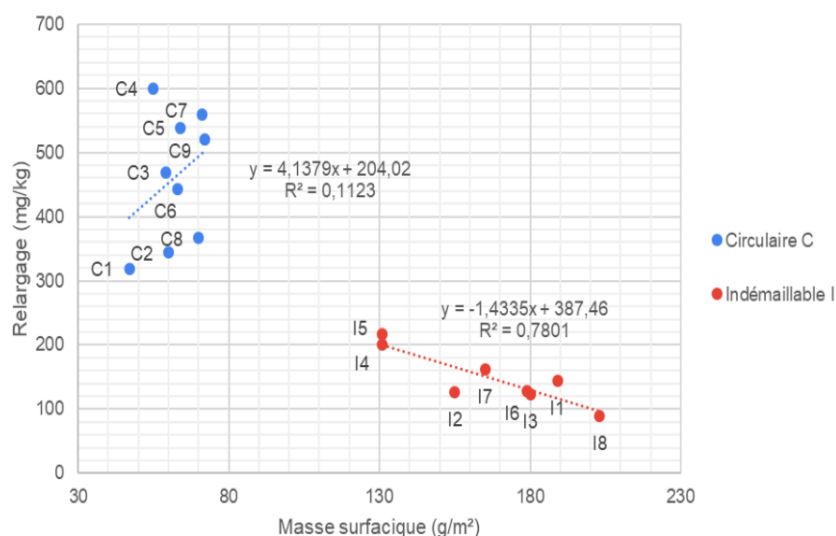


Figure 80 - Corrélation entre le relargage des tricotés et leur masse surfacique.

Les laizes des tricotés circulaires et indémaillables sont davantage regroupées en Figure 81. Pourtant seules celles des tricotés indémaillables corréleront avec le relargage. La relation linéaire indique que plus la laize est petite, plus le relargage de FFMP est faible. Le R^2 associé à cette tendance est cette fois-ci de 0,71.

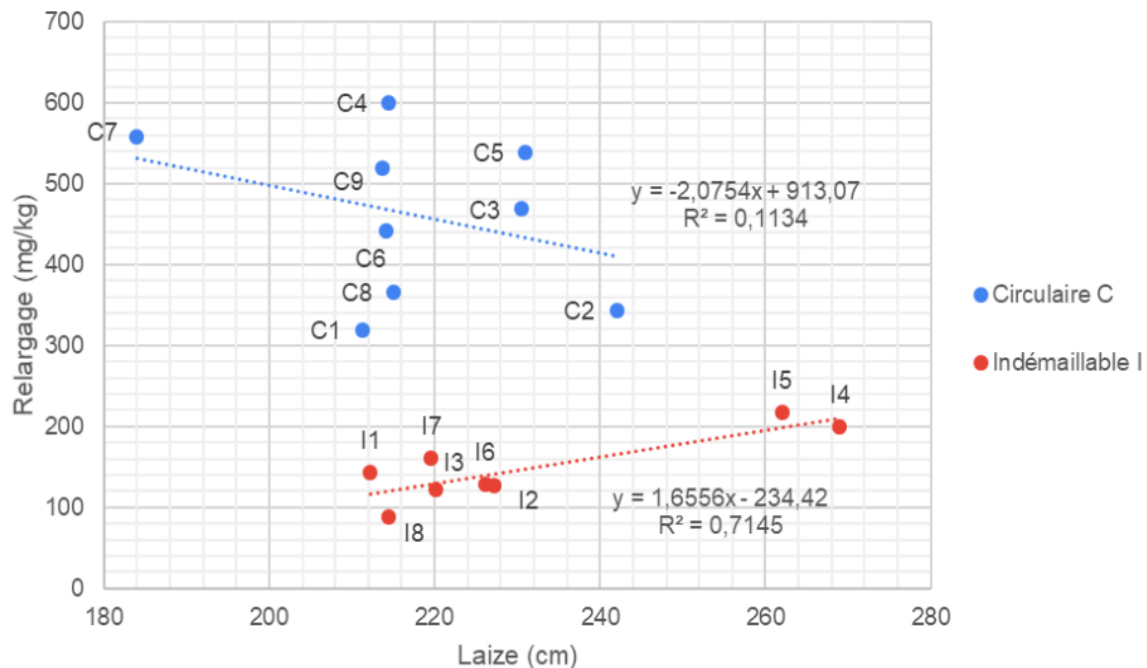


Figure 81 - Corrélation entre le relargage des tricotés et leur laize.

Enfin, le test de traction des tricotés donne des relations importantes notamment pour l'élongation en sens chaîne (Figure 82 a) et en sens trame (Figure 82 b). Dans le sens trame, on observe une relation linéaire positive pour les tricotés indémaillables ($R^2 = 0,63$), tandis que la tendance est négative pour les tricotés circulaires ($R^2 = 0,41$). Autrement dit, les tricotés indémaillables les moins déformables avant leur rupture en traction trame relarguent moins que les tricotés indémaillables les plus déformables. A l'inverse, les tricotés circulaires les moins relarguants sont aussi les plus déformables en traction dans le sens trame. Lorsque le même test de traction est réalisé dans le sens chaîne, aucune corrélation n'est observée avec les tricotés indémaillables. En revanche, la relation linéaire existe avec les tricotés circulaires. Celle-ci est positive, les tricotés circulaires moins déformables en traction sens chaîne sont moins relarguants.

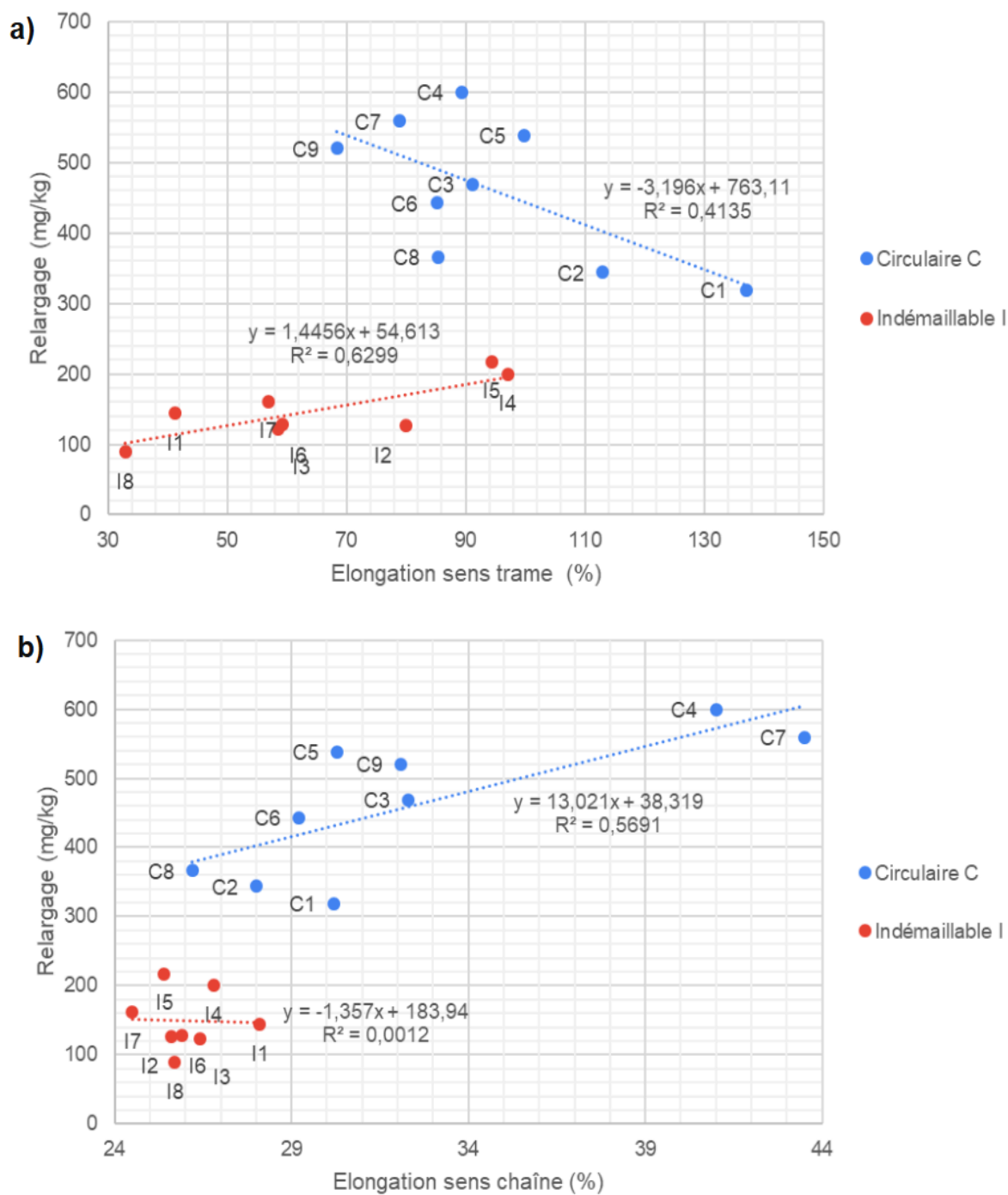


Figure 82 - Corrélation entre le relargage des tricots et l'élongation en traction dans les sens a) trame et b) chaîne.

4.2.3. SYNTHÈSE - L'INFLUENCE DU TRICOTAGE SUR LE RELARGAGE

Le plan d'expériences sur le tricotage a permis d'étudier 9 tricots circulaires et 8 tricots indémaillables aux propriétés variées. Pourtant le nombre de combinaisons totales entre tous les niveaux des facteurs est de 27 (3^3) pour les tricots circulaires et de 16 (4×2^2) pour les tricots indémaillables. L'influence de chaque facteur de tricotage sur le relargage est maintenant connue dans les conditions expérimentales définies. Grâce à cette analyse, il est possible de déterminer le plan complet de Taguchi pour estimer les 27 et 16 combinaisons possibles et leurs relargages estimés associés. Parmi elles :

- Le tricot circulaire au relargage minimum de **245 mg/kg** est composé de :
 - **Longueur de fil absorbé LFA élevée, dans une structure type piqué 1, sur une machine tournant à une vitesse optimale.**
- Le tricot circulaire au relargage maximum de **618 mg/kg** est composé de :
 - **Longueur de fil absorbé LFA moyenne, dans une structure type jersey, sur une machine tournant à une vitesse faible.**
- Le tricot indémaillable au relargage minimum de **85 mg/kg** est composé de :
 - **Fibres longues, fines, et de ténacité standard - Carde agressive avec une vitesse optimale - Filature Airjet**
- Le tricot indémaillable au relargage maximum de **214 mg/kg** est composé de :
 - **Fibres courtes, moins fines, et de haute ténacité - Carde souple avec une vitesse faible - Filature Open-end**

Ces estimations indiquent que le procédé de tricotage a une influence sur le relargage de FFMP lors du premier lavage. En comparant les deux procédés de tricotage entre eux : le tricotage indémaillable est trois fois moins émetteur de FFMP que le tricotage circulaire. Cependant les facteurs intrinsèques à chaque procédé de tricotage n'ont pas d'effet majeur sur le relargage au regard des écarts-types. Cette information indique qu'à ce stade de la chaîne de transformation textile, les procédés de fabrication des fils semblent plus influents sur le relargage de FFMP. En termes de propriétés corrélées au relargage, l'élongation obtenue au test de traction est une bonne indication du relargage potentiel des tricots circulaires. Tandis que la masse surfacique des tricots indémaillables donne une indication sur leur capacité à générer des FFMP.

4.3. PROCÉDÉ DE TISSAGE

Une autre façon de transformer les fils en étoffes est de les entrecroiser pour fabriquer des tissus. Dans cette partie, le procédé de tissage est au cœur du plan d'expériences Taguchi afin de comprendre son influence sur la génération de FFMP au premier lavage.

4.3.1. DÉVELOPPEMENT DES TISSUS

Dans l'idée de comparer les différents tissus déterminés à l'aide du plan d'expériences, le même fil est utilisé. Il s'agit du même multifilament utilisé que celui pour réaliser les tricotés de la section précédente. Il est donc composé de polyester recyclé, d'une finesse de 75 deniers pour 72 filaments soit un DPF de 1 environ (75D / 72F), d'une semi-opacité, d'un fort entremêlement, et il possède une texturation DTY. A partir de ce même fil, dix-huit tissus sont réalisés. Une petite précision est nécessaire, en réalité les dix-huit tissus utilisent ce multifilament en tant que fil de chaîne, 9 d'entre eux l'utilisent également en trame, or les 9 autres utilisent un fil de trame différent. Afin de comparer l'influence du DPF en trame, un multifilament en polyester de 75 deniers aussi mais avec le double de filaments, soient 144 (75D / 144F) est utilisé. En effet, le DPF a été un résultat significatif du premier plan d'expériences sur les multifilaments tricotés, il est intéressant de voir ce qu'il en est en trame des tissus. Avec ces deux multifilaments, quatre facteurs de tissage sont étudiés :

- L'armure de tissage : **toile, ottoman, ou satin 3/1**. Les motifs élémentaires de tissage associés sont illustrés dans le Tableau 13. Une case noire représente le fil de chaîne en surface et une case blanche représente le fil de trame en surface. Lorsque l'un est en surface, l'autre est sur l'envers. Dans l'armure toile, le fil de trame s'entrecroise avec chaque fil de chaîne. Même principe dans l'armure ottoman, sauf tous les dix passages du fil de trame où il y a une répétition. Pour le satin, il y a davantage de flottés, c'est-à-dire plusieurs fils de chaîne consécutifs où le fil de trame ne s'entrecroise pas.
- La densité de fils en chaîne : **faible (40 fils/cm) ou forte (60 fils/cm)**.
- La densité de fils en trame : **faible (25 fils/cm), moyenne (30 fils/cm), ou forte (35 fils/cm)**.
- La vitesse d'insertion du fil de trame : **faible (300 tours/min), moyenne (450 tours/min), ou optimale (600 tours/min)**.

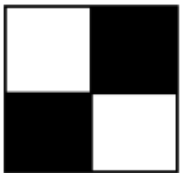
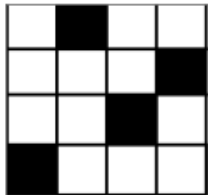
TOILE	OTTOMAN	SATIN 3/1
		

Tableau 13 - Motifs élémentaires des armures de tissage étudiées dans le plan d'expériences.

A l'issue du tissage, les dix-huit tissus obtenus sont désencollés, teints en noir, puis lavés et enfin séchés. La Figure 83 résume ce flux de procédé.

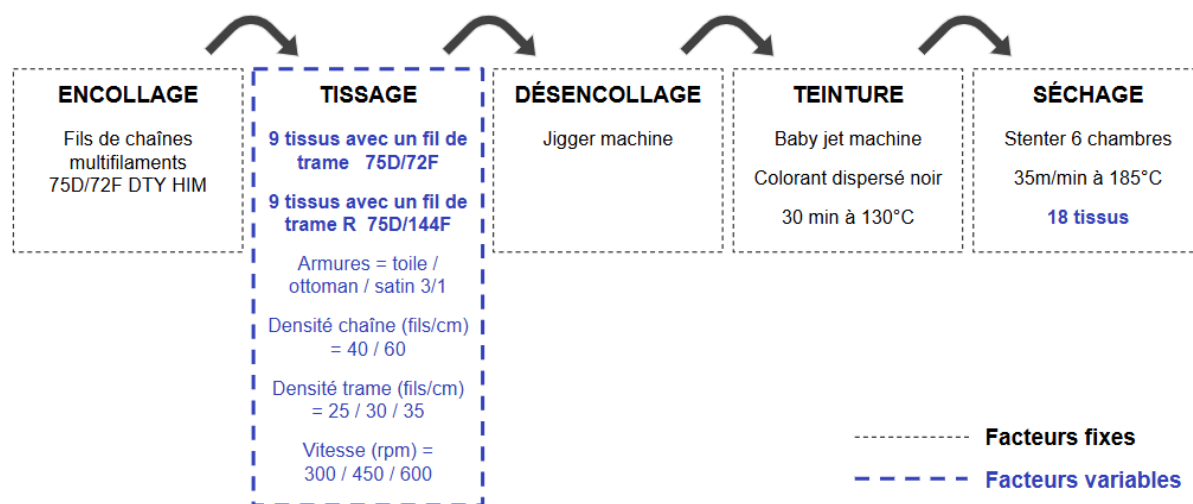


Figure 83 - Facteurs fixes et variables étudiés dans le plan d'expérience du procédé de tissage.

4.3.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE

Pour faciliter l'étude du procédé de tissage sur le relargage de FFMP, deux options sont prises. La première particularité est que la densité de fil de chaîne n'a que deux valeurs. Le niveau faible de 40 fils/cm a été utilisé pour deux niveaux, et le niveau fort de 60 fils/cm est associé au troisième niveau. Ainsi les quatre facteurs possèdent trois niveaux chacun et peuvent donc être intégrés dans une table L9 proposant neuf essais à réaliser pour $3^4 = 81$ combinaisons potentielles. De plus, ces neuf essais ont été doublés, une fois réalisés avec le même fil de trame que le fil de chaîne (75D / 72F) et une deuxième fois avec l'autre fil de trame (75D / 144F). Au total, le Tableau 14 mentionne dix-huit essais, avec leurs relargages associés.

Essais	Fil de chaîne	Essais doublés	Fil de trame	Armure	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)	Vitesse trame (tr/min)	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouv.)	CV% (8 éprouv.)
1	75D / 72F	1.1	75D / 72F	toile	40	25	300	358	54	15
		1.2	75D / 144F	toile	40	25	300	435	122	28
2		2.1	75D / 72F	toile	40	30	450	466	76	16
		2.2	75D / 144F	toile	40	30	450	541	103	19
3		3.1	75D / 72F	toile	60	35	600	753	59	8
		3.2	75D / 144F	toile	60	35	600	593	121	20
4		4.1	75D / 72F	satin 3/1	40	30	600	426	97	23
		4.2	75D / 144F	satin 3/1	40	30	600	325	43	13
5		5.1	75D / 72F	satin 3/1	40	35	300	224	68	31
		5.2	75D / 144F	satin 3/1	40	35	300	221	43	19
6		6.1	75D / 72F	satin 3/1	60	25	450	574	142	25
		6.2	75D / 144F	satin 3/1	60	25	450	403	96	24
7		7.1	75D / 72F	ottoman	40	35	450	388	53	14
		7.2	75D / 144F	ottoman	40	35	450	399	59	15
8		8.1	75D / 72F	ottoman	40	25	600	458	70	15
		8.2	75D / 144F	ottoman	40	25	600	424	135	32
9		9.1	75D / 72F	ottoman	60	30	300	556	135	24
		9.2	75D / 144F	ottoman	60	30	300	569	76	13
Moyennes =								451	86	20

Tableau 14 - Table L9 Taguchi doublée et complétée avec les facteurs de tissage et leurs résultats de relargage de FFMP.

L'ensemble de ces dix-huit essais indique un relargage de FFMP moyen de 451 mg/kg pour un écart-type moyen de 86 mg/kg et un coefficient de variation moyen de 20%. Cette moyenne place le relargage des tissus en multifilaments presque au même niveau que le relargage des tricotés circulaires en multifilaments (462 mg/kg). Pourtant il y a une certaine dispersion des résultats autour de cette moyenne avec un minimum à 221 mg/kg et un maximum à 753 mg/kg. Le premier élément qui pourrait venir créer des différences de relargage se trouve dans l'utilisation de deux différents fils de trame. La Figure 84 compare les essais doublés entre eux pour mettre en évidence une potentielle différence de relargage en fonction du DPF des fils de trame.

