



*Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique*

**_*_*_*_*_*_*_

Université de Monastir

**_*_*_*_*_*_*_

École Nationale d'Ingénieurs de Monastir

THESE DE DOCTORAT

Présentée et soutenue publiquement à l'école nationale d'ingénieurs de Monastir

Pour l'obtention du titre de docteur en Génie Textile

Par

Mohamed Ghaith CHAKROUN

Ingénieur en Génie Textile

Developpement d'un vêtement de sport confortable et fonctionnel

Le 21/12/2024 devant le jury :

<i>M. Saber Ben Abdessalem</i>	<i>Professeur, E.N.I.M, Monastir</i>	<i>Président</i>
<i>M. Amine Hadj Taieb</i>	<i>Professeur, I.S.A.M, Sfax</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Walid Hassen</i>	<i>Maître de conférence, E.N.I.M, Monastir</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>M. Ali Moussa</i>	<i>Maître de conférence, E.N.I.M, Monastir</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mme Faten Fayala</i>	<i>Professeur, E.N.I.M, Monastir</i>	<i>Directrice de thèse</i>
<i>M. Kamel Ferjali</i>	<i>Directeur technique, VTL 7, Nabeul</i>	<i>Invité</i>

Année universitaire 2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce travail à toutes les personnes chères à mon cœur. Qu'elles trouvent ici l'expression de toute ma gratitude et mon amour.

A mes parents Badii et Sabiha qui voient aujourd'hui leurs efforts et leurs sacrifices couronnés par cette thèse. Ils ont veillé à mon éducation avec infiniment d'amour et d'affection, je suis redevable d'une éducation dont je suis fier. Que Dieu me permette de leur rendre au moins une partie, aussi infime soit-elle, de tout ce que je leur dois.

A mes sœurs Imen et Marwa pour leur amour et leur incontestable appui en témoignage des liens fraternels solides qui nous unissent. Aucune dédicace ne saurait leur exprimer mes sentiments. Je leurs souhaite beaucoup de bonheur et de réussite.

A mes chers enseignants à qui je dois la gratitude d'illuminer mon chemin.

Remerciements

Au terme de ce travail, il m'est à la fois le plaisir et le devoir de remercier sincèrement toutes les personnes qui ont participé et intervenu à la réalisation de cette thèse.

J'adresse mes sincères gratitudee à Monsieur **Saber Ben Abdessalem** pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury de cette thèse.

De même je tiens à remercier Messieurs **Amine Hadj Taieb** et **Walid Hassen** pour le grand honneur qu'ils m'ont confiés en acceptant le jugement de cette thèse en tant que rapporteurs.

Il m'est très agréable de remercier vivement Monsieur **Ali Moussa** de m'avoir honoré de juger cette thèse en tant qu'examineur.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de thèse Madame **Faten FAYALA** pour l'honneur qu'elle m'a accordé en me confiant ce projet, pour ces conseils judicieux en dirigeant sa progression et sa réalisation tout au long de ces années. Je tiens à la remercier également pour ses qualités humaines, son écoute et sa compréhension ainsi que la rigueur scientifique que je serais assidûment reconnaissant.

Je tiens à remercier autant Messieurs **Sofien BENLTOUFA** et **Adel GHITH** d'avoir participé à l'encadrement et au suivi de mes travaux de recherche. Je les remercie pour les heures passées dans les discussions scientifiques qui ont un véritable apprentissage dans le domaine de recherche. Je n'oublierais jamais leurs conseils précieux qui ont véritablement contribué à alimenter mes réflexions.

Je tiens à remercier vivement mon encadrant industriel, Monsieur **Kamel FERJALI**, directeur technique du département de teinture au sein de la **VTL 7**, pour son accueil, le temps qu'il m'a consacré et le partage de son expertise au quotidien. Grâce aussi à sa confiance que j'ai pu accomplir mes missions.

J'exprime aussi tous mes remerciements à Monsieur **Habib MILED**, le président directeur général de la **VTL** et à Madame **Sonia MILED**, la directrice de la **VTL 7** pour leur soutien moral et financier de ce projet.

Je remercie également toute l'équipe de la **VTL** pour leur accueil et leur esprit d'équipe qui m'ont beaucoup aidé pour réussir mon travail.

Remerciements

Je voudrai remercier Monsieur **Maher BEN CHEIKH**, directeur du laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques, et Monsieur **Abdel Majid JEMNI**, ancien directeur du laboratoire pour m'avoir accueilli et accordé toutes les ressources nécessaires pour la réalisation de cette thèse.