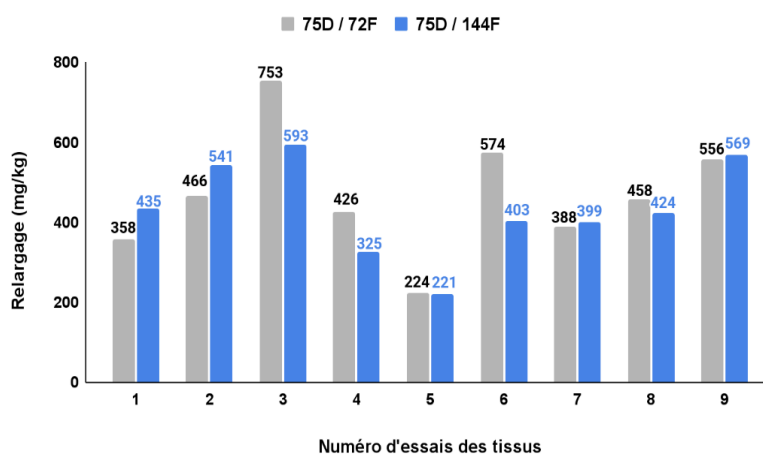


Figure 84 - Comparaison des relargages des neuf essais par fils de trame.

Certains essais sont très proches en termes de relargage comme les tissus 5-7-9. D'autres tissus ont des relargages plus éloignés comme les essais 3-4-6-8 à la faveur d'un relargage plus faible avec le fil de trame 75D / 144F. L'inverse est aussi observé pour les tissus 1 et 2 où le relargage est minimisé avec le fil de trame 75D / 72F. Il n'y a donc pas de corrélation évidente entre le nombre de filaments en trame, soit le DPF, et le relargage de FFMP. Le plan d'expérience sur les multifilaments mettait pourtant en évidence sur les tricotés que plus le DPF est élevé, moins il y a de relargage. Hors le fil 75D / 72F n'a pas toujours un relargage plus faible, cette hypothèse n'est donc pas confirmée pour le tissage avec les fils de trame, et n'a pas été étudiée pour les fils de chaîne. Pour la suite de cette analyse du tissage, la décision est donc prise de moyenner les relargages de chaque essai pour revenir à une table Taguchi L9 unique comme présentée dans le Tableau 15.

Essais	Armure	Densité chaîne (fils/cm)	Densité trame (fils/cm)	Vitesse trame (tr/min)	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouv.)	CV% (8 éprouv.)
1	toile	40	25	300	396	99	25
2	toile	40	30	450	504	96	19
3	toile	60	35	600	673	124	18
4	satén 3/1	40	30	600	376	90	24
5	satén 3/1	40	35	300	223	55	25
6	satén 3/1	60	25	450	488	147	30
7	ottoman	40	35	450	393	55	14
8	ottoman	40	25	600	441	106	24
9	ottoman	60	30	300	563	106	19
Moyennes =					451	97	22

Tableau 15 - Table L9 Taguchi avec les facteurs de tissage et leurs résultats de relargage de FFMP moyennés.

L'ensemble de ces neuf essais indique toujours un relargage de FFMP moyen de 451 mg/kg. L'écart-type moyen (97 mg/kg) et le coefficient de variation moyen (22%) sont légèrement plus élevés avec cette nouvelle table. Sans tenir compte de la différence de fil en trame, il est possible de revenir à l'analyse Taguchi pour déterminer l'effet de chaque facteur.

4.3.2.1. INFLUENCE DES FACTEURS DE TISSAGE

La Figure 85 montre la responsabilité des facteurs de tissage (armures, densités, et vitesses de production) vis-à-vis du relargage moyen de FFMP.

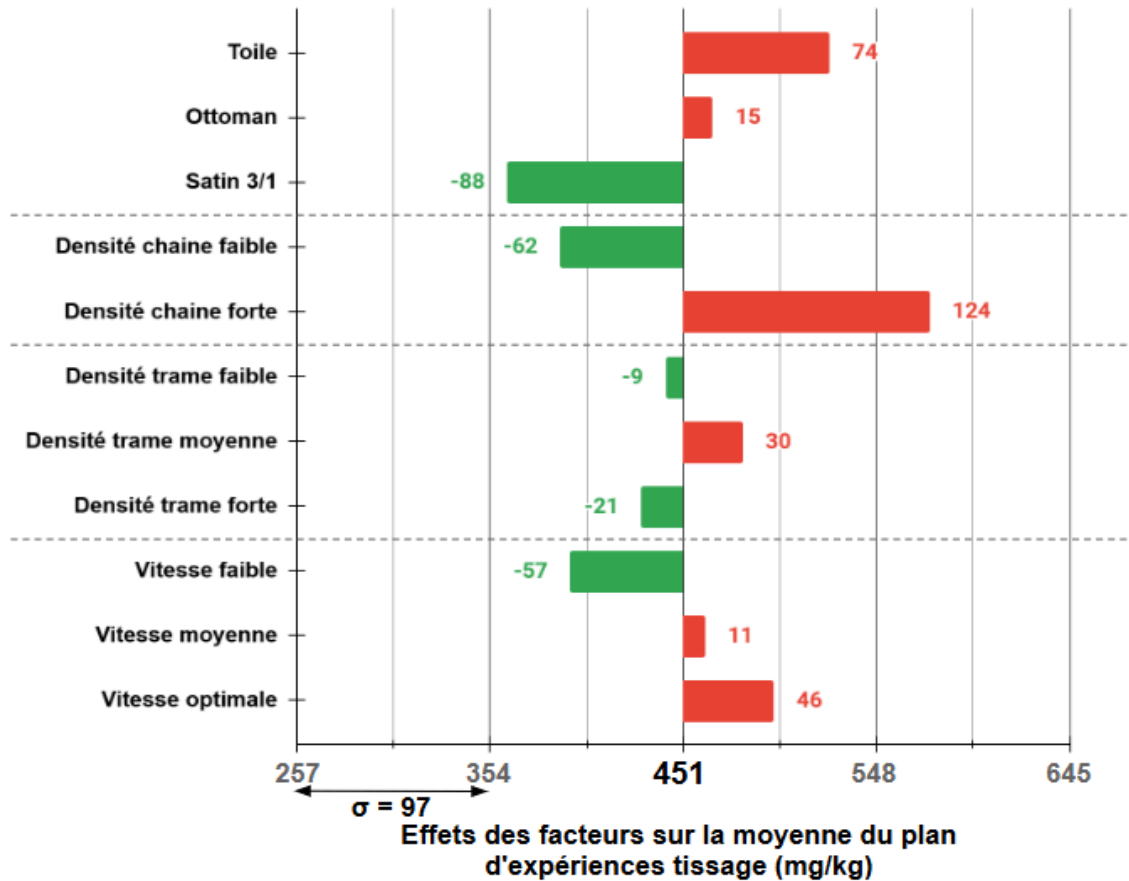


Figure 85 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences pour le procédé de tissage.

La dispersion des facteurs autour de la moyenne de 451 mg/kg du plan d'expériences s'explique principalement par l'influence des armures et surtout des densités de fils de chaîne. La densité la plus faible en fil de chaîne (40/cm) entraîne une réduction de -62 mg/kg. En comparaison, la densité plus forte de 60 fils de chaîne par centimètre provoque une hausse de +124 mg/kg par rapport à la moyenne du relargage des tissus. Ce résultat est en contradiction avec la littérature où les étoffes plus denses sont considérées comme moins génératrices de FFMP, surtout dans la famille des tissus. Pourtant cela pourrait s'expliquer par le fait que lorsque les fils de chaîne sont plus serrés, ils sont également amenés à davantage se toucher à chaque insertion de trame. Ainsi plus de frottements sont concédés avec une densité chaîne plus importante. Alors qu'une densité chaîne plus faible, et donc une densité de tissage toujours serrée mais plus optimisée, laisse plus de liberté de mouvement aux fils de chaîne. Ce facteur est le plus influent (37%).

A propos des armures de tissage, leur influence sur le relargage est secondaire mais significative avec 32% de responsabilité. C'est l'armure satin qui s'illustre pour diminuer le relargage moyen de -88 mg/kg, tandis que l'ottoman et surtout la toile augmentent respectivement la moyenne du relargage de l'ensemble des tissus de +15 et +74 mg/kg. Ce résultat peut s'expliquer avec les éléments du Tableau 16. La vue en coupe représente l'entrelacement d'un fil de chaîne en bleu autour des fils de trame en vert. Dans l'armure toile, à chaque fil de trame, le fil de chaîne change de face, il passe sur l'avant, puis sur l'envers, de manière alternative. L'armure ottoman reprend le même principe sauf au bout de dix passages ou le fil de chaîne ne bascule pas avant de reprendre l'alternance pour les dix insertion trame suivantes. En comparaison, le fil de chaîne du satin change de face un fil de trame sur quatre, soit deux fois moins que la toile. En prenant un dénominateur commun de ces armures, il est possible de comparer le nombre de changements de face réalisés par les fils de chaîne sur 44 insertion de fil de trame. La toile change de face à chaque fois, soit 44 fois, 40 changements de face pour l'ottoman, contre seulement 22 pour le satin. Ce nombre de changement de face réduit par deux, permet au satin de limiter les frottements sur les fils de chaîne lors du tissage et de réduire ses émissions de FFMP.

Schéma de tissage en coupe sectionnelle Sens chaîne →	Nombre de changements de face de la chaîne en 44 insertion trame
Toile 	44
Ottoman 	40
Satin 3/1 	22

Tableau 16 - Vue en coupe des armures de tissage associée au nombre de changements de face des fils de chaîne.

Les deux derniers facteurs du plan d'expériences ont quant à eux une influence négligeable sur le relargage de FFMP. Bien que la densité de fil de trame ne soit pas significative, il est tout de même important de noter que la réponse en fonction de ce facteur n'est pas linéaire. La vitesse d'insertion du fil de trame est également un facteur négligeable, bien que son évolution soit linéaire. Effectivement une vitesse plus faible permet de réduire le relargage de FFMP de -57 mg/kg, alors que le double de cette vitesse sollicite davantage de frottement sur le métier à tisser, et augmente ainsi le relargage au premier lavage de +46 mg/kg en moyenne. Au-delà des facteurs de tissage, d'autres propriétés intrinsèques au textile peuvent être corrélées au relargage de FFMP.

4.3.2.2. CORRÉLATIONS AVEC D'AUTRES PROPRIÉTÉS TEXTILES

Les principales corrélations entre le relargage de FFMP et les propriétés des tissus ont été mesurées. La masse surfacique est corrélée avec les émissions de FFMP d'après son coefficient de Pearson de 0,66 (pour $p = 0,055$). La Figure 86 montre que le relargage des tissus a une corrélation positive avec la masse surfacique. Cela signifie que plus les tissus sont légers, moins ils relarguent. Cette tendance est confirmée par un R^2 linéaire de 0,43.

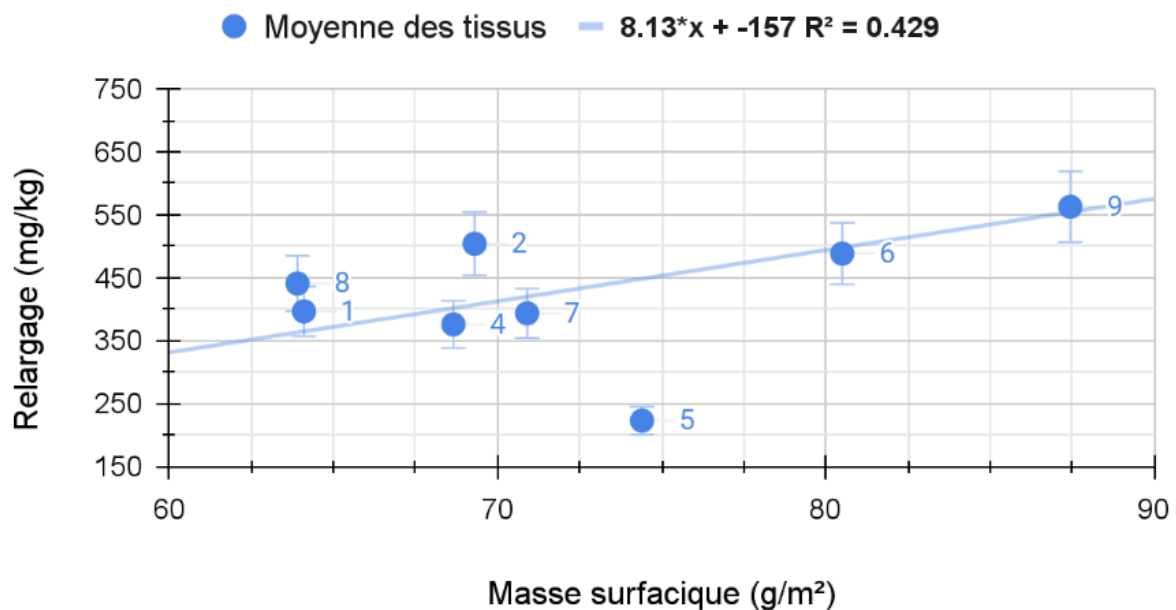


Figure 86 - Corrélation entre le relargage des tissus et la masse surfacique.

En tissage, le facteur de couverture est une mesure de la densité des fils dans un tissu, indiquant dans quelle proportion les fils recouvrent la surface du tissu. Il est crucial pour déterminer l'apparence, le toucher, l'opacité, la perméabilité à l'air et d'autres propriétés du tissu. Il est possible de le calculer en fonction des caractéristiques du tissu (titre, densité, et armure). Un facteur de couverture plus élevé annonce un tissu plus opaque et plus rigide, et donc moins souple, moins perméable. Dans cette étude, le facteur de couverture est lié au relargage par un coefficient de Pearson de 0,85 (pour $p = 0,04$). Cela indique que plus le facteur de couverture est faible, donc plus le tissu est souple, moins le tissu émet de FFMP. Cette tendance est confirmée en Figure 87 par un R^2 de 0.72.

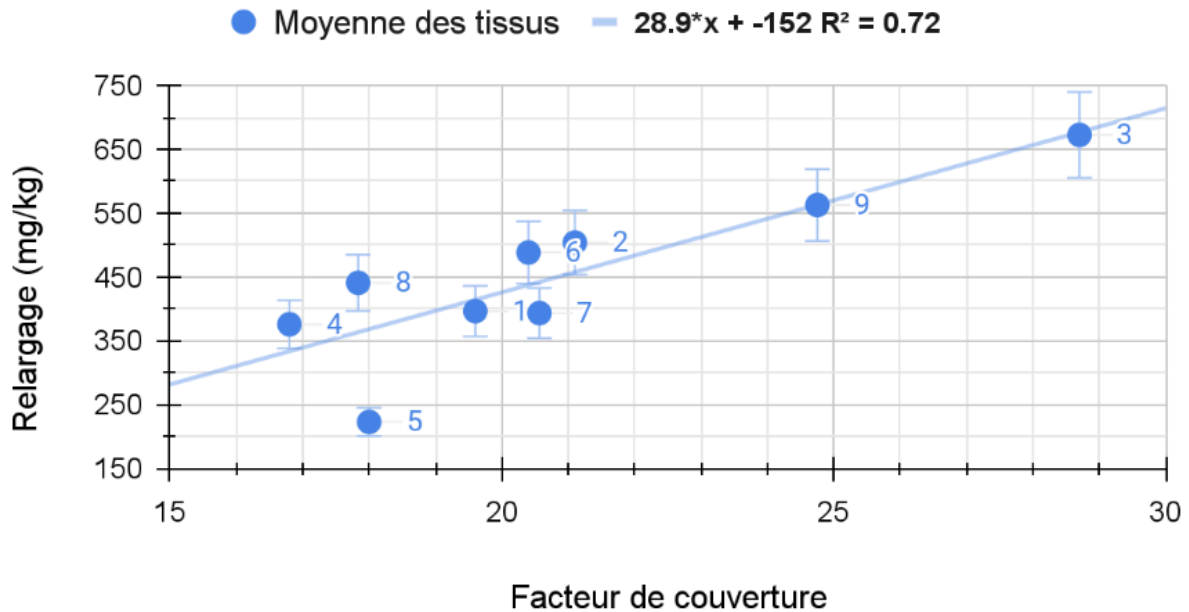


Figure 87 - Corrélation entre le relargage des tissus et le facteur de couverture.

A noter que dans les deux corrélations précédentes, le tissu numéro 5 s'écarte de la tendance par son très faible relargage corrélé à une masse surfacique moyenne et un facteur de couverture pas suffisamment faible. En le retirant des équations, les corrélations positives des autres tissus augmentent. La tendance linéaire entre le relargage et le facteur de couverture atteint un R^2 égal à 0,85. L'autre tendance entre le relargage et la masse surfacique suit un R^2 de 0,76.

La corrélation entre le relargage et le facteur de couverture, additionné au résultat précédent de la capacité des satins à émettre moins de FFMP pousse la réflexion sur le drapé des tissus. Le drapé d'un tissu se définit comme la manière dont celui-ci se plisse et tombe sous son propre poids en formant des plis. C'est le tombé du tissu lié aux propriétés intrinsèques du matériau, telles que sa souplesse, sa rigidité, et son poids. Plus le coefficient de drapé est élevé, plus le tissu est rigide et moins il se déforme sous l'effet de la gravité. Inversement, un faible coefficient de drapé indique que le tissu est plus souple et qu'il se déforme davantage, formant des plis plus nombreux et plus amples. L'hypothèse à vérifier est qu'un tissu avec un coefficient de drapé plus faible, donc plus souple et déformable, relargue moins de FFMP. Pour cela, le drapé a été mesuré sur les dix-huit tissus initiaux en Figure 88.

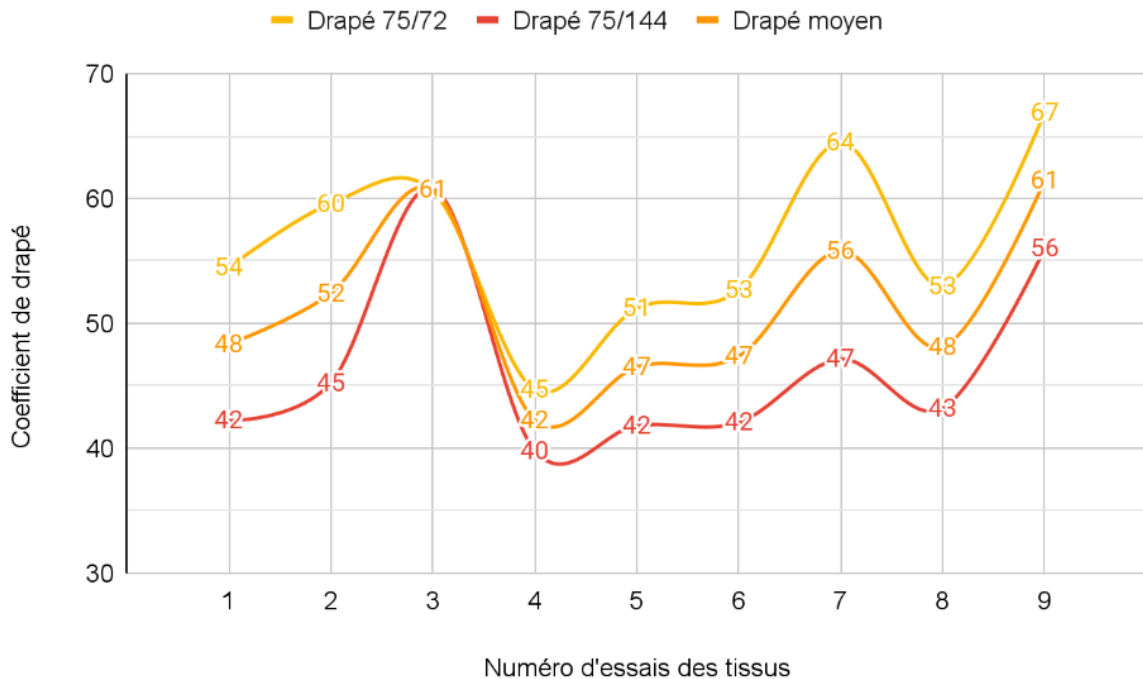


Figure 88 - Coefficients de drapé exprimés en fonction du fil de trame de 75 denier et 72 filaments ou 144 filaments qui compose les tissus.

Il s'avère qu'un écart est présent entre les tissus en fonction du fil de trame qui les compose. Le fil de trame de 75 denier et 72 filaments donne aux neuf tissus qu'il compose un drapé plus élevé que ceux avec un fil de trame de 75 deniers pour 144 filaments, à l'exception de l'essai 3 qui a le même coefficient de drapé peu importe le fil de trame. Cela signifie que les tissus avec un fil de trame de 72 filaments sont plus rigides que les tissus avec un fil de trame de 144 filaments. Cependant, le même profil de courbe se dessine pour les neuf essais indépendamment du fil de trame. Ainsi le choix est fait de moyenner la valeur du coefficient de drapé avec les deux populations d'origine. Les coefficients de drapé de la courbe orange sont ainsi obtenus. Ils sont ensuite comparés au facteur de couverture et au relargage de FFMP en Figure 89. A noter que pour le facteur de couverture, le nombre de filaments dans le fil de trame n'intervient pas dans le calcul. Les neuf facteurs de couvertures peuvent donc être comparés aux coefficients de drapé moyens et aux relargage moyens des neuf tissus.

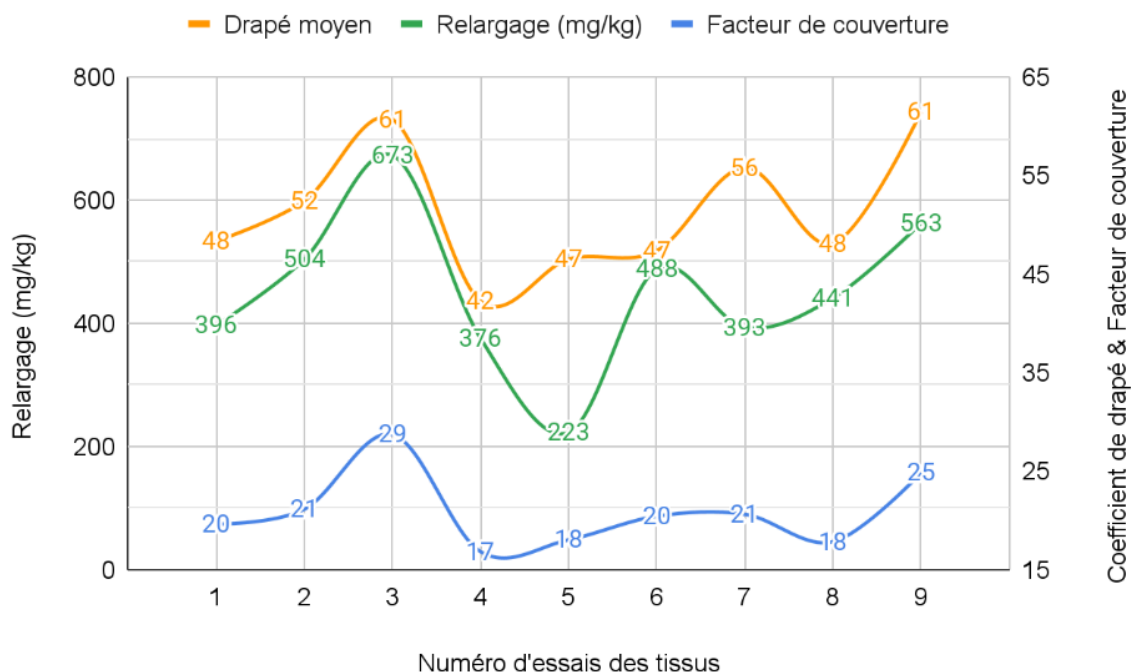


Figure 89 - Comparaison du coefficient de drapé et du facteur de couverture au relargage des neufs tissus.

Des correspondances sont visibles entre les profils des trois courbes du drapé, du facteur de couverture, et du relargage. D'abord, les profils des courbes du coefficient de drapé et du facteur de couverture sont presque identiques. Une légère dissonance est observée pour les tissus 6 et 7. Le profil de la courbe de relargage s'associe proprement au drapé et au facteur de couverture pour les essais 1-2-3-4. Ensuite un dysfonctionnement est visible pour les tissus 5 (à nouveau avec un relargage trop faible), 6 (relargage trop élevé), et 7 (relargage ambivalent), avant que la correspondance ne soit retrouvée pour les essais 8 et 9. Ces relations sont prometteuses mais imparfaites, des tests supplémentaires devront être menés pour comprendre la corrélation existante mais complexe entre le drapé, le facteur de couverture, et le relargage. Pourtant il est tout de même possible de lire que des facteurs de couverture et des coefficients de drapé plus faible tendent vers un relargage minimisé. Ces tendances linéaires du relargage de FFMP sont confirmées par la Figure 87 précédente pour le facteur de couverture ($R^2 = 0,72$) et la Figure 90 suivante pour le coefficient de drapé ($R^2 = 0,51$).

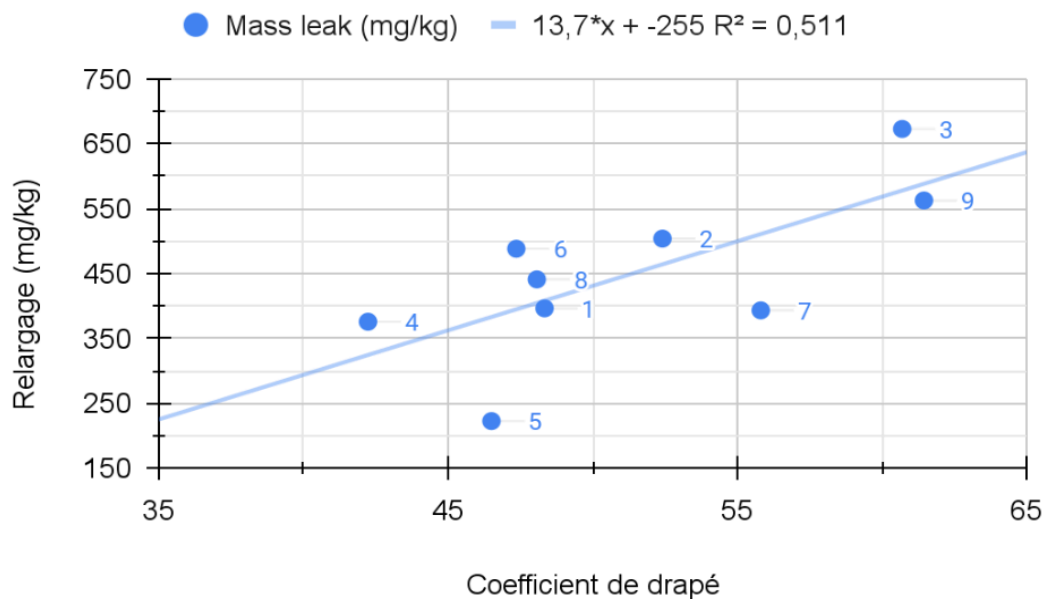


Figure 90 - Corrélation entre le relargage des tissus et le coefficient de drapé.

En résumé, les tissus plus souples et plus déformables ont un coefficient de drapé et un facteur de couverture faible qui les mènent à relarguer moins de FFMP. A l'inverse des tissus plus rigides émettent davantage de FFMP. Cette discussion sur la rigidité amène à penser que la relation entre la densité des tissus et le relargage est donc plus complexe qu'annoncée dans la littérature du premier chapitre.

4.3.3. SYNTHÈSE - INFLUENCE DU TISSAGE SUR LE RELARGAGE

Le plan d'expériences sur le tissage a permis d'étudier dix-huit tissus aux propriétés variées. Le premier constat est que le nombre de filaments dans le fil de trame n'est pas un paramètre déterminant. Ainsi les dix-huit essais ont été rassemblés par binôme en neuf essais finaux. Pourtant le nombre de combinaisons totales entre tous les niveaux des facteurs est de 81 (3^4). L'influence de chaque facteur de tissage sur le relargage est maintenant connue dans les conditions expérimentales définies. Grâce à cette analyse, il est possible de déterminer le plan complet de Taguchi pour estimer le relargage des 81 combinaisons possibles. En l'occurrence :

- Le tissu avec le relargage minimum de **238 mg/kg** est composé de :
 - **Une armure satin, avec une densité chaîne faible, une densité trame forte, et une vitesse faible.**

- Le tissu avec le relargage maximum de **740 mg/kg** est composé de :
 - **Une armure toile, avec une densité chaîne forte, une densité trame moyenne, et une vitesse optimale.**

Cette étendue entre les deux valeurs extrêmes montre que le tissage est également un procédé influent sur le relargage de FFMP. D'abord par la densité des fils des chaînes, lorsqu'elle est réduite, le nombre de frottements se retrouve diminué, et ainsi le relargage également. Ensuite par le choix des armures où les structures avec des flottés comme le satin de cette étude peuvent mieux se mouvoir pour encaisser les frottements et moins relarguer. Ces tendances se confirment par les corrélations entre le relargage avec le facteur de couverture et le coefficient de drapé qui indiquent que la souplesse du tissu est clé sur le relargage.

4.4. PROCÉDÉS DE TRAITEMENTS DE SURFACE

Avant de prendre la direction finale de la confection, les tricots et tissus peuvent être travaillés en surface pour leur conférer des propriétés additionnelles. Ces traitements de surface peuvent survenir à l'aide de finitions mécaniques comme l'aspect de surface polaire, ou de finitions chimiques telles que les traitements hydrophiles ou hydrophobes. Dans cette partie, ces traitements de surface sont au cœur du dispositif Taguchi afin de comprendre leur influence sur le relargage de FFMP au premier lavage.

4.4.1. DÉVELOPPEMENT DES ÉTOFFES TRAITÉES EN SURFACE

Pour obtenir des relargages de FFMP comparables issus de traitements de surface variés, il est nécessaire de partir de textiles identiques. Deux plans d'expériences sont ainsi menés. Ils sont réalisés sur des tricots identiques pour appliquer des finitions mécaniques et chimiques. La Figure 91 précise les étapes de production identiques des tricots de référence. Ils sont développés avec le même multifilament en polyester vierge, texturé en DTY avec un fort entremêlement (HIM), avec un titre de 150 denier pour 144 filaments, soit un DPF de 1 denier environ. Le titre du fil utilisé est volontairement plus élevé que précédemment (150 vs 75 deniers) pour avoir plus de matière dans le tricot et ainsi éviter de trouser la matière avec l'abrasion de surface des finitions mécaniques. Les tricots fabriqués avec ce fil sont des tricots circulaires en structure interlock comme le premier plan d'expérience. Cette structure utilise une double fonture et intègre donc plus de matière également. Une fois les tricots produits, leur teinture en noir et leur séchage réalisés sont standards. Les tricots sont maintenant prêts à être déclinés selon plusieurs finitions mécaniques et chimiques.

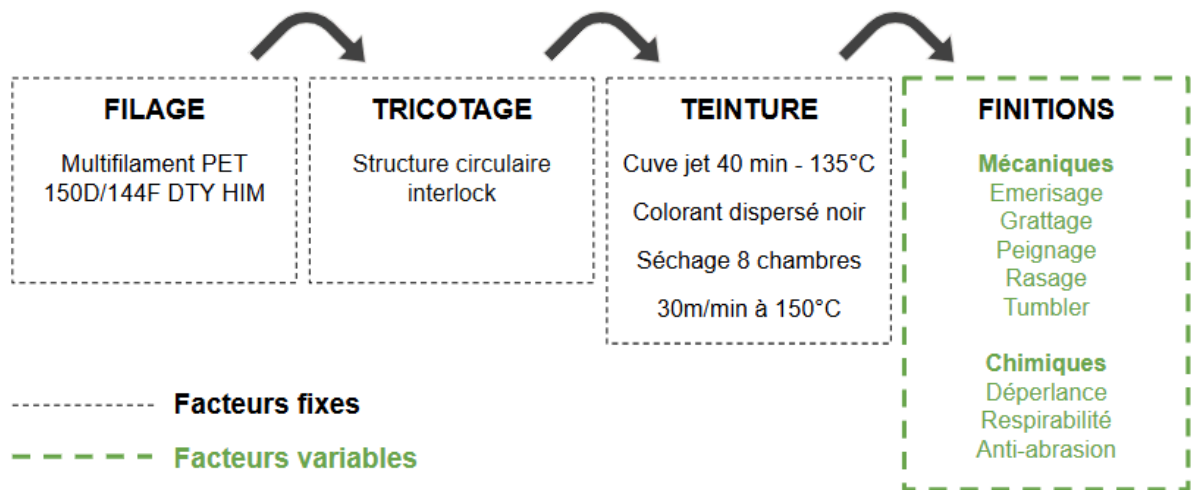


Figure 91 - Facteurs fixes et variables étudiés dans le plan d'expérience sur les finitions mécaniques et chimiques a) sur tricots et b) sur tissus.

4.4.1.1. FINITIONS MÉCANIQUES

Les finitions mécaniques étudiées sur la surface des tricots circulaires sont définies selon deux facteurs :

- Le type de finitions mécaniques utilisé à travers 8 niveaux définis en combinant les procédés : **émerisage, grattage, peignage, rasage, tumbler**.
- Le nombre de faces : la finition mécanique peut être appliquée sur **une face**, l'endroit ou l'envers, ou les **deux faces**.

4.4.1.2. FINITIONS CHIMIQUES

A la surface des mêmes tricots ont également été appliquées trois traitements de finitions chimiques. Il s'agit :

- D'un traitement hydrophile pour améliorer la **respirabilité** du textile.
- D'un traitement hydrophobe pour générer la **déperlance** du tricot.
- D'une membrane polymère pour améliorer la **résistance à l'abrasion** de l'étoffe.

4.4.2. RÉSULTATS DE RELARGAGE

4.4.2.1. INFLUENCE DES FINITIONS MÉCANIQUES SUR TRICOT

Les finitions mécaniques à la surface des tricots sont étudiées selon deux facteurs : huit types de finitions mécaniques appliquées sur une ou deux faces du tricot. Ces niveaux construisent les seize essais du plan d'expériences incluant toutes les combinaisons potentielles. Le Tableau 17 reprend les seize tricots circulaires produits avec des finitions mécaniques sur une ou deux faces. Après leur production, la simulation de lavage standardisée TMC a été appliquée sur chacun d'entre eux pour déterminer leur relargage de FFMP. Ces résultats ainsi que les écart-types et les coefficients de variation pour huit éprouvettes complètent ce tableau.

Essais	Finitions mécaniques sur tricot	Nombre de faces	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouv.)	CV% (8 éprouv.)
1	Emerisage	1 face	847	117	14%
2	Emerisage	2 faces	1111	238	21%
3	Grattage 1 passage	1 face	75	16	22%
4	Grattage 1 passage	2 faces	1076	73	7%
5	Grattage 2 passages	1 face	231	19	8%
6	Grattage 2 passages	2 faces	807	34	4%
7	Grattage 4 passages	1 face	155	45	29%
8	Grattage 4 passages	2 faces	691	48	7%
9	Grattage 2 passages Rasage	1 face	1020	70	7%
10	Grattage 2 passages Rasage	2 faces	1134	34	3%
11	Grattage 2 passages Peignage Rasage	1 face	1271	78	6%
12	Grattage 2 passages Peignage Rasage	2 faces	1142	48	4%
13	Grattage 2 passages Peignage Rasage Tumbler	1 face	803	28	4%
14	Grattage 2 passages Peignage Rasage Tumbler	2 faces	1113	133	12%
15	Grattage 2 passages Tumbler	1 face	192	34	17%
16	Grattage 2 passages Tumbler	2 faces	795	65	8%
Moyennes =			779	68	11%

Tableau 17 - Table L16 Taguchi complétée avec les facteurs de finitions mécaniques et leurs relargages de FFMP associés.

L'ensemble de ces seize essais annonce un relargage de FFMP moyen à hauteur de 779 mg/kg. A titre de comparaison, le relargage moyen du plan d'expériences sur les tricots circulaires sans finitions mécaniques équivaut à 462 mg/kg. En moyenne, les finitions mécaniques sont donc responsables d'une augmentation de 317 mg/kg de FFMP sur la même famille textile des tricots circulaires. Voici le premier constat de ce plan d'expériences sur les finitions mécaniques.

Pourtant, les résultats des seize essais sont assez dispersés autour de cette moyenne. En effet des résultats extrêmes sont atteints avec des relargages au-delà des 1000 mg/kg notamment un maximum à 1271 mg/kg pour l'essai 11. Mais également des extrêmes inverses, très faibles en relargage, avec des émissions de FFMP inférieures à 200 mg/kg dont un minimum de 75 mg/kg pour l'essai 3. Afin de comprendre quels facteurs influencent ces extrêmes opposés de relargage de FFMP, la méthode Taguchi a été appliquée. La Figure 92 met en évidence les effets de chaque facteur sur le relargage par rapport à la moyenne du plan d'expériences. A noter que ce plan d'expériences s'accompagne d'un écart-type moyen de 68 mg/kg et d'un coefficient de variation moyen de 11%.

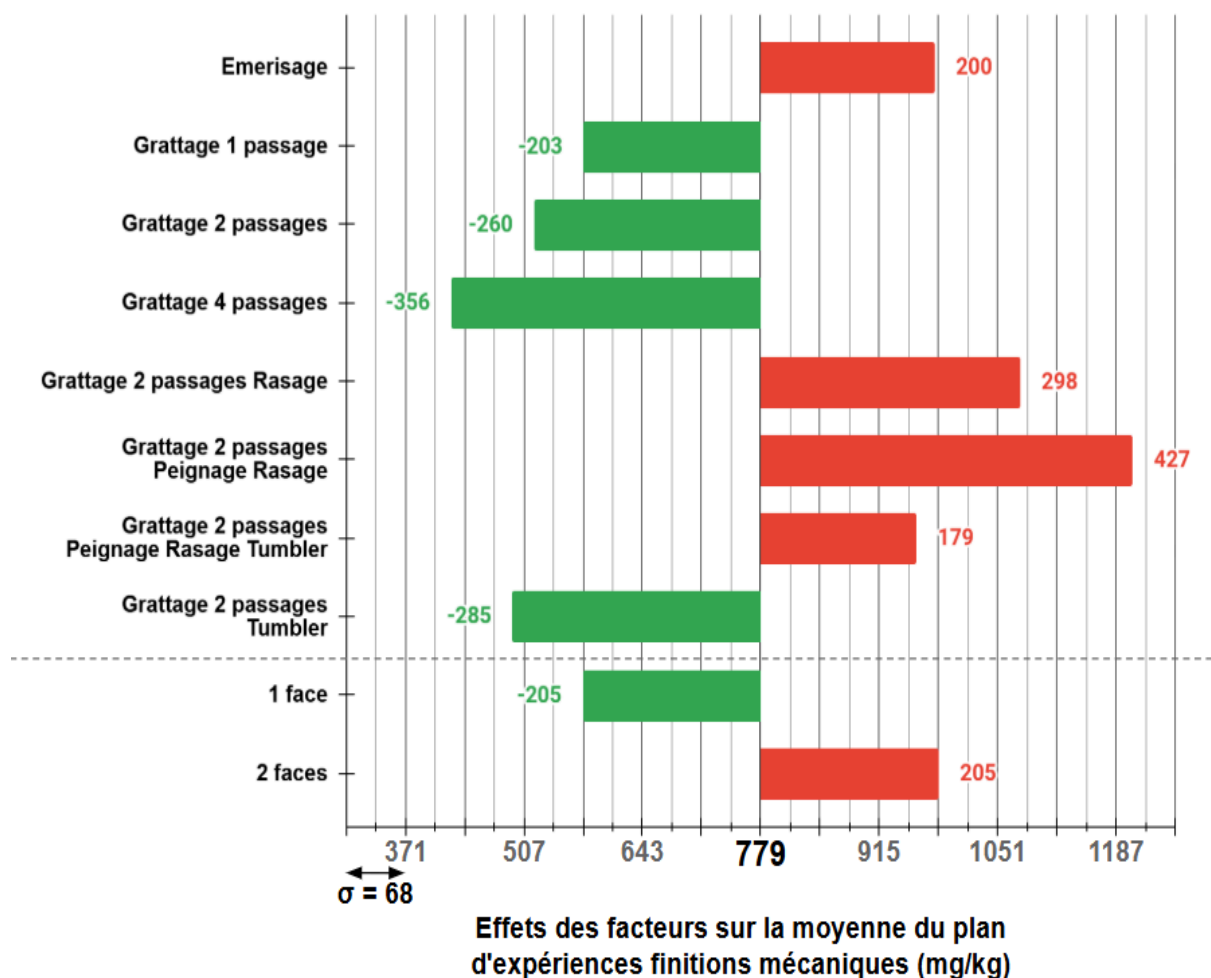


Figure 92 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences des finitions mécaniques sur tricot.