Table de matières

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iii
Liste des abréviations.....	vi
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LE CONFORT VESTIMENTAIRE DANS LES VETEMENTS DE SPORT	3
1. Introduction	4
2. Cadre de ce projet de recherche.....	4
3. Définition et classification du confort vestimentaire	5
3.1. Définition.....	5
3.2. Classification	5
4. Interactions du corps humain avec l'environnement	7
4.1. Mécanismes de transfert thermique	8
4.2. Sudation.....	11
4.3. Confort physiologique des vêtements de sport	12
4.4. Interactions entre le corps et le vêtement.....	13
5. Échange de la chaleur et de l'humidité dans la matière textile	15
5.1. Transmission de la chaleur	15
5.2. Transmission de la vapeur d'eau	17
5.3. Transmission combinée de la chaleur et de l'humidité.....	23
6. Facteurs affectant le confort vestimentaire.....	24
6.1. Nature de l'activité	24
6.2. Température de l'environnement.....	25
6.3. Humidité.....	25
6.4. Vitesse de l'air	26
7. Phénomène de séchage des articles textiles	27
7.1. Définition.....	27
7.2. Importance du séchage dans le confort vestimentaire	28
7.3. Phénomène de séchage	30
7.4. Facteurs qui affectent le temps de séchage	32
7.5. Relation entre le séchage et les autres propriétés du confort vestimentaire	36
8. Généralités sur la composition et les structures des vêtements de sport	37
8.1. Fibre.....	37
8.2. Fil.....	39
8.3. Étoffe textile	41
9. Conclusion.....	45

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	47
1. Introduction	48
2. Caractérisation des paramètres structuraux	48
2.1. Détermination de la porosité des fils	48
2.2. Détermination de la masse surfacique	49
2.3. Détermination de l'épaisseur	50
2.4. Détermination de la densité des colonnes, des rangées et des mailles	50
2.5. Détermination de la longueur de fil absorbée et facteur de serrage	50
3. Évaluation des caractéristiques du confort vestimentaire	51
3.1. Perméabilité à l'air	51
3.2. Résistance et perméabilité à la vapeur d'eau	52
3.3. Propriétés de gestion de l'humidité (Moisture Management)	54
3.4. Propriétés de transfert thermique	56
3.5. Méthodes de caractérisation du séchage	58
4. Outils d'analyse statistique	67
4.1. ANOVA	68
4.2. Post Hoc test (TUKEY HSD)	69
4.3. Le T-test	70
4.4. PEARSON corrélation	71
5. Processus de fabrication et Matière utilisée	72
5.1. Tricotage	72
5.2. Teinture et blanchiment	72
5.3. Traitements de finissage par foulardage	74
5.4. Traitements de finissage par épuisement	74
5.5. Lavage domestique	75
5.6. Matières textiles utilisées	75
6. Conclusion	78
 CHAPITRE III : INFLUENCE DES PARAMETRES ET DES PROCEDES DE FABRICATION SUR LES PROPRIETES DU CONFORT VESTIMENTAIRE	 80
1. Introduction	81
2. Analyse et caractérisation des structures	81
2.1. Présentation des échantillons	81
2.2. Propriétés structurales	82
3. Influence des paramètres de tricotage et des procédés de teinture sur les paramètres du confort vestimentaire	84
3.1. Phénomène de séchage	84
3.2. Perméabilité à l'air	90
3.3. Propriétés de gestion de l'humidité	92
3.4. Perméabilité à la vapeur d'eau	100
3.5. Propriétés thermiques	102
3.6. Synthèse	106

Table de matières

4. Influence des procédés de finissage sur les paramètres du confort vestimentaire	107
4.1. Temps de séchage.....	108
4.2. Perméabilité à l'air.....	109
4.3. Propriétés de gestion de l'humidité	110
4.4. Perméabilité à la vapeur d'eau.....	115
4.5. Propriétés thermiques	117
4.6. Synthèse.....	118
5. Influence des cycles de lavage domestique sur les propriétés du confort vestimentaire	119
5.1. Temps de séchage.....	120
5.2. Perméabilité à l'air.....	121
5.3. Perméabilité à la vapeur d'eau.....	123
5.4. Synthèse.....	124
6. Conclusion.....	124
CHAPITRE IV : EFFETS DE L'UTILISATION D'UN FIL POLYESTER FONCTIONNEL ET BIODEGRADABLE.....	126
1. Introduction	127
2. Présentation du fil fonctionnel biodégradable	127
3. Étude sur les performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable	128
3.1. Présentation des échantillons.....	128
3.2. Propriétés structurales.....	129
3.3. Performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable.....	132
4. Optimisation des pourcentages du mélange avec le fil biodégradable	146
5. Influence des cycles de lavage domestique sur les propriétés du confort vestimentaire	158
6. Indice général de confort d'un vêtement de sport	166
6.1. Définition.....	166
6.2. Sélection des critères de confort	167
6.3. Indice général de confort relative et étendu	168
6.4. Résultats et discussions	169
7. Conclusion.....	171
CONCLUSION GENERALE	172
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	176