Les effets des facteurs sont partagés : il y a cinq facteurs qui minimisent le relargage mais tout autant tendent à l'augmenter. Dans les deux groupes, les effets sont conséquents, au minimum de -203 mg/kg ou de +179 mg/kg, bien supérieurs à l'écart-type moyen de 68 mg/kg. Ces effets importants s'expliquent par les résultats extrêmes obtenus dans les essais individuels éloignés de la moyenne du plan.

Parmi le facteur des finitions mécaniques, ce sont les grattages qui minimisent le relargage. Il est intéressant d'observer qu'après quatre passages du tricot contre le rouleau de grattage, le relargage au premier lavage est plus faible (423 mg/kg) qu'après deux passages (519 mg/kg), et plus encore qu'après un seul passage (576 mg/kg). Néanmoins, le grattage reste une abrasion en profondeur du textile qui n'est pas sans effet. Il faut savoir que des systèmes d'aspiration sont présents sur ces machines afin de collecter les fragments émis dans l'air. Ainsi au fur et à mesure des passages, les fragments pourraient être aspirés et donc ne plus être quantifier au premier lavage. Cette hypothèse permettrait d'expliquer le fait que les grattages successifs diminuent le relargage. En complément, l'utilisation d'un cycle de tumbler après deux passages en grattage permet d'éviter 25 mg/kg de FFMP pour une diminution totale de 285 mg/kg par rapport à la moyenne.

A l'inverse, les enchaînements de finitions après deux passages en grattage augmentent le relargage, que ce soit avec un peignage optionnel pour redresser les fibres (1206 mg/kg), et/ou un rasage des fibres à une hauteur homogène (1077 mg/kg). Le tumbler est également utilisé après ces opérations de finitions successives et permet au relargage de chuter de 248 mg/kg pour passer à un relargage moyen de 958 mg/kg. Les fragments qui ne se retrouvent pas au premier lavage sont cette fois-ci évacués dans les effluents du tumbler dans l'usine de production. Enfin l'émerisage était annoncé comme finition plus légère avec ses broches en carbone, mais elle se classe finalement parmi les plus relarguantes avec une augmentation du relargage moyen de +200 mg/kg. Ce résultat peut s'expliquer par le travail de surface effectué sur les fibres telle une véritable abrasion provoquant de nombreuses ruptures de fibres de surface facilement détachables de la structure au lavage.

Le facteur des finitions mécaniques est responsable de deux tiers de l'amplitude du relargage de ce plan d'expériences. Le dernier tiers est déterminé par le nombre de faces sur lesquelles ce relargage est appliqué. La différence est notable : lorsqu'une finition est appliquée sur deux faces, le relargage est accru de +205 mg/kg par rapport à la moyenne. A l'inverse, lorsqu'une seule face est soumise à une finition mécanique, le relargage est réduit à 574 mg/kg. Si l'on regarde les résultats individuels des seize essais, ce constat est d'autant plus vrai pour les passages en grattage non-suivis par d'autres opérations de finitions mécaniques successives. Ainsi les finitions mécaniques sur la surface des tricots ont un rôle déterminant dans la problématique des émissions de FFMP au premier lavage. Reste à déterminer l'importance des finitions chimiques sur ces mêmes surfaces tricotées.

4.4.2.2. INFLUENCE DES FINITIONS CHIMIQUES SUR TRICOT

Trois traitements chimiques, dont la composition est détaillée en Annexe 1, conférant les propriétés de respirabilité, de déperlance, et de résistance à l'abrasion ont été appliqués à la surface de tricots. Il s'agit de la même référence de tricot que pour les finitions mécaniques précédemment, autrement dit un tricot circulaire interlock teint en noir composé de multifilaments. Ces trois tricots ont été produits et testés selon la méthode de test TMC pour connaître leurs résultats de relargage exprimés dans le Tableau 18.

Essais	Finition chimique sur tricot	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
0R	Hydrophile	1710	247	14%
0D	Hydrophobe	133	29	22%
0A	Anti-abrasion	202	23	11%
Moyennes =		682	100	16%

Tableau 18 - Table des facteurs de finitions chimiques sur tricots et leurs relargages de FFMP associés.

Au regard de ce tableau où les finitions sont appliquées après la teinture, les résultats de relargage qui se dégagent s'orientent à nouveau vers des valeurs extrêmes. Un relargage considérable de 1710 mg/kg est observé après le traitement hydrophile favorisant la respirabilité du textile. Ce résultat est de l'ordre de grandeur des plus hauts relargages observés dans cette thèse, à la hauteur des tricots en filés de fibres open-end. A l'inverse, les autres relargages observés sont très faibles, notamment après l'application d'un traitement hydrophobe déperlant (133 mg/kg) ou d'une membrane résistante à l'abrasion (202 mg/kg). Ces résultats ne tiennent pas compte des potentielles interactions chimiques entre les produits. Malgré tout, ils viennent confirmer les tendances avancées par la littérature. En effet, les traitements hydrophiles et les traitements hydrophobes sont respectivement classés premier et quatrième parmi les paramètres principaux influençant le relargage de la base de données de TMC.

Ces trois finitions ont également été combinées à l'essai 12 du plan d'expériences précédent, c'est-à-dire après deux passages en grattage, un peignage et un rasage sur les deux faces du tricot. L'objectif ici est de voir l'influence des finitions chimiques en complément des finitions mécaniques. Ces trois tricots ont été produits et testés selon la méthode de test TMC pour connaître leurs résultats de relargage exprimés dans le Tableau 19.

Essais	Finition chimique sur tricot	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
12R	12 + Hydrophile	NA	NA	NA
12D	12 + Hydrophobe	459	42	9%
12A	12 + Anti-abrasion	NA	NA	NA

Tableau 19 - Table des facteurs de finitions chimiques sur tricots déjà traités mécaniquement et leurs relargages de FFMP associés.

L'application des traitements chimiques sur l'essai numéro 12 déjà traité mécaniquement n'a abouti que dans le cas de la déperlance. Le relargage mesuré est de 459 mg/kg, ce qui est plus de 3 fois plus élevé que pour la finition chimique seule sur tricot teint (136 mg/kg), mais aussi 683 mg/kg plus faible que l'essai 12 gratté-peigné-rasé sur deux faces (pour rappel : 1142 mg/kg seul). La déperlance appliquée après des opérations de finitions mécaniques permettrait de réduire le relargage au premier lavage, en comparaison de la finition mécanique seule. Ce constat n'est vrai que pour la déperlance. Effectivement, les finitions chimiques de respirabilité et de résistance à l'abrasion appliquées en surface de l'essai 12 n'ont pas pu être testées selon la méthode de test TMC. Dans ces deux cas, le laboratoire a rapporté qu'un seul filtre n'a pas suffi pour récupérer l'ensemble des fragments présents dans les eaux de lavage à filtrer. Ainsi les tests sont jugés non-conformes mais il est possible de supposer que les relargages sont conséquents.

4.4.3. SYNTHÈSE - INFLUENCE DES FINITIONS SUR LE RELARGAGE

A titre de comparaison de ces deux études sur les finitions mécaniques et chimiques appliquées à la surface des tricots, le tricot non-ennobli et le tricot teint de référence ont été soumis à la simulation de lavage TMC. Leurs relargages sont décrits dans le Tableau 20. Un premier constat est que le tricot non-ennobli accroît la tendance observée au chapitre 3 avec un relargage conséquent de 1205 mg/kg, quasiment neuf fois plus élevé que ce même tricot après teinture (136 mg/kg).

Essais	Tricot	Relargage (mg/kg)	Ecart-types (8 éprouvettes)	CV% (8 éprouvettes)
0G	Non-ennobli	1205	188	16%
0K	Teint en noir	136	44	32%

Tableau 20 - Table du relargage de FFMP des tricots non-ennobli et teint avant finitions.

En prenant du recul, il est jugé utile de comparer le relargage des tricots avec des traitements de finitions étudiés au relargage du tricot de référence sortie de teinture plutôt qu'à leur propre moyenne. En effet, le tricot de référence permet de signifier que le relargage avant n'importe quel traitement de surface est de 136 mg/kg. Ensuite l'application des finitions chimiques et mécaniques modifie la structure textile et entraîne une hausse relative du relargage de FFMP, à l'exception du traitement hydrophobe. Ces augmentations des émissions de FFMP au premier lavage dues aux finitions mécaniques et chimiques sont illustrées dans la Figure 93.

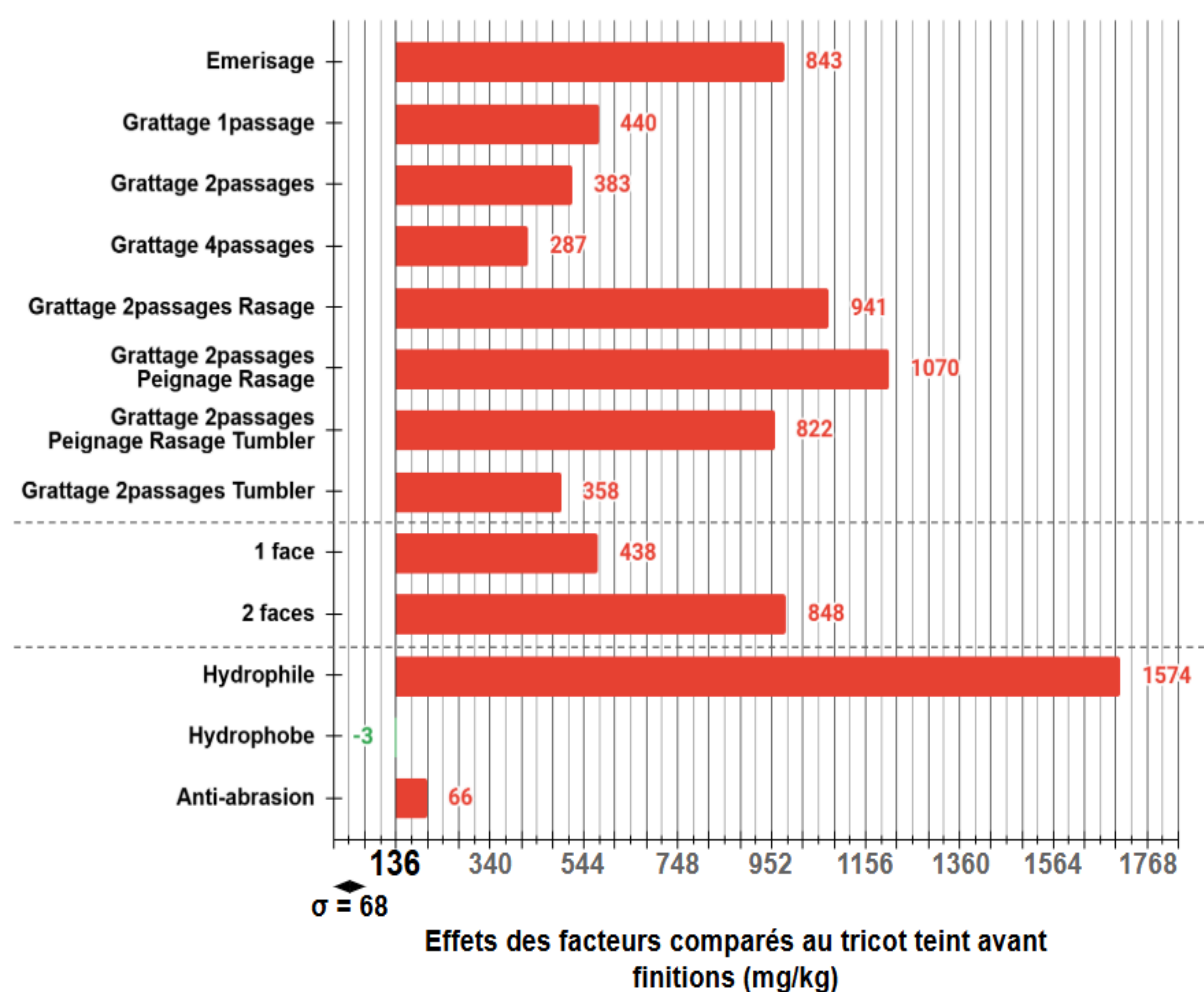


Figure 93 - Diagramme des effets individuels des facteurs du plan d'expériences des finitions mécaniques et chimiques comparées au tricot teint.

4.5. INFLUENCE DE CHAQUE PROCÉDÉS TEXTILES SUR LE RELARGAGE

C'est ainsi que s'achève l'étude des procédés de la chaîne de transformation textile pour comprendre leur influence sur le relargage de FFMP au premier lavage. Ce chemin parcouru est synthétisé en Figure 94.

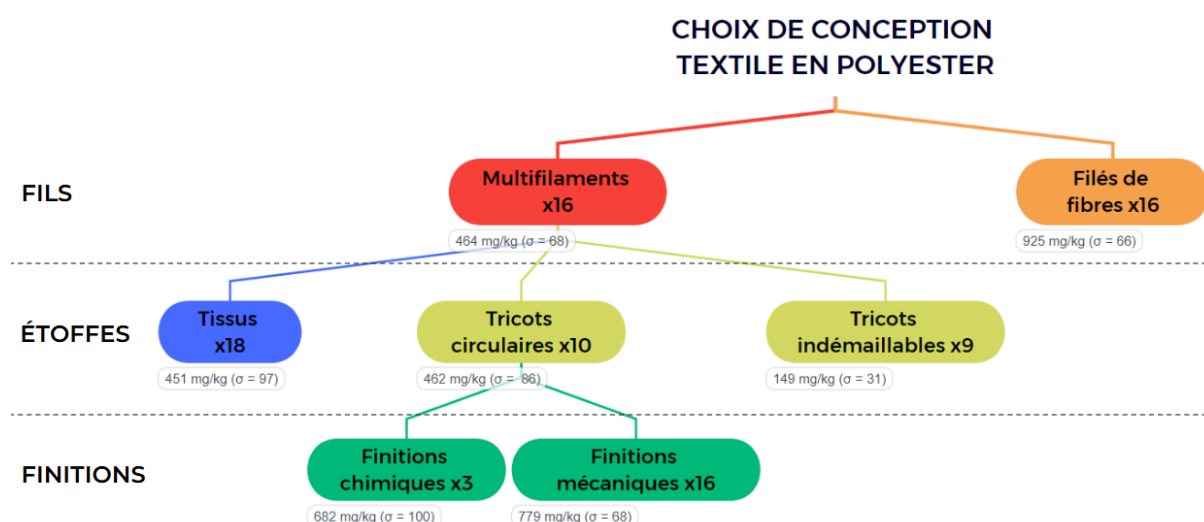


Figure 94 - Ensemble des procédés textiles étudiés et leurs relargages moyens associés.

Il est possible de garder en mémoire les ordres de grandeur de relargage de chaque plan d'expériences, par exemple en les classant en quatre catégories du moins influent au plus influent sur le relargage de FFMP comme dans le Tableau 21 :

RANG	STRUCTURES TEXTILES	RELARGAGE MOYEN (mg/kg)	ECART-TYPE MOYEN (mg/kg)
1	Tricots indémaillables	149	31
2	Tissus Tricots circulaires Multifilaments	451 462 464	97 86 68
3	Finitions chimiques Finitions mécaniques	682 779	100 68
4	Filés de fibres	925	66

Tableau 21 – Classement des structures textiles étudiés dans les plans d'expériences par ordre de grandeur du relargage de FFMP.

Ces ordres de grandeur se caractérisent par la moyenne du plan d'expériences en question ainsi que l'écart-type moyen. Les structures textiles les moins émettrices de FFMP sont les tricots indémaillables (149 mg/kg, $\sigma = 31$ mg/kg). Le second regroupe se compose des tissus (451 mg/kg, $\sigma = 97$ mg/kg), des tricots circulaires (462 mg/kg, $\sigma = 86$ mg/kg), et des multifilaments, qui par extension sont également des tricots circulaires (464 mg/kg, $\sigma = 68$ mg/kg). Le troisième s'accompagne des tricots circulaires avec des traitements de finitions chimiques (682 mg/kg, $\sigma = 100$ mg/kg) et mécaniques (779 mg/kg, $\sigma = 68$ mg/kg). Et enfin, le dernier avec les tricots circulaires en filés de fibres (925 mg/kg, $\sigma = 66$ mg/kg). Ces résultats, ainsi que les sous-résultats propres à chaque procédé, vont permettre de déterminer les recommandations pour éco-concevoir des textiles en polyester moins émetteurs de FFMP.

5. CHAPITRE 5 - VALIDATION INDUSTRIELLE

Ce cinquième chapitre a pour objectif de transformer les relargages bruts des 87 étoffes ennoblies des plans d'expériences en véritables règles de conception pour l'industrie textile. L'objectif est de concevoir des textiles générant moins de FFMP au premier lavage. D'abord en comparant la responsabilité des différents procédés textiles entre eux. Puis en envisageant de prédire le relargage de n'importe quel textile en développement en fonction des choix de conception qui le composent.

5.1. GUIDE D'ÉCOCONCEPTION

A l'issue de l'étude de chaque procédé textile, il est possible de générer les bonnes pratiques dans l'optique de réduire le relargage de FFMP avec une conception maîtrisée des procédés textiles. Cette analyse se poursuit dans un premier temps dans le détail de chaque procédé avec le rappel des facteurs ayant un effet significatif sur le relargage. Ensuite les procédés sont comparés entre eux pour faire ressortir les différents ordres de grandeur.

5.1.1. A L'ÉCHELLE DES PROCÉDÉS

D'abord, il est important de rappeler que tous ces résultats de relargage sont collectés sur des étoffes ennoblies, autrement dit des rouleaux de tissus et de tricotés sortis d'usine, prêts à rejoindre l'étape de confection pour être assemblés en vêtements. A cette échelle, la simulation de lavage TMC standardisée équivaut à un premier lavage domestique effectué par un consommateur lors duquel les FFMP sont émis. A l'issue de l'ensemble des 87 tests des plans d'expériences, chaque procédé étudié a révélé au moins un facteur significatif sur le relargage de FFMP dans son périmètre. Il est donc possible de minimiser le relargage au premier lavage dès la conception en prenant en compte chaque procédé textile. Pour rappel, les résultats de ces recherches sont valables dans les conditions expérimentales des plans d'expériences présentés précédemment. Ces résultats donnent lieu aux recommandations industrielles suivantes :

- La teinture en masse avec des noirs de carbone dans les multifilaments minimise les émissions de FFMP (303 mg/kg en moyenne) par rapport à la teinture sur tricot (625 mg/kg).

- A propos des filés de fibres, le type de filature est déterminant, le procédé open-end est à éviter (1778 mg/kg en moyenne) pour privilégier la filature airjet ou la filature traditionnelle (ring-siro-compact) et réduire les émissions à 640 mg/kg en moyenne.
- En tissage, une densité chaîne faible de 40 fils/cm (374 mg/kg) réduit de 200 mg/kg le relargage en moyenne par rapport à une densité plus élevée de 60 fils/cm (574 mg/kg).
- Lorsque l'application d'un textile en multifilament le permet, le tricot indémaillable est l'étoffe à privilégier pour son faible relargage (149 mg/kg en moyenne, $\sigma = 31$ mg/kg) environ trois fois moins important que les tricots circulaires (462 mg/kg en moyenne, $\sigma = 86$ mg/kg) ou que les tissus (451 mg/kg en moyenne, $\sigma = 97$ mg/kg).
- A noter sur les structures de tissus et de tricots que les facteurs ne semblent pas significatifs au regard des écart-types. Pourtant, une tendance semble se dessiner pour réduire le relargage. Il s'agit des flottés en tissage ainsi que des charges en tricotage, le satin est l'armure la moins relarguante, tout comme son homologue satin en tricotage indémaillable, ainsi que le piqué pour le tricotage circulaire.
- Enfin, les traitements de finitions mécaniques tirent le relargage des tricots circulaires à la hausse (779 mg/kg en moyenne, $\sigma = 68$ mg/kg). Ce constat est principalement vrai pour les finitions mécaniques sur deux faces (en moyenne 984 mg/kg), mais à nuancer pour les grattages sur une seule face dont le relargage moyen est de seulement 165 mg/kg.
- Finalement, les finitions chimiques sont à la fin de la chaîne de transformation textile et pourtant leur rôle est décisif. Un traitement hydrophobe minimise le relargage des tricots circulaires à 133 mg/kg, alors qu'à l'inverse un traitement hydrophile peut l'augmenter considérablement à 1710 mg/kg.

Le Tableau 22 synthétise ces résultats marquants de chaque procédé en associant le visuel des filtres récupérés au laboratoire à l'issue de la simulation de lavage standardisée TMC. Certains filtres sont peu marqués après la filtration des eaux de lavage à l'image de ceux associés aux tricots indémaillables. De légères nuances sont observables entre les filtres des multifilaments, des tissus, et des tricots circulaires. Tandis que d'autres filtres sont obstrués par les FFMP, soit partiellement pour les tricots avec un apprêt mécanique sur deux faces, ou totalement pour ceux ayant filtrés les eaux de lavage des filés de fibres open-end.

MULTIFILAMENTS	FILÉS DE FIBRES	TISSUS	TRICOTS	FINITIONS
Teints en masse	Ring-Siro-Airjet	Densité chaîne faible	Indémaillables	Grattage sur une face
303 mg/kg	640 mg/kg	374 mg/kg	149 mg/kg	165 mg/kg
				
Teints sur tricots	Open-end	Densité chaîne forte	Circulaires	Apprêts sur deux face
625 mg/kg	1778 mg/kg	574 mg/kg	462 mg/kg	984 mg/kg
				

Tableau 22 - Synthèse visuelle des filtres issus des méthodes de test TMC des simulations de lavage reprenant les facteurs significatifs.

5.1.2. A L'ÉCHELLE DU FIL

L'analyse des relargages se poursuit avec des comparaisons statistiques entre les différents procédés textiles pour mettre en évidence les ordres de grandeur des émissions de FFMP. La première tendance observée en Figure 95 compare le relargage moyen des structures contenant des multifilaments comparés aux filés de fibres. L'ensemble des structures en multifilaments (celles du premier plan d'expériences, mais aussi celles des tissus et des tricots sans finition) ont un relargage moyen de 404 mg/kg. Une dispersion de ces résultats est notable avec les paramètres variés étudiés dans le plan d'expériences sur les multifilaments. En comparaison, le relargage moyen du plan d'expériences de filature est de 925 mg/kg en moyenne ($\sigma = 66$ mg/kg). Ce résultat inclut les filés de fibres open-end, sans eux la moyenne de relargage diminue à 640 mg/kg en considérant uniquement les airjet, ring, et siro-compact. La bibliographie du premier chapitre est vérifiée avec ce résultat. Cette tendance peut s'expliquer notamment par le fait que les multifilaments sont composés de fibres longues continues comparées aux fibres courtes des filés de fibres. Ainsi le relargage est minimisé avec des multifilaments.

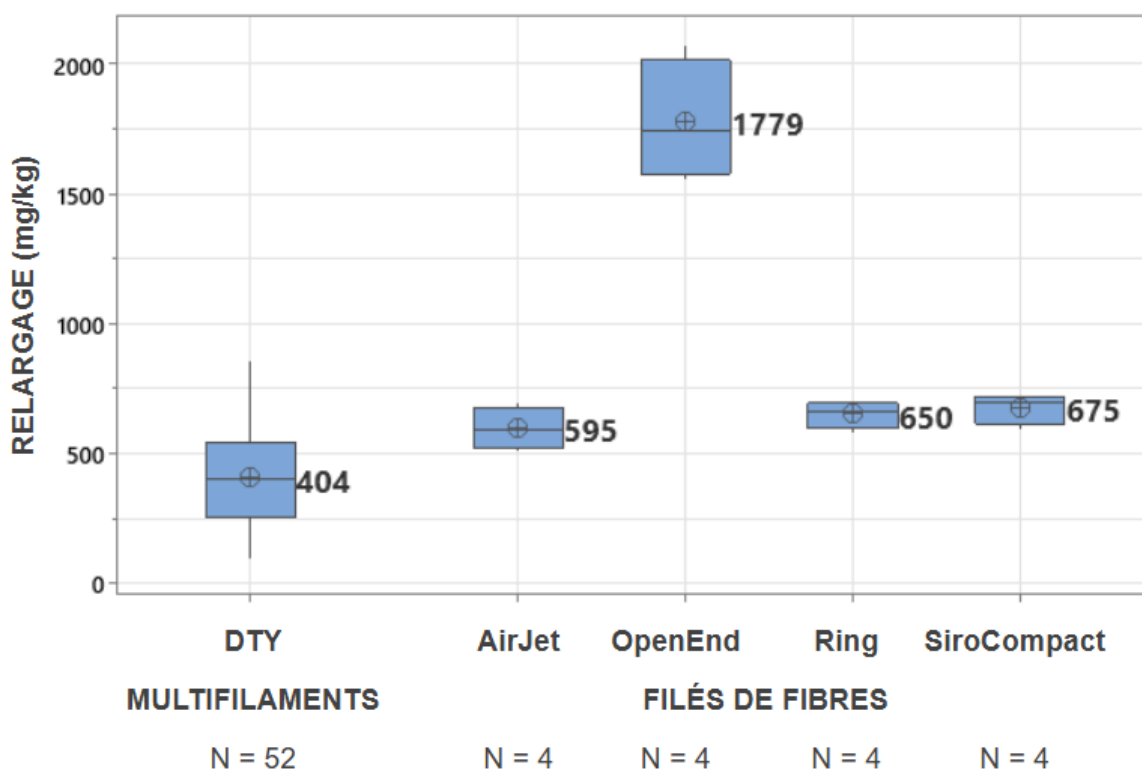


Figure 95 - Comparaison du relargage moyen des textiles en multifilaments comparés aux filés de fibres.

5.1.3. A L'ÉCHELLE DES ÉTOFFES

A l'échelle des étoffes, la Figure 96 illustre les différences de relargage entre toutes les références de tricotés et de tissus. Le premier constat est que les tricotés circulaires composés de filés de fibres (airjet - ring - siro-compact) ont le relargage le plus élevé avec 640 mg/kg en moyenne parmi les quatre groupes d'étoffes comparés. Cette dernière position s'explique par le type de fil utilisé dans la structure avec un avantage pour les multifilaments comme expliqué précédemment. Le type de fil est donc un paramètre dominant sur la structure textile. En considérant le même fil, en l'occurrence un multifilament, pour comparer des tricotés et des tissus, l'observation est que le relargage des tricotés circulaires en multifilament diminue à 451 mg/kg. Autrement dit, les tricotés circulaires en multifilaments sont au même niveau que les tissus, également avec un relargage moyen de 451 mg/kg ($\sigma = 97$ mg/kg). A noter que la dispersion est plus marquée dans la catégorie des tricotés circulaires, avec une médiane légèrement plus élevée que pour les tissus. L'avantage final de cette discussion revient aux tricotés indémaillables avec une moyenne de relargage de 149 mg/kg en moyenne ($\sigma = 31$ mg/kg), soit environ 3 fois inférieure aux autres étoffes.

Ce classement peut s'expliquer par le fait que le tricotage indémaillable utilise un fil pour une seule aiguille, ce qui diminue largement les frottements en comparaison du tricotage circulaire où le fil passe dans toutes les aiguilles, et au tissage où le peigne rabat fortement le fil de trame et les fils de chaîne frottent à chaque changement de face. La littérature indiquait un relargage plus faible pour les tissus, cette tendance est donc à nuancer avec des tricots circulaires en multifilaments et encore plus si les tricots indémaillables sont pris en compte dans la comparaison.

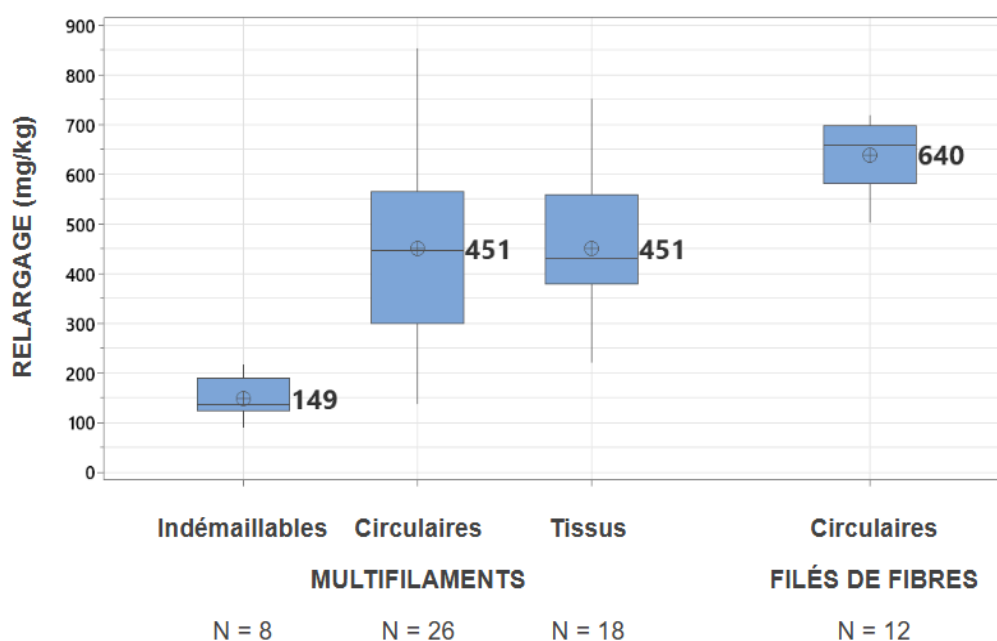


Figure 96 - Comparaison du relargage moyen des tricots et des tissus.

5.1.4. A L'ÉCHELLE DES FINITIONS

A la surface des tricots, une conclusion hâtive serait de penser que les traitements de finitions chimiques (682 mg/kg en moyenne, $\sigma = 100$ mg/kg) et mécaniques (779 mg/kg en moyenne, $\sigma = 66$ mg/kg) augmentent le relargage initial de 451 mg/kg. Cependant, en ajoutant les valeurs individuelles des essais en Figure 97, ce constat est à nuancer. Au niveau des finitions chimiques, trois résultats extrêmes décrits précédemment sont constatés avec les apprêts hydrophiles et hydrophobes. De même qu'un groupe de quatre finitions mécaniques minimise la moyenne de leur catégorie (les grattages sur une seule face). La finition appliquée à la surface des tricots fait pencher le relargage d'une étoffe d'un extrême à un autre. Ces traitements de surface sont donc cruciaux dans l'optique de limiter les émissions de FFMP.

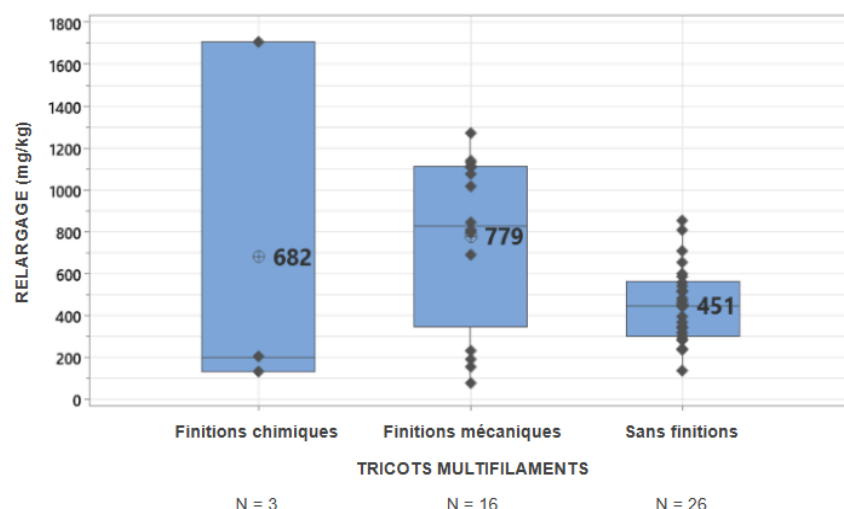


Figure 97 - Comparaison du relargage moyen des traitements de surface sur tricots.

5.1.5. A L'ÉCHELLE DU TEXTILE

Ainsi la Figure 98 reprend la synthèse statistique de toute la base de données consolidées avec l'ensemble des plans d'expériences de tous les procédés textiles étudiés. En l'occurrence, une boîte à moustache est représentée en considérant l'ensemble des 87 échantillons de tous les plans d'expériences. La moyenne du relargage se situe à 578 mg/kg. Elle est tirée vers le haut par les finitions mécaniques, l'apprêt hydrophile, et les échantillons open-end, en comparaison de la médiane à 513 mg/kg. Cinquante pourcent des essais de relargage sont compris entre le premier quartile (299 mg/kg) et le troisième quartile (708 mg/kg). Le relargage minimum atteint par cette base de données est de 75 mg/kg tandis que le maximum est de 2070 mg/kg.

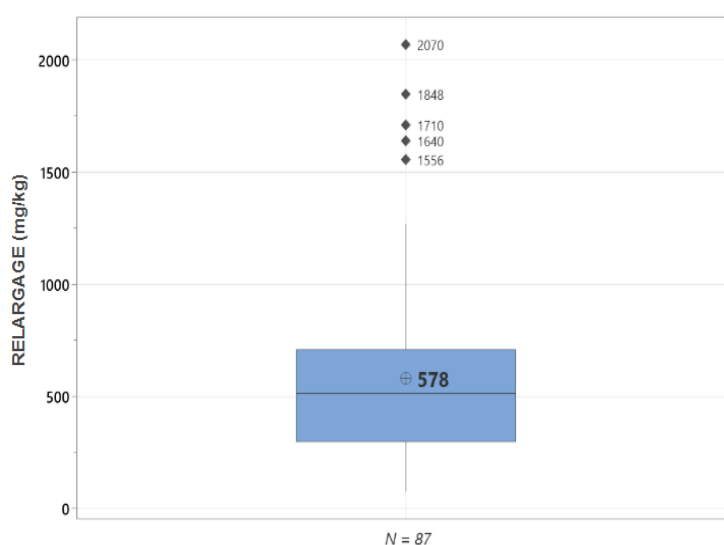


Figure 98 - Base de données du relargage de tous les plans d'expériences.

Cette hiérarchie des textiles en fonction de leur relargage donne une échelle du relargage de FFMP au premier lavage. Attention toutefois si la volonté est de travailler par procédé, il faut noter par exemple que tous les tricotés indémaillables sont au plus bas de cette boîte à moustache. Cette classification n'est donc pas discriminante de ce point de vue. En revanche, elle permet de montrer que le procédé de tricotage indémaillable est un atout pour minimiser le relargage de FFMP de textiles en polyester. Si l'on prend l'exemple opposé de la filature open-end, cette classification discrimine ce procédé. Pourtant, si seul ce procédé est considéré car la filature open-end est désirée pour l'application produit finale, il est possible de concevoir un fil open-end moins relarguant qu'un autre.

Tous ces éléments, observés jusqu'ici via le prisme de chaque procédé, vont être assemblés dans la prochaine partie pour réaliser les combinaisons de relargage de l'ensemble des procédés. Autrement dit, le relargage d'un fil, d'une étoffe, ou d'une finition est maintenant connu individuellement, mais qu'en est-il du relargage d'un type de fil utilisé dans une structure particulière, avec l'application d'une finition de surface spécifique ? Ce passage à l'échelle comprenant l'ensemble de la chaîne de transformation textile est crucial pour être représentatif de tous les paramètres de la chaîne de transformation textile.

5.1.6. COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE

A titre de comparaison, la littérature a également avancé sur le sujet pendant le déroulement du projet. Les articles scientifiques sur la fragmentation des structures textiles ont été compilés dans le dernier rapport de synthèse en date de (Han et al., 2024) [85]. 52 publications ont été sélectionnées pour donner l'influence de chaque propriété textile sur le relargage de FFMP. Dans un autre registre, un consortium d'industriels a également travaillé sur le sujet des causes fondamentales de la fragmentation textile. En effet, les signataires de The Microfibre Consortium réalisent chaque année un nombre d'essais minimum pour quantifier le relargage de FFMP de leurs étoffes selon la méthode TMC. Les résultats sont renseignés dans la base de données de TMC et décrit dans le dernier rapport de (Bland et al., 2025) [86]. De nombreux paramètres sont pris en compte à chaque échelle de la structure textile (la matière, le type de fil, le type d'étoffe, le type de teinture, et les finitions appliquées).

⁸⁵ Han et al., 2024

⁸⁶ Bland et al., 2025

Parmi tous les paramètres, cinq d'entre eux influencent davantage le relargage. Les deux premiers paramètres influencent la structure textile à générer plus de FFMP lorsqu'ils sont présents, il s'agit des textiles :

1. avec des traitements hydrophiles
2. en coton

A l'inverse, les trois paramètres suivants ont vocation à minimiser le relargage de FFMP lorsqu'ils sont utilisés dans la structure textile, il s'agit des textiles :

3. **en polyester**
4. **avec des traitements hydrophobes**
5. **sans finitions mécaniques**

Le Tableau 23 compare les propriétés des textiles qui influencent le relargage à la baisse selon la synthèse de (Han et al., 2024), avec les paramètres de la structure textile qui minimisent les émissions de FFMP d'après le rapport de (Bland et al., 2025), et les résultats des plans d'expériences de ce projet de thèse.

	Synthèse (Han et al., 2024)	Rapport (Bland et al., 2025)	Thèse (Cosne et al., 2025)
FIBRES	+ tenaces + longues	+ longues polyester recyclé = vierge	ténacité = facteur neutre + longues polyester recyclé = vierge
FILS	en multifilaments + de torsion (optimale) filés de fibres - pileux	en multifilaments + de torsion en filature airjet plutôt que ring	en multifilaments avec teinture en masse (noirs de carbone), entremêlement fort, et filaments épais en filature airjet et conventionnelle plutôt qu'open-end filés de fibres + résistants à l'abrasion fil-fil
ÉTOFFES	+ résistantes à l'abrasion + serrées (optimale)	tissus plutôt que tricotés avec + de densité de fils	tricotés indémaillables + souples, déformables, mobiles - denses en fils avec teinture plutôt que non-teint
SURFACES	finition mécanique avec - de fibres apparentes finition chimique avec + de résistance à l'abrasion	finition mécanique de rasage et avec - de passages en grattage finition chimique hydrophobe plutôt que hydrophile	finition mécanique de grattage sur une seule face finition chimique hydrophobe plutôt que hydrophile
VÊTEMENTS	avec des coutures qui scellent et bloquent les bords des étoffes	non-considéré	non-considéré

Tableau 23 - Comparaison des paramètres des propriétés et des structures textiles pour minimiser le relargage de FFMP au premier lavage.

Dans ce tableau comparatif, plusieurs tendances sont observées à chaque échelle de la structure textile pour minimiser le relargage de fragments de fibres textiles. Certaines de ces tendances sont communes comme l'utilisation de fibres longues dans les filés de fibres, ou plus communément la préférence des multifilaments avec des fibres continues. Pour rappel, les plans d'expériences ont donné un relargage moyen de 925 mg/kg pour les filés de fibres et de 404 mg/kg pour les multifilaments. En comparaison de la thèse, (Bland et al., 2025) annoncent un relargage moyen de 800 mg/kg pour les filés des fibres et de 565 mg/kg pour les multifilaments. Le classement est le même bien que l'écart entre les deux familles de fils soit moins conséquent.

D'autres tendances évoluent au fur et à mesure des études. D'abord la littérature donnait la préférence aux filés de fibres moins pileux, puis (Bland et al., 2025) complètent cette notion de pilosité avec le type de filature. En effet, la filature airjet minimise le relargage par sa faible pilosité par rapport aux ring. La thèse poursuit l'étude des types de filature, elle confirme que la filature airjet (595 mg/kg) est à privilégier devant la filature traditionnelle (ring 650 mg/kg et siro-compact 670 mg/kg), mais surtout en comparaison de la filature open-end (1778 mg/kg) avec ses filés de fibres plus pileux avec moins de cohésion.

Les pistes pour minimiser le relargage à l'aide des finitions chimiques deviennent plus concrètes également au fur et à mesure des études. En effet, la littérature de 2024 privilégie la résistance à l'abrasion. Tandis que les bases de données se rejoignent pour classer les traitements chimiques en deux catégories avec les apprêts hydrophobes ou hydrophiles. Selon (Bland et al., 2025), les traitements hydrophobes émettent 437 mg/kg FFMP en moyenne à l'opposé des traitements hydrophiles au relargage moyen de 665 mg/kg. A noter qu'au milieu se trouve la catégorie des étoffes sans finition chimique avec un relargage moyen de 571 mg/kg.

De nouvelles tendances apparaissent également avec les bases de données. En premier lieu, un résultat similaire est obtenu sur le type de polyester : le recyclé n'augmente pas les proportions de FFMP émis au lavage en comparaison avec le vierge. Les mêmes ordres de grandeur sont mesurés peu importe le type de polyester. Dans le rapport de (Bland et al., 2025), 409 références sont en 100% polyester pour un relargage moyen de 573 mg/kg, identique à celui de la base de données des 87 échantillons de la thèse avec en moyenne 578 mg/kg de FFMP émis.

La teinture est également pointée du doigt, les travaux de thèse mettent en évidence que les tricots non-teints sont trois fois plus relarguants que les tricots ennoblis. D'après (Bland et al., 2025), il ressort que les étoffes non-teintes génèrent des quantités de FFMP très proches en moyenne (643 mg/kg) que celles qui sont teintées sur étoffes (635 mg/kg) ou sur fils (605 mg/kg). La thèse ajoute la notion de teinture en masse dans la discussion, notamment avec des noirs de carbone, qui permettent de diminuer le relargage par absorption et dissipation des sollicitations sur la matière.

Enfin, certaines tendances restent complexes à apprivoiser. Un consensus est trouvé pour dire que les finitions mécaniques conduisent à des émissions de FFMP accrues. Pourtant ce constat est à nuancer puisque certaines finitions mécaniques semblent moins émettrices que d'autres. Selon (Bland et al., 2025), il s'agit des finitions mécaniques avec moins de passage en grattage ou avec rasage. Dans les plans d'expériences de la thèse, le rasage n'a pas démontré une réduction des émissions de FFMP. Quant au grattage, le nombre de passage a été un facteur moins influent que le nombre de faces sur lequel l'étoffe est grattée. En l'occurrence, un grattage sur une face a permis d'obtenir un relargage minimal en comparaison du même nombre de passages mais sur les deux faces.

A l'échelle des étoffes, les tendances pour minimiser le relargage divergent. La résistance à l'abrasion et la serre de l'étoffe sont déterminantes pour minimiser les FFMP selon la littérature. La thèse n'a pas confirmé ces deux résultats, la résistance à l'abrasion ne corrèle pas directement avec le relargage, tandis que la serre de l'étoffe est un phénomène complexe. Pour (Bland et al., 2025), les tissus (591 mg/kg) relarguent moins que les tricots circulaires (707 mg/kg). Cette tendance s'explique par le fait que l'ensemble des tricots circulaires sont considérés, aussi bien ceux en filaments que ceux en filés de fibres ou en coton, cela fait donc pencher la balance vers un relargage plus élevés pour les tricots. La thèse montre qu'à structure de fil égale comme par exemple avec des multifilaments, les tricots et les tissus relarguent autant de FFMP en moyenne (451 mg/kg). A noter que les tricots indémaillables sont les étoffes les moins relarguantes dans les deux études, mais à des ordres de grandeur différents, respectivement de 149 mg/kg et 485 mg/kg en moyenne. D'après (Bland et al., 2025), le relargage des étoffes est également influencé par la densité des fils. Selon la thèse, le principal critère serait une densité de fil plus faible en chaîne pour les tissus, et une longueur de fil absorbé plus grande pour les tricots. La rigidité de l'armure du tissu ou de la contexture du tricot influe sur le relargage, plus les étoffes sont plus souples, plus leur relargage est diminué.

L'ensemble des tendances citées permettent de faire avancer la recherche de l'industrie textile vers une meilleure compréhension des causes fondamentales de la fragmentation des textiles. Ces tendances pour minimiser le relargage sont liées aux structures textiles elles même mais aussi aux procédés textiles qui les précèdent. C'est pourquoi il est nécessaire de les utiliser pour permettre d'estimer le relargage de FFMP d'un textile au premier lavage en fonction de sa structure et de ses procédés, autrement dit de ses choix de conception.

5.2. ESTIMATION DU RELARGAGE

En complément du quatrième chapitre où les procédés ont été étudiés tour à tour selon une vue isolée avec des paramètres variables et d'autres paramètres fixes, ce cinquième chapitre a pour but d'effectuer l'assemblage des procédés. L'objectif est véritablement de passer à une vue d'ensemble des paramètres de la chaîne de transformation textile qui affecte la fragmentation textile. Cette vue d'ensemble est obtenue par des combinaisons des procédés textiles, puis confirmées en pratique. Concrètement, pour un textile donné, les effets des facteurs du fils sont combinés à ceux de son étoffe, puis de ses finitions. Ces effets calculés via Taguchi sont ensuite additionnés ou soustraits à la moyenne des plans d'expériences à laquelle le textile choisi correspond. Ainsi, le relargage final d'un textile en développement est estimé. A noter que cette simulation du relargage ne prend en compte aucune interaction potentielle entre les procédés combinés. Ensuite ces estimations sont vérifiées dans la pratique via une simulation de lavage TMC effectué sur le véritable textile dont toutes les caractéristiques du fil aux finitions sont connues. Les résultats seront donc corrélés par la pratique pour affiner le modèle et fournir un véritable outil prédictif du relargage de FFMP.

5.2.1. MÉTHODE DE PRÉDICTION

5.2.1.1. COMBINER LES PROCÉDÉS TEXTILES

Dans la dernière figure du chapitre 4, la synthèse des plans d'expériences montre qu'il est possible de relier les procédés étudiés par des passerelles. Par exemple, le lien entre les facteurs des multifilaments et le tricotage est assez évident car les études ont bien été réalisées. Cependant, des extrapolations sont également effectuées pour permettre les simulations. Par exemple, les résultats de relargage du plan d'expériences sur les multifilaments sont obtenus à partir de tricotages circulaires interlock. Or, pour les estimations, ces résultats sont également considérés comme valables pour les multifilaments qui composent d'autres tricotages circulaires comme les jerseys et piqués, et surtout étendus aux tricotages indémaillables et aux tissus en multifilaments. Ces partis pris sont nécessaires pour couvrir l'étendue de l'offre textile de l'entreprise. Les combinaisons de procédés fils (filage ou filature) avec des procédés d'étoffes (tissage ou tricotage) sont les suivantes :

- Filage Multifilaments + Tissage
- Filage Multifilaments + Tricotage circulaire (+ Finitions de surface en option)
- Filage Multifilaments + Tricotage indémaillable
- Filature Filés de fibres + Tricotage circulaire (cas particulier Open-end)

5.2.1.2. MODÉLISER LE RELARGAGE

Afin de calculer les impacts des combinaisons de procédés fils avec des procédés d'étoffes définies dans le paragraphe précédent, quatre méthodes de calcul différentes ont été définies. Chacune associe un procédé de fils avec un procédé d'étoffes. Elles sont présentées selon les quatre équations suivantes :

- **Méthode 1 :** Cette méthode prend en compte les valeurs moyennes de relargage des deux procédés et leur ajoute les valeurs des effets des facteurs choisis :

Méthode 1 = Moyenne Procédé Fils + Moyenne Procédé Etoffes + Effets Procédé Fils + Effets Procédé Etoffes

Equation 2 – Calcul du relargage selon la méthode 1.

- **Méthode 2 :** Cette méthode considère la moyenne des tests individuels pour les deux procédés étudiés à laquelle on ajoute les effets des facteurs :

Méthode 2 = $\frac{\text{Somme Tests Procédé Fils} + \text{Somme Tests Procédé Etoffes}}{\text{Nombre Tests Procédé Fils} + \text{Nombre Tests Procédé Etoffes}} + \text{Effets Procédé Fils} + \text{Effets Procédé Etoffes}$

Equation 3 – Calcul du relargage selon la méthode 2.

- **Méthode 3 :** Cette méthode réalise la moyenne des moyennes des procédés étudiés, à laquelle on ajoute les effets des facteurs :

Méthode 3 = $\frac{\text{Moyenne Procédé Fils} + \text{Moyenne Procédé Etoffes}}{2} + \text{Effets Procédé Fils} + \text{Effets Procédé Etoffes}$

Equation 4 – Calcul du relargage selon la méthode 3.

- **Méthode 4 :** Cette méthode reprend la moyenne des 87 relargages de la base de données (soit 578 mg/kg), à laquelle on ajoute les effets des facteurs :

Méthode 4 = Moyenne Globale + Effets Procédé Fils + Effets Procédé Etoffes

Equation 5 – Calcul du relargage selon la méthode 4.

En appliquant chaque méthode aux combinaisons de procédés, tous les essais des plans d'expériences ont été simulés pour obtenir leurs relargages estimés. L'écart individuel entre ce relargage estimé de chaque simulation et son essai pratique réalisé au laboratoire selon la méthode TMC a été mesuré sous la

$$\text{Rapport } X = \frac{\text{Relargage estimé Méthode } X}{\text{Test pratique TMC}}$$

forme du rapport suivant :

Equation 6 – Calcul du rapport entre relargage estimé et relargage pratique.

Un rapport égal à 1 indique donc une simulation égale au test pratique, il s'agit de l'objectif à atteindre. Cependant les rapports varient en fonction des essais individuels, mais surtout en fonction des combinaisons de procédés et des méthodes. Le Tableau 24 rend compte du rapport moyen de chaque méthode pour chaque combinaison de procédés. Lorsque le rapport est supérieur à 1, le relargage simulé est supérieur au relargage pratique, et inversement.

	Filage Multifilaments	Filage Multifilaments	Filage Multifilaments	Filature Filés de fibres	Filature Open-end
	+	+	+	+	+
	Tissage	Tricotage circulaire	Tricotage indémaillable	Tricotage circulaire	Tricotage circulaire
Rapport Méthode 1	2,24	2,22	5,08	1,49	1,64
Rapport Méthode 2	1,13	1,17	3,46	0,94	0,86
Rapport Méthode 3	1,13	1,69	4,74	0,84	1,00
Rapport Méthode 4	1,32	1,33	4,72	0,59	0,67

Tableau 24 - Rapports moyens pour chaque méthode en fonction de la combinaison de procédés étudiée.

A la lecture des rapports des combinaisons de procédés, il n'y a pas de méthode qui se distingue. Comme il n'est pas possible de sélectionner une méthode unique pour générer un modèle simple, le choix est donc fait de toutes les conserver, de les pondérer par leur rapport respectif, et enfin de les moyenner. Ce relargage estimé global aux quatre méthodes possède un rapport moyen égal à 1 pour toutes les combinaisons de procédés (avec un écart-type de 0,14). L'équation suivante décrit cette méthode globale pour calculer le relargage estimé du modèle de prédiction :

$$\text{Relargage estimé} = \frac{\left(\frac{\text{Relargage Méthode 1}}{\text{Rapport Méthode 1}} + \frac{\text{Relargage Méthode 2}}{\text{Rapport Méthode 2}} + \frac{\text{Relargage Méthode 3}}{\text{Rapport Méthode 3}} + \frac{\text{Relargage Méthode 4}}{\text{Rapport Méthode 4}} \right)}{4}$$

Equation 7 – Calcul du relargage estimé selon la méthode globale.

Maintenant que le relargage des procédés du fil et de l'étoffe sont associés, il reste à ajouter les effets des finitions mécaniques et chimiques à la surface des tricotés en multifilaments. Les effets des finitions obtenus au chapitre 4 sont ajoutés directement au relargage estimé du tricot étudié, selon l'équation suivante :

$$\text{Relargage estimé (tricot en multifilaments avec finitions)} = \text{Relargage estimé tricot} + \text{Effets Finitions}$$

Equation 8 – Calcul du relargage estimé d'un tricot avec une finition.

5.2.1.3. CONFIRMER LE MODÈLE

Le modèle utilisé pour prédire le relargage de FFMP est défini, toutes les combinaisons de procédés étudiés dans les plans d'expériences ont été réalisées. Leurs relargages estimés grâce à ce modèle sont comparés aux résultats pratiques pour vérifier la fiabilité du modèle. Ces résultats de simulation ont été mis en évidence sur le graphique ci-dessous en comparaison du relargage obtenus dans les différents plans d'expériences. Les 87 tests de la base de données sont visibles en Figure 99 puis réduits aux relargages inférieurs à 1000 mg/kg en Figure 100.

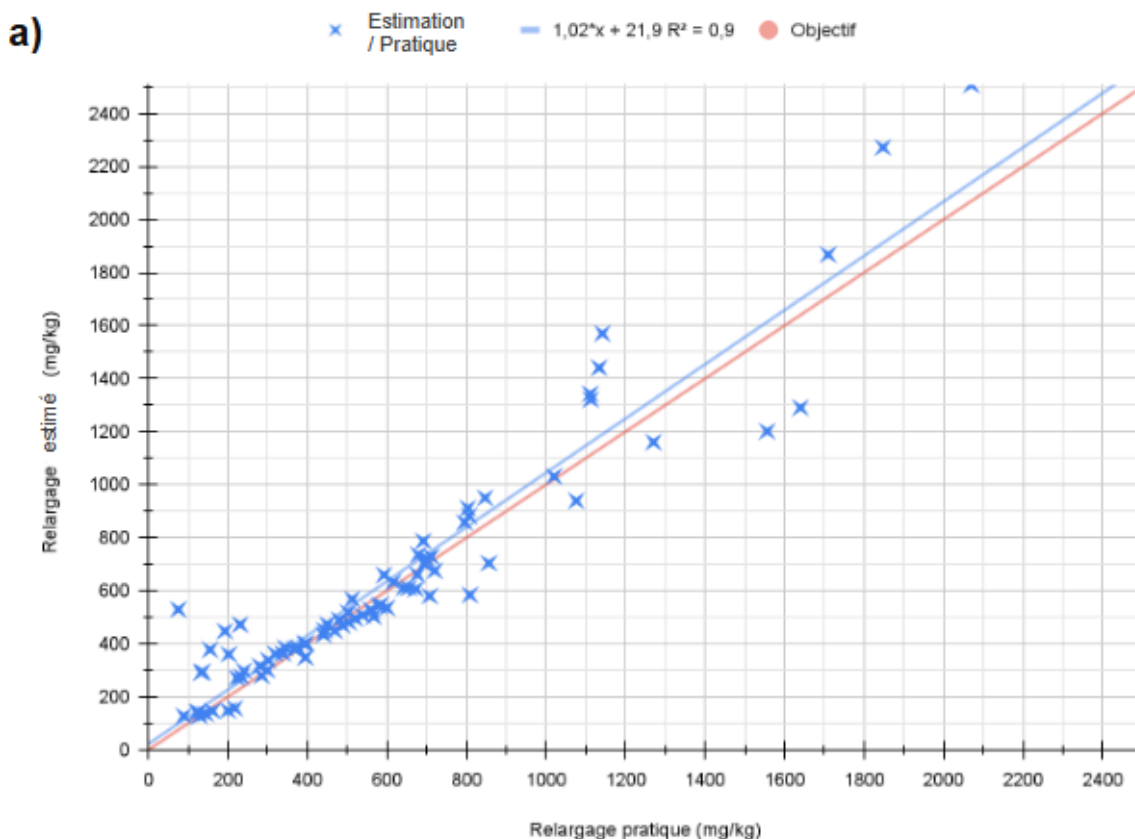


Figure 99 - Relargage estimé du modèle de prédiction comparé au relargage pratique sur l'entièreté de la base de données.

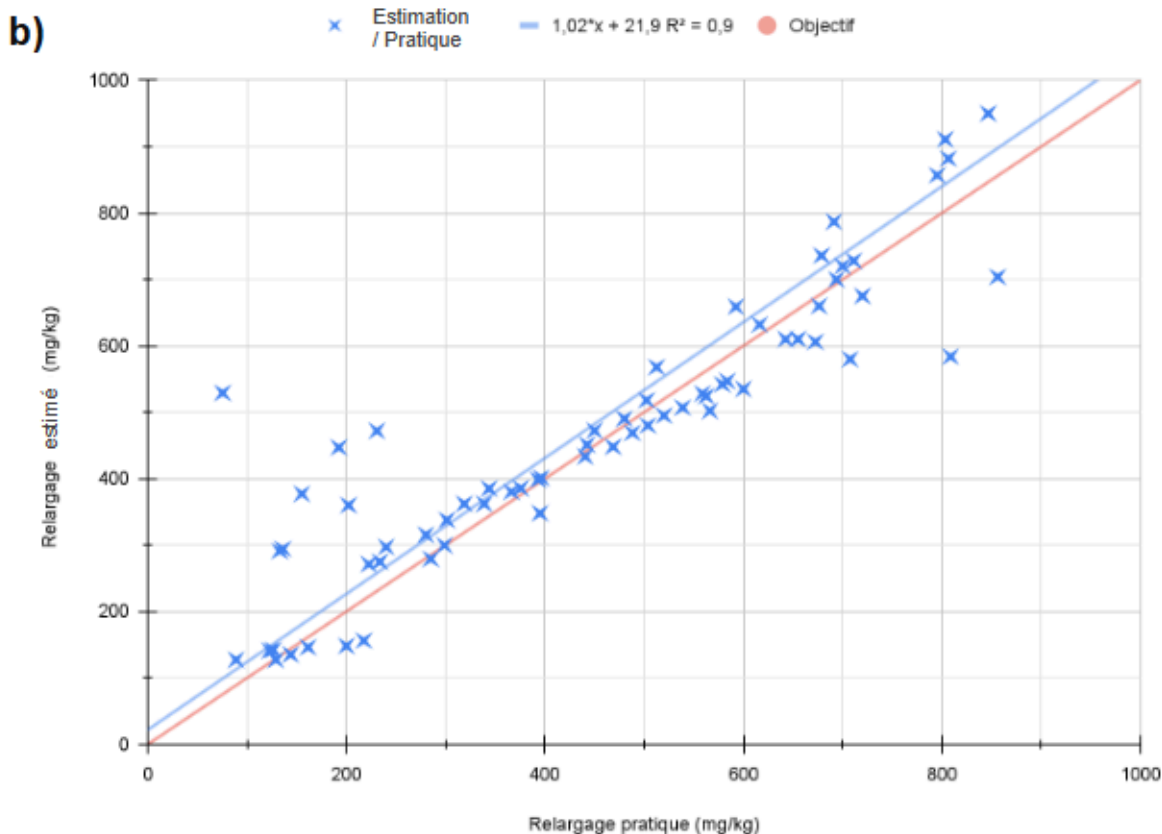


Figure 100 - Relargage estimé du modèle de prédiction comparé au relargage pratique de la base de données jusqu'à 1000 mg/kg.

La ligne rouge symbolise le rapport de 1 entre relargage pratique et relargage estimé, c'est l'objectif à atteindre par le modèle. Ce dernier s'en rapproche fortement dans l'ensemble mais suit la courbe de tendance bleue d'équation $1,02x + 21,9$ avec un $R^2 = 0,9$. Cette droite est légèrement au-dessus de l'objectif indiquant un relargage estimé en général légèrement supérieur au relargage pratique. Il est observé que le modèle est plutôt fiable pour des relargages de FFMP compris entre 300 et 800 mg/kg. Plus de dispersion est présente entre 100 et 200 mg/kg ainsi qu'au-delà de 1000 mg/kg. Le parti pris de pondérer les méthodes et de les moyenner semble bien fonctionner pour les relargages moyens mais met de côté les configurations extrêmes.

5.2.1.4. DÉVELOPPER UN OUTIL PRÉDICTIF

Le modèle de simulation du relargage étant établi, il est maintenant possible de le transformer en outil prédictif. L'objectif est de réaliser une interface accessible aux ingénieurs textiles travaillant en conception pour les sensibiliser et les orienter vers des structures textiles en polyester moins relarguantes en FFMP lors de leur premier lavage. Tous les paramètres des procédés textiles étudiés dans les plans d'expériences seront pris en compte dans cette interface en cours de développement afin de prédire le relargage de FFMP.

Sont pris en compte, d'abord le choix du fil entre multifilaments et filés de fibres, puis leurs sous-paramètres étudiés comme la teinture en masse ou le type de filature. Ensuite le choix de l'étoffe entre tissu ou tricot avec le détail de leurs caractéristiques (armures, densités, vitesse de production, ...). Si l'étoffe est un tricot, la dernière option est de choisir le traitement de surface mécanique ou chimique à utiliser, ou bien il est tout à fait possible de ne pas en appliquer. Tous ces paramètres génèrent un relargage estimé final en mg/kg selon le modèle de prédiction défini précédemment. Ainsi le relargage de FFMP pourra être prédit dès la conception de textile en polyester.

5.2.2. PERSPECTIVES D'OPTIMISATION

Ce modèle de simulation du relargage aura plusieurs finalités. Il pourra être considéré tel quel et comparé aux ordres de grandeur de relargage définis au début de ce chapitre afin de classer le textile associé au-dessus ou en-dessous de la moyenne de la base de données (578 mg/kg). Ce relargage estimé pourra également être ajusté en modifiant un ou plusieurs facteurs de conception directement sur l'interface afin de minimiser les émissions de FFMP. Enfin, il pourrait aussi faire l'objet d'une validation par la pratique avec un test de simulation de lavage standardisé dans l'éventuel respect d'un seuil de FFMP à ne pas dépasser.

Cependant le modèle permettant de prédire le relargage peut encore être amélioré. Bien que le R^2 de 0,9 indique une certaine fiabilité du modèle de prédiction, il n'est pas encore satisfaisant car pondéré et moyenné, il tend vers la moyenne et occulte les relargages faibles ou très élevés. Une piste de réflexion est d'améliorer le modèle en appliquant une méthode unique pour estimer le relargage. Par exemple, la méthode 2 semble plus proche de la pratique pour chacune des combinaisons de procédés selon ses rapports moyens. Des coefficients pourraient permettre de hiérarchiser les effets des facteurs de chaque procédé afin de l'améliorer. Une nouvelle méthode pourrait également voir le jour pour relier les plans d'expériences entre eux et ainsi intégrer les extrêmes.

Les tests pratiques présentés jusqu'ici sont ceux des plans d'expériences. Il s'agit de textile développés pour cette étude dans des conditions industrielles maîtrisées. Des tests de confirmations pratiques sur de véritables étoffes ennoblies commercialisées par l'entreprise sont en cours et à venir. L'idée est de simuler les textiles commercialisés par l'entreprise sur l'outil prédictif, en parallèle ces textiles sont soumis au lavage standardisé TMC. Ensuite les relargages estimés et pratiques sont comparés pour confirmer ou infirmer le modèle.

En résumé, l'outil prédictif permet de simuler le relargage de FFMP de manière fiable pour les échantillons au relargage moyen de 500 mg/kg. Cependant, toutes les gammes de textiles en polyester ne sont pas couvertes, notamment les relargages faibles et élevés. Des améliorations potentielles sont ciblées pour optimiser le modèle de cet outil. Pourtant, il est déjà fonctionnel et permet dorénavant de minimiser le relargage de FFMP au premier lavage par l'écoconception de textiles en polyester.

CONCLUSIONS

L'ambition de cette thèse était de remettre la conception au cœur de la problématique de fragmentation des textiles synthétiques en microplastiques. Dans cette optique, un état de l'art approfondi a permis de rassembler les connaissances scientifiques sur le sujet. La pollution microplastique est grandissante, elle a des conséquences avérées sur l'environnement et la santé. L'industrie textile porte une responsabilité dans cette problématique du fait de la génération de fragments de fibres microplastiques FFMP tout au long du cycle de vie des textiles synthétiques. Cette dégradation est causée par des phénomènes de frottement en production, d'abrasion lors du lavage, et de vieillissement en fin de vie.

Le lavage est l'étape du cycle de vie la plus étudiée pour comprendre la fragmentation des textiles. Des études ont démontré que le premier cycle de lavage est le plus émetteur de FFMP en comparaison avec les cycles de lavage suivants. L'hypothèse prise par la thèse est que la génération de FFMP d'un textile au premier lavage révèle l'influence des procédés utilisés pour produire ce textile. Le second constat est que le relargage peut varier d'une centaine à plus de mille milligrammes de FFMP pour un kilogramme de textile lavé. Ainsi la quantité de FFMP générée par un textile dépend de sa composition. Cela signifie que toutes les échelles de la structure d'un textile -fibres, fils, étoffes- ont une influence sur le relargage de FFMP. Dans la plupart des articles scientifiques de la littérature, les textiles utilisés pour étudier le relargage sont achetés en magasin ou sous forme d'échantillons. Les travaux de cette thèse se distinguent de l'état de l'art par la maîtrise des procédés textiles pour développer des échantillons aux caractéristiques définies sur des lignes pilotes semi-industrielles et de production industrielles. La méthode des plans d'expériences Taguchi permet d'étudier l'influence de chaque procédé de transformation textile sur le relargage. Ils permettent également d'approfondir l'étude à chaque échelle de la structure textile en rentrant dans le détail de certains paramètres de chaque procédé. Par exemple, les multifilaments issus du procédé de filage sont étudiés en fonction de plusieurs facteurs. Dans la bibliographie, la seule connaissance est que les multifilaments ont tendance à moins relarguer que les filés de fibres grâce à leurs filaments continus. Cependant les études n'ont pas comparé les multifilaments entre eux avec ce niveau de détails supplémentaires comme le type de polymère utilisé, les additifs présents, la finesse des filaments, ou encore la texturation appliquée. L'influence de ces sous-catégories de paramètres est prise en compte dans cette thèse pour chaque famille de fils (multifilaments et filés de fibres), d'étoffes (tissus et tricotés), et de finitions de surface (mécaniques et chimiques).

L'influence de tous ces paramètres sur le relargage au premier lavage apporte plus de granularité à l'état de l'art. Il est également possible de corrélérer le relargage des structures textiles avec leurs propriétés mécaniques (traction, éclatement, abrasion, entre autres). En amont des étoffes ennoblies, le relargage de certains tricots non-ennoblis a également été quantifié pour estimer les émissions de FFMP en production. L'ensemble de ces travaux avaient pour objectif de lever deux verrous scientifiques :

1. Comprendre les mécanismes de formation des fragments de fibres microplastiques le long de la chaîne de valeur textile.

Cette thèse est focalisée sur le relargage au premier lavage pour permettre aux industriels de comparer leurs étoffes ennoblies entre elles en sortie d'usine de production. Cependant, le relargage est plus complexe car il a également lieu en amont de la chaîne de transformation textile. Les étoffes ennoblies sont des tissus ou des tricots ayant subi des procédés d'ennoblissement comme la teinture. Des tricots en multifilaments ont montré que l'ennoblissement avait une influence sur les émissions de FFMP. En effet le relargage mesuré est environ trois fois plus conséquent en moyenne après l'étape de tricotage (1408 mg/kg en moyenne, $\sigma = 104$ mg/kg) que pour les mêmes tricots après leur ennoblissement (464 mg/kg en moyenne, $\sigma = 68$ mg/kg). Le relargage au premier lavage est donc minimisé par le procédé de teinture qui élimine une part importante des FFMP dès la production des textiles. Cette thèse n'a pas été menée sur toutes les étoffes non-ennoblies des autres procédés car elle se concentre sur l'écoconception d'étoffes ennoblies mises sur le marché. Pourtant, cette étude de cas sur les tricots en multifilaments place des enjeux forts sur la responsabilité de la pollution microplastique en production. Cela ouvre d'autres pistes de recherches à propos de l'impact du procédé de teinture sur la génération de FFMP et pose des questions de gestion des eaux usées dans les usines de production.

Une fois ennoblies, les fils et les étoffes sont caractérisés au laboratoire. Les propriétés mesurées à cette étape peuvent être corrélées aux relargages mesurés au premier lavage des étoffes ennoblies, à savoir:

- Les propriétés des filés de fibres ont montré que la mesure de l'abrasion fil-fil pouvait indiquer la propension du fil à relarguer. En effet, moins ils génèrent de fragments par abrasion, moins ils relarguent également des FFMP au premier lavage.

- Les tricots en multifilaments ont mis en évidence que la résistance à la traction des multifilaments et la résistance à l'éclatement des tricots sont corrélés avec le relargage : moins le textile est résistant, moins il relargue de FFMP. Pour les tissus, c'est la rigidité du tissu qui détermine le relargage. Elle s'exprime par le facteur de couverture et le coefficient de drapé : plus ces derniers sont faibles, plus les tissus sont souples, et moins le relargage est conséquent. L'hypothèse derrière ces corrélations est que plus les étoffes sont déformables, moins elles génèrent de FFMP. A noter que la résistance à l'abrasion des tricots n'a pas révélé de lien direct avec le relargage.

Ainsi, certaines propriétés textiles peuvent expliquer les mécanismes de formation des FFMP, bien que le relargage évolue tout au long de la chaîne de transformation textile, principalement avant et après l'étape cruciale de l'ennoblissement. Enfin, si l'on se place à l'échelle des étoffes ennoblies, le deuxième verrou scientifique de la thèse est le suivant :

2. Quantifier l'influence des différents procédés textiles sur le relargage pour en déduire des règles de conception limitant les émissions de fragments de fibres microplastiques au premier lavage.

L'influence des différents procédés textiles sur le relargage au premier lavage a été déterminée selon plusieurs plans d'expériences Taguchi. Des ordres de grandeur du relargage ont été déterminés en fonction des structures textiles. Celles-ci se divisent en trois échelles : les fils, les étoffes, et les surfaces du textile. Parmi elles, le choix du fil et l'application de traitement de finitions à la surface du textile sont des décisions de conception déterminantes sur les émissions de FFMP. Tandis que les procédés de fabrication des étoffes tricotées ou tissées sont relégués au second plan car moins influents sur le relargage de FFMP. Les principales tendances observées à ces différentes échelles sont les suivantes :

- Un tricot en multifilaments a un relargage en moyenne deux fois inférieur à un tricot en filé de fibres (464 mg/kg vs 925 mg/kg). Ce résultat confirme la littérature avec la capacité des fibres courtes à générer davantage de FFMP.
- A tricotage et finesse identique, la famille des filés de fibres open-end est quasiment trois fois plus relarguantes que les autres procédés de filatures ring, siro-compact, et airjet (1778 mg/kg vs 640 mg/kg).
- A tricotage et finesse identique, les multifilaments moins émetteurs de FFMP sont teints en masse avec des noirs de carbone, fortement entremêlés, et épais.

- Le type de polyester (vierge ou recyclé) n'est pas un paramètre déterminant sur le relargage de tricots ennoblis.
- A partir du même tricot en multifilaments, une finition mécanique de grattage sur une face est quasiment six fois moins émettrices en FFMP que des finitions mécaniques successives sur deux faces (165 mg/kg vs 984 mg/kg).
- A la surface du même tricot en multifilaments, les finitions chimiques hydrophobes sont plus de douze fois moins relarguantes que les finitions chimiques hydrophiles (133 mg/kg vs 1710 mg/kg).
- Les tricots en multifilaments relarguent autant en moyenne que les tissus en multifilaments (451 mg/kg pour chaque famille). L'influence des structures serrées pour minimiser le relargage évoquée dans la littérature n'est pas confirmée dans ces recherches. Ce phénomène semble plus complexe à définir en prenant en compte les densités de fils en tissage ou encore la longueur de fil absorbée en tricotage.
- Seule exception dans la catégorie des étoffes, les tricots indémaillables en multifilaments relarguent trois fois moins que les tissus et les tricots circulaires (149 mg/kg vs 451 mg/kg). Cela peut s'expliquer par la capacité de ce procédé à minimiser les frottements avec plusieurs fils de chaînes mais sans le peigne du tissage, et avec un fil par aiguille à la différence du tricotage.

Ces données montrent que le relargage varie en fonction d'une famille de procédé textile à une autre. Ainsi les choix d'écoconception parmi ces familles sont envisageables pour minimiser le relargage de fragments de fibres microplastiques. Il a également été montré dans ces travaux que des facteurs peuvent influencer sur le relargage au sein de chaque famille de procédés. Ces paramètres sont utilisables en l'état pour permettre d'estimer le relargage de n'importe quelle structure textile en développement en fonction du fil utilisé, de l'étoffe choisie, et de la finition de surface appliquée.

Ces travaux de recherche pour minimiser le relargage ont pour finalité d'être transmis aux équipes de conception industrielle. L'objectif est de leur permettre de prendre en compte l'influence des procédés sur le relargage de FFMP lors de la conception des matières textiles. À court terme, en renforçant l'étude avec plus de paramètres de production pour couvrir une gamme plus étendue d'étoffes textile et confirmer les hypothèses émises.

À plus long terme, il serait intéressant d'extrapoler ce travail à l'échelle du produit fini. En effet, le test au lavage actuel prend en compte une surface rectangulaire d'étoffe ennoblée dans une machine à laver adaptée. Une vérification de ce relargage avec un produit fini dans une machine à laver domestique serait plus proche de l'usage final. À noter que cette étude se concentre sur le polyester, alors que toutes les matières sont concernées par la fragmentation des textiles. C'est pourquoi ces travaux sont à poursuivre avec les autres matières synthétiques, ainsi que les matières naturelles.

D'autres perspectives sont à prendre en compte pour prolonger ces travaux. L'étude de cas en production établie que la teinture est un procédé déterminant sur la problématique du relargage. Une étude approfondie des différentes machines de teinture et des systèmes de filtration permettrait de mieux appréhender les pertes de FFMP en production. Un lavage industriel est également envisageable pour centraliser les flux de FFMP en production et minimiser les émissions au premier lavage. La fin de vie des textiles reste également un sujet dans la problématique de la pollution microplastique textile avec la génération de microplastiques secondaires. De plus, l'écoconception permet de minimiser le relargage de microplastiques primaires au lavage mais pas d'atteindre des émissions nulles. C'est pourquoi la piste des polymères biodégradables semble être une opportunité adaptée pour proposer une solution pour lutter contre les FFMP qui atteignent tout de même l'environnement. Enfin, la législation internationale aura également son importance pour faire adopter aux producteurs et aux consommateurs des comportements responsables dans la lutte contre la fragmentation des textiles en microplastiques. La réponse à un enjeu environnemental majeur tel que celui-ci n'est pas individuelle, comme celle apportée par cette thèse, mais plutôt collective avec l'ensemble des solutions proposées par toute l'industrie textile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Peano, A. Kounina, V. Magaud, S. Chalumeau, M. Zgola, et J. Boucher, « Plastic Leak Porject - Methodological Guidelines », Quantis & EA, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://quantis.com/who-we-guide/our-impact/sustainability-initiatives/plastic-leak-project/>

- [2] J. R. Jambeck *et al.*, « Plastic waste inputs from land into the ocean », *Science*, vol. 347, n° 6223, p. 768-771, févr. 2015, doi: 10.1126/science.1260352.

- [3] J. Boucher et D. Friot, *Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources*. IUCN International Union for Conservation of Nature, 2017. doi: 10.2305/IUCN.CH.2017.01.en.

- [4] E.-A. EA, « Leakage of microplastics into oceans and land », mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.e-a.earth/primary-microplastics-into-the-oceans-and-the-land/>

- [5] Fondation TARA Océan, « Microplastique, la face cachée d'une pollution globale », 2025, 2019, [En ligne]. Disponible sur: <https://fondationtaraoccean.org/actualite-scientifique/micro-plastiques-face-cachee-pollution-globale/>

- [6] F. De Falco, M. Cocca, M. Avella, et R. C. Thompson, « Microfiber Release to Water, Via Laundering, and to Air, via Everyday Use: A Comparison between Polyester Clothing with Differing Textile Parameters », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 54, n° 6, p. 3288-3296, mars 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b06892.

- [7] M. PALAZOT, C. FROGER, et M. KEDZIERSKI, « Recherche de microplastiques dans 33 sols français », Institut de Recherche Dupuy de Lôme - IRDL UNIVERSITE DE BRETAGNE SUD INRAe, France, PROJET MICROSOOF, oct. 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://bibliothec.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6572-projet-microsof-recherche-de-microplastiques-dans-33-sols-francais.html>

- [8] EEA, « Microplastics from textiles: towards a circular economy for textiles in Europe », European Environment Agency, DOI: 10.2800/512375, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.eea.europa.eu/publications/microplastics-from-textiles-towards-a>

- [9] T. Liévin, « Synthèse Bibliographique : La micropollution », GEMTEX, avr. 2022. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ecytwin.eu/synthese-bibliographique-la-micropollution/>

- [10] J. S. Weis et F. De Falco, « Microfibers: Environmental Problems and Textile Solutions », *Microplastics*, vol. 1, n° 4, p. 626-639, nov. 2022, doi: 10.3390/microplastics1040043.
- [11] Y.-Q. Zhang, M. Lykaki, M. Markiewicz, M. Taher Alrajoula, C. Kraas, et S. Stolte, « Environmental contamination by microplastics originating from textiles: Emission, transport, fate and toxicity », mai 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128453>
- [12] C. Walkinshaw, T. J. Tolhurst, P. K. Lindeque, R. C. Thompson, et M. Cole, « Impact of polyester and cotton microfibers on growth and sublethal biomarkers in juvenile mussels », *Microplastics Nanoplastics*, vol. 3, n° 1, p. 5, févr. 2023, doi: 10.1186/s43591-023-00052-8.
- [13] R. C. Thompson, W. Courtene-Jones, J. Boucher, S. Pahl, K. Raubenheimer, et A. A. Koelmans, « Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? », *Science*, vol. 386, n° 6720, p. eadl2746, oct. 2024, doi: 10.1126/science.adl2746.
- [14] R. Colpaert, L. Petit Dit Grézériat, M. Louzon, A. De Vaufleury, et F. Gimbert, « Polyethylene microplastic toxicity to the terrestrial snail *Cantareus aspersus*: size matters », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n° 20, p. 29258-29267, avr. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15824-z.
- [15] The Microfibre Consortium, « TMC Progress Report 2022-2024 », 2, 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.microfibreconsortium.com/tmc-progress-report-22-24>
- [16] N. Qian *et al.*, « Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy », *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 121, n° 3, p. e2300582121, janv. 2024, doi: 10.1073/pnas.2300582121.
- [17] A. P. Periyasamy et A. Tehrani-Bagha, « A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques », *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 199, p. 109901, mai 2022, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.109901.
- [18] Y. Feng *et al.*, « A systematic review of the impacts of exposure to micro- and nano-plastics on human tissue accumulation and health », *Eco-Environ. Health*, p. S2772985023000418, août 2023, doi: 10.1016/j.eehl.2023.08.002.
- [19] R. Marfella *et al.*, « Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events », *N. Engl. J. Med.*, vol. 390, n° 10, p. 900-910, mars 2024, doi: 10.1056/NEJMoa2309822.

- [20] S. Opperskalski, A. Franz, A. Patanè, S. Siew, et E. Tan, « Preferred Fiber & Materials Market Report », Textile Exchange, 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://textileexchange.org/app/uploads/2022/10/Textile-Exchange_PFMR_2022.pdf
- [21] The Microfibre Consortium et Fashion For Good, « BEHIND THE BREAK EXPLORING FIBRE FRAGMENTATION », 2025.
- [22] M. C. Zambrano, J. J. Pawlak, J. Daystar, M. Ankeny, J. J. Cheng, et R. A. Venditti, « Microfibers generated from the laundering of cotton, rayon and polyester based fabrics and their aquatic biodegradation », *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 142, p. 394-407, mai 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.02.062.
- [23] Y. Cai, D. M. Mitrano, R. Hufenus, et B. Nowack, « Formation of Fiber Fragments during Abrasion of Polyester Textiles », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, n° 12, p. 8001-8009, juin 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c00650.
- [24] T. Yang, M. Gao, et B. Nowack, « Formation of microplastic fibers and fibrils during abrasion of a representative set of 12 polyester textiles », *Sci. Total Environ.*, vol. 862, p. 160758, mars 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160758.
- [25] *TMC Test method : Quantification of fibre release from fabrics during domestic laundering*, septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.microfibreconsortium.com/the-tmc-test-method>
- [26] ISO, *ISO 4484-1:2023 - Textiles et produits textiles — Microplastiques d'origines textiles - Partie 1: Détermination des pertes de matière des étoffes pendant le lavage*, février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/82238.html>
- [27] Under Armour, James Heal, et Hohenstein, *DIN SPEC 19292 - Textiles - Test method for determination of fiber shedding potential during simulated washing*, décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dinmedia.de/en/technical-rule/din-spec-19292/385593558>
- [28] ISO, *ISO 4484-3:2023 - Textiles et produits textiles — Microplastiques d'origines textiles - Partie 3: Mesurage de la masse de matériaux collectés libérés par les produits finis textiles par la méthode de lavage domestique*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/81035.html>
- [29] ISO, *ISO/CD 4484-4 - Textiles and textile products — Microplastics from textile sources - Part 4: Quantitative thermal or gravimetric analysis of certain synthetic materials released from fabrics during washing*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/90151.html>
- [30] DIN, *DIN SPEC 4872:2023-02 - Test Method for Textiles - Determination of fibre release during washing and aerobic degradation level in aqueous medium in*

consideration of ecotoxicity, février 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dinmedia.de/en/technical-rule/din-spec-4872/362344141>

- [31] ISO, *ISO 4484-2:2023 - Textiles et produits textiles — Microplastiques d'origines textiles - Partie 2: Analyse qualitative et quantitative des microplastiques*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/80011.html>
- [32] J. Lim, J. Choi, A. Won, M. Kim, S. Kim, et C. Yun, « Cause of microfibers found in the domestic washing process of clothing; focusing on the manufacturing, wearing, and washing processes », *Fash. Text.*, vol. 9, n° 1, p. 24, déc. 2022, doi: 10.1186/s40691-022-00306-8.
- [33] T. Yang, J. Luo, et B. Nowack, « Characterization of Nanoplastics, Fibrils, and Microplastics Released during Washing and Abrasion of Polyester Textiles », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, n° 23, p. 15873-15881, déc. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c04826.
- [34] First Sentier MUFG, « Microfibres: the invisible pollution from textiles », Sustainable Investment Institute, 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.firstsentier-mufg-sustainability.com/content/dam/sustainabilityinstitute/assets/research/FSI-Sustainability-Investment-Institute-Report-January2022-final.pdf>
- [35] Mermaids et Life, « Handbook for zero microplastics from textiles and laundry », 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.oceancleanwash.org/wp-content/uploads/2019/08/Handbook-for-zero-microplastics-from-textiles-and-laundry-developed.pdf>
- [36] F. Belzagui et C. Gutiérrez-Bouzán, « Review on alternatives for the reduction of textile microfibers emission to water », *J. Environ. Manage.*, vol. 317, p. 115347, sept. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115347.
- [37] A. Muller, C. Jael, et S. Karen, « Tackling Microfibres at Source », FORUM FOR THE FUTURE, 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.forumforthefuture.org/Handlers/Download.ashx?IDMF=d7a2fd4d-e722-4566-9090-a6465111d1f4>
- [38] I. E. Napper et 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, n° 1-2, p. 39-45, nov. 2016, doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.025.
- [39] M. Stephan, « Enlightening microplastic release during domestic washing », DECATHLON, 2019.

- [40] A. Hazlehurst, L. Tiffin, M. Sumner, et M. Taylor, « Quantification of microfibre release from textiles during domestic laundering », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, janv. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25246-8.
- [41] D. Tao *et al.*, « Microfibers Released into the Air from a Household Tumble Dryer », *Environ. Sci. Technol. Lett.*, vol. 9, n° 2, p. 120-126, févr. 2022, doi: 10.1021/acs.estlett.1c00911.
- [42] S. Choi, M. Kwon, M.-J. Park, et J. Kim, « Analysis of Microplastics Released from Plain Woven Classified by Yarn Types during Washing and Drying », *Polymers*, vol. 13, n° 17, p. 2988, sept. 2021, doi: 10.3390/polym13172988.
- [43] B. Gupta, « Fundamental concepts of friction and lubrication affecting textile fibers », in *Friction in Textile Materials*, Elsevier, 2008, p. 37-66. doi: 10.1533/9781845694722.1.37.
- [44] N. Behary, C. Campagne, C. Caze, et A. Perwuelz, « Using an electronic microbalance technique to study the stick–slip behavior of lubricated polypropylene fibers », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, n° 3, p. 645-654, juill. 2003, doi: 10.1002/app.11958.
- [45] M.-A. Bueno, « Tribologie des textiles - Frottement, usure et propriétés mécaniques », *Frott. Usure Lubrif.*, déc. 2015, doi: 10.51257/a-v2-tri4400.
- [46] B. J. Hamrock, S. R. Schmid, et B. O. Jacobson, *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, 0 éd. CRC Press, 2004. doi: 10.1201/9780203021187.
- [47] N. Özdil, G. Özçelik, et G. Spren, « Analysis of Abrasion Characteristics in Textiles », in *Abrasion Resistance of Materials*, M. Adamiak, Éd., InTech, 2012. doi: 10.5772/29784.
- [48] J. W. S. Hearle, B. Lomas, et W. D. Cooke, *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*, 2. ed. Boca Raton: CRC Press [u.a.], 1998. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/book/9781855733190/atlas-of-fibre-fracture-and-damage-to-textiles>
- [49] B. P. Saville, *Physical testing of textiles*, Repr. Boca Raton, Fla: CRC Pr, 2002.
- [50] B. N. J. Persson, *Sliding Friction*. in NanoScience and Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. doi: 10.1007/978-3-662-04283-0.
- [51] A. R. Horrocks et S. C. Anand, *Handbook of Technical Textiles*, 2nd ed. in Woodhead Publishing Series in Textiles. Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2016.

- [52] N. L. Hartline, N. J. Bruce, S. N. Karba, E. O. Ruff, S. U. Sonar, et P. A. Holden, « Microfiber Masses Recovered from Conventional Machine Washing of New or Aged Garments », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 50, n° 21, p. 11532-11538, nov. 2016, doi: 10.1021/acs.est.6b03045.
- [53] N. J. Lant, A. S. Hayward, M. M. D. Peththawadu, K. J. Sheridan, et J. R. Dean, « Microfiber release from real soiled consumer laundry and the impact of fabric care products and washing conditions », *PLOS ONE*, vol. 15, n° 6, p. e0233332, juin 2020, doi: 10.1371/journal.pone.0233332.
- [54] M. Volgare *et al.*, « Washing load influences the microplastic release from polyester fabrics by affecting wettability and mechanical stress », *Sci. Rep.*, vol. 11, n° 1, p. 19479, sept. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-98836-6.
- [55] T. Stanton *et al.*, « Shedding off-the-grid: The role of garment manufacturing and textile care in global microfibre pollution », *J. Clean. Prod.*, vol. 428, p. 139391, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139391.
- [56] C. Wang *et al.*, « Microplastic Fiber Release by Laundry: A Comparative Study of Hand-Washing and Machine-Washing », *ACS EST Water*, vol. 3, n° 1, p. 147-155, janv. 2023, doi: 10.1021/acsestwater.2c00462.
- [57] Q. Deshoules, « Influence du vieillissement des polymères sur la formation et le comportement des microplastiques en milieu marin », L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03589679>
- [58] B. Pinlova et B. Nowack, « Characterization of fiber fragments released from polyester textiles during UV weathering », *Environ. Pollut.*, vol. 322, p. 121012, avr. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121012.
- [59] E. Bland et K. Sheridan, « Technical Research Report: Recycled Polyester within the context of Fibre Fragmentation », The Microfibre Consortium TMC, juin 2023.
- [60] M. Gao, T. Yang, C. Som, et B. Nowack, « Differences in the release of microplastic fibers and fibrils from virgin and recycled polyester textiles », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 207, p. 107659, août 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107659.
- [61] F. Belzagui, M. Crespi, A. Álvarez, C. Gutiérrez-Bouzán, et M. Vilaseca, « Microplastics' emissions: Microfibers' detachment from textile garments », *Environ. Pollut.*, vol. 248, p. 1028-1035, mai 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.02.059.
- [62] İ. Özkan et S. Gündoğdu, « Investigation on the microfiber release under controlled washings from the knitted fabrics produced by recycled and virgin

- polyester yarns », *J. Text. Inst.*, vol. 112, n° 2, p. 264-272, févr. 2021, doi: 10.1080/00405000.2020.1741760.
- [63] E. Vassilenko *et al.*, « Domestic laundry and microfiber pollution: Exploring fiber shedding from consumer apparel textiles », *PLOS ONE*, vol. 16, n° 7, p. e0250346, juill. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0250346.
- [64] A. Hazlehurst, M. Sumner, et M. Taylor, « Investigating the influence of yarn characteristics on microfibre release from knitted fabrics during laundering », *Front. Environ. Sci.*, vol. 12, p. 1340229, mars 2024, doi: 10.3389/fenvs.2024.1340229.
- [65] B. Pinlova, R. Hufenus, et B. Nowack, « Systematic study of the presence of microplastic fibers during polyester yarn production », *J. Clean. Prod.*, vol. 363, p. 132247, août 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132247.
- [66] Y. Cai, D. M. Mitrano, M. Heuberger, R. Hufenus, et B. Nowack, « The origin of microplastic fiber in polyester textiles: The textile production process matters », *J. Clean. Prod.*, vol. 267, p. 121970, sept. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121970.
- [67] A. Jabbar, A. V. Palacios-Marín, A. Ghanbarzadeh, D. Yang, et M. Tausif, « Impact of conventional and modified ring-spun yarn structures on the generation and release of fragmented fibers (microfibers) during abrasive wear and laundering », *Text. Res. J.*, vol. 93, n° 5-6, p. 1099-1112, mars 2023, doi: 10.1177/00405175221127709.
- [68] G. Günaydin Karakan, Ç. E. Kenan, Uludağ University, Faculty of Eng., Textile Eng. Department 16059, Nilüfer, Bursa, Turkey, et Pamukkale University, Buldan Vocational School 20400, Buldan, Denizli, Turkey, « A research on tensile and abrasion properties of fabrics produced from conventional and fire resistant type polyester yarns », *Ind. Textila*, vol. 68, n° 6, p. 407-414, déc. 2017, doi: 10.35530/IT.068.06.1484.
- [69] B. M. Carney Almroth, L. Åström, S. Roslund, H. Petersson, M. Johansson, et N.-K. Persson, « Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, n° 2, p. 1191-1199, janv. 2018, doi: 10.1007/s11356-017-0528-7.
- [70] P.-F. Sun, C. Rong, L. Meng, L. Wu, et H. Zhu, « Functional polymer brushes for anti-microplastic pollution », *Eco-Environ. Health*, vol. 2, n° 3, p. 92-94, sept. 2023, doi: 10.1016/j.eehl.2023.06.002.
- [71] R. Ramasamy et R. B. Subramanian, « Enzyme hydrolysis of polyester knitted fabric: A method to control the microfiber shedding from synthetic textile », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, n° 54, p. 81265-81278, nov. 2022, doi: 10.1007/s11356-022-21467-5.

- [72] R. Ramasamy et R. B. Subramanian, « Microfiber mitigation from synthetic textiles — impact of combined surface modification and finishing process », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, n° 17, p. 49136-49149, févr. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25611-7.
- [73] R. Rathinamoorthy et S. Raja Balasaraswathi, « Impact of sewing on microfiber release from polyester fabric during laundry », *Sci. Total Environ.*, vol. 903, p. 166247, déc. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166247.
- [74] R. Rathinamoorthy et S. R. Balasaraswathi, *Microfibre Pollution from Textiles: Research Advances and Mitigation Strategies*, 1^{re} éd. Boca Raton: CRC Press, 2024. doi: 10.1201/9781003331995.
- [75] ZDHC, « ZDHC Wastewater Guidelines », Version 2.2, sept. 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://downloads.roadmaptozero.com/output/ZDHC-Wastewater-Guidelines>
- [76] E. Corella-Puertas, C. Hajjar, J. Lavoie, et A.-M. Boulay, « MarILCA characterization factors for microplastic impacts in life cycle assessment: Physical effects on biota from emissions to aquatic environments », *J. Clean. Prod.*, vol. 418, p. 138197, sept. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138197.
- [77] H. K. McIlwraith, J. Lin, L. M. Erdle, N. Mallos, M. L. Diamond, et C. M. Rochman, « Capturing microfibers – marketed technologies reduce microfiber emissions from washing machines », *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 139, p. 40-45, févr. 2019, doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.12.012.
- [78] I. E. Napper, A. C. Barrett, et R. C. Thompson, « The efficiency of devices intended to reduce microfibre release during clothes washing », *Sci. Total Environ.*, vol. 738, p. 140412, oct. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140412.
- [79] N. Kärkkäinen et M. Sillanpää, « Quantification of different microplastic fibres discharged from textiles in machine wash and tumble drying », *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, n° 13, p. 16253-16263, avr. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-11988-2.
- [80] N. S. Oğuz et F. Akarslan, « Applications Of Taguchi Experimental Design Method In The Field Of Textile », *Int. J. Eng. Innov. Res.*, vol. 4, n° 2, p. 134-142, juin 2022, doi: 10.47933/ijeir.1039263.
- [81] M. Pillet, *Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI*, 2011^e éd. 2011. [En ligne]. Disponible sur: <https://ellistat.com/Les-plans-d-experiences-par-la-methode-Taguchi.pdf>

- [82] H. Zeghioud *et al.*, « Photocatalytic performance of TiO₂ impregnated polyester for the degradation of Reactive Green 12: Implications of the surface pretreatment and the microstructure », *J. Photochem. Photobiol. Chem.*, vol. 346, p. 493-501, sept. 2017, doi: 10.1016/j.jphotochem.2017.07.005.
- [83] K. Gurudatt, P. De, A. K. Rakshit, et M. K. Bardhan, « Dope-dyed Polyester Fibers from Recycled PET Wastes for Use in Molded Automotive Carpets », *J. Ind. Text.*, vol. 34, n° 3, p. 167-179, janv. 2005, doi: 10.1177/1528083705049053.
- [84] K. Friedrich, « Polymer composites for tribological applications », *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, vol. 1, n° 1, p. 3-39, oct. 2018, doi: 10.1016/j.aiepr.2018.05.001.
- [85] J. Han, R. H. McQueen, et J. C. Batcheller, « From Fabric to Fallout: A Systematic Review of the Impact of Textile Parameters on Fibre Fragment Release », *Textiles*, vol. 4, n° 4, p. 459-492, oct. 2024, doi: 10.3390/textiles4040027.
- [86] E. Bland, « Unravelling the Root Causes Behind Fibre Fragmentation in Textiles », The Microfibre Consortium TMC, 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.microfibreconsortium.com/rca-report>

ANNEXE

1- Tableau des composés chimiques présents dans les traitements de finitions de surface chimiques :

Traitement	Méthode d'application	Marque	Produit commercial	Concentration	Nature	Propriétés	Complément
MM (hydrophile)	Foulardage 170°C 14 yards/min	LEXITEX	LEXISTAT MSH	20 g/L	Copolymères dispersibles dans l'eau Non ionique/faiblement cationique	Agent de finition aux propriétés hydrophiles, d'absorption et d'évacuation de l'humidité	
WR (hydrophobe)	Foulardage 170°C 15 yards/min	RUDOLF CHEMIE	RUCO-LINK XCR	20 g/L	Copolyisocyanate séquencé, cationique	Rehausseur de finition	Réticulant ?
			ECO PLUS	50 g/L			
		RUDOLF CHEMIE	RUCO-DRY DHE	50 g/L	Macromolécules et polymères dendritiques hyperbranchés, cationiques...	Agent de finition imperméable sans fluor	
		RUDOLF CHEMIE	RUCOWET FN	5 g/L	Phosphates d'alkyle et composés éthoxylés d'alcools gras, non ioniques	Agent mouillant de finition	
Traitement CERD (anti-abrasion)	Foulardage 170°C 14 yards/min	RUDOLF CHEMIE	FERAN CER-D1	20 g/L	Composés inorganiques, anions	Agent de finition céramique, anti-boulochage et anti-accrochage	Résistant au lavage délicat, autoréticulation au delà de 110°C
		RUDOLF CHEMIE	FERAN CER-D2	20 g/L	Émulsion d'acide polyacrylique, anionique	Agent de finition céramique, anti-boulochage et anti-accrochage	Résistant au lavage délicat, autoréticulation au delà de 110°C
		RUDOLF CHEMIE	VEROLAN CER-D3	2 g/L	Complexe de sels organiques, non chargés	Agent dispersant pour garantir un pH neutre	
		LEXITEX	RAPIWET WA	2 g/L	Composés éthoxy d'alcool gras non ionique	Agent mouillant	