Liste des figures

Figure 1: Flux général de la matière au sein du VTL 7	4
Figure 2: Illustration du processus de construction d'une perception subjective humaine.	5
Figure 3: Mécanismes d'échange de chaleur d'un corps humain avec son environnement.....	8
Figure 4: Échange de chaleur par conduction entre deux corps.....	9
Figure 5: Modes de transfert de chaleur par convection.	10
Figure 6: Transfert de chaleur par rayonnement.	10
Figure 7: Distribution des glandes sudoripares eccrines par unité de surface.	12
Figure 8: Représentation graphique de la balance thermique du corps avec son environnement.	14
Figure 9: Mécanismes de transferts de chaleur à travers la couche textile.	15
Figure 10 : Conductivité thermique de l'air et de quelques fibres, à une température approximative de 25°C [32].	16
Figure 11: Mécanismes d'adsorption et d'absorption des molécules d'eau par la fibre.....	19
Figure 12: Absorption directe et indirecte des molécules d'eau par la molécule du polymère.	20
Figure 13: Illustration sur le déséquilibre qui provoque le séchage.....	27
Figure 14: Processus de transfert de chaleur et de masse durant le processus de séchage.	27
Figure 15: Courbe de séchage typique, le taux de séchage en fonction de la teneur en humidité.....	31
Figure 16: Schéma explicatif sur l'effet du mouvement d'air près du front d'évaporation sur le taux de séchage.....	33
Figure 17: Schéma explicatif des étapes de transfert de la sueur à travers la couche textile. ..	36
Figure 18: Liaison hydrogène des molécules d'eau avec les groupes hydroxyle de la cellulose.	39
Figure 19: Types basiques de fils. A) Fil filamenteux, B) Fil de fibres discontinues.....	40
Figure 20: Schéma représentative d'une boucle de charge et d'un flotté.	44
Figure 21: Microscope biologique LEICA et l'unité informatique de mesure.	49
Figure 22 : Photo et schéma descriptif du testeur de compression SiroFAST-1.....	50
Figure 23: Testeur de perméabilité à l'air Textest FX 3300.	52
Figure 24: Représentation schématique du PERMETEST.	53
Figure 25 : SDL-ATLAS Moisture Management Tester.	54
Figure 26: Grille des notes des propriétés de gestion de l'humidité.....	56
Figure 27 : Diagramme simplifié de l'instrument ALAMBETA.	58
Figure 28: a) anémomètre, b) montage d'essai de l'expérience de séchage avec les flèches indiquant la direction du flux d'air.	59
Figure 29: Schéma descriptif de la nouvelle configuration du PERMETEST pour étudier la cinétique de séchage d'une goutte.....	61
Figure 30: Évolution de flux de chaleur sans échantillon et avec échantillon.	64
Figure 31: Exemple de l'évolution de la masse d'une goutte d'eau en fonction du temps suivant la nouvelle méthode utilisant le PERMETEST	66
Figure 32: Étapes de fabrication des échantillons.....	72
Figure 33: Cycle de blanchiment	72
Figure 34: Cycle de la teinture de la couleur jaune.....	73

Liste des figures

Figure 35: Cycle de teinture de la couleur noir	73
Figure 36: Schéma explicatif du principe de fonctionnement de la machine RAME.....	74
Figure 37: Réaction chimique de polymérisation du polyéthylène téréphtalate.	76
Figure 38: Image MEB d'une coupe sectionnelle d'un tricot jersey tricoté avec un multi- filaments de section circulaire d'un polyester ordinaire.	77
Figure 39: Schéma explicatif sur le fonctionnement du fil COCONA [®]	78
Figure 40: Courbes de la masse de la goutte d'eau en fonction du temps suivant la norme « ○ » et suivant le modèle « ● ». a) LCF, b) JCE, c) PCF, d) J1R, e) JCF.....	85
Figure 41: Cinétique de séchage d'une goutte d'eau suivant la nouvelle méthode en utilisant le PERMETEST.	87

Liste des tableaux

Tableau 1: Production de chaleur métabolique d'une variété de niveaux d'exercices.	25
Tableau 2: Définition des propriétés de gestion de l'humidité.	55
Tableau 3: Comparaison entre les deux normes et la méthode adoptée.	67
Tableau 4: Détails techniques du traitement de finissage par épuisement.	75
Tableau 5 : Détails sur le cycle de lavage domestique.	75
Tableau 6: Caractéristiques des fils de tricotage.	78
Tableau 7: Liages des structures tricotées.	81
Tableau 8: Propriétés structurales des tricots écrus.	82
Tableau 9: Propriétés structurales des tricots finis avant et après lavage.	83
Tableau 10 : Temps de séchage des tricots finis dans les deux couleurs.	88
Tableau 11 : Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.	89
Tableau 12: Comparaison par paires du temps de séchage.	89
Tableau 13: Perméabilité à l'air des tricots dans les deux couleurs.	90
Tableau 14: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.	91
Tableau 15: Les propriétés de mouillage des tricots dans les deux couleurs.	92
Tableau 16: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de mouillage.	93
Tableau 17: Comparaison par paires des propriétés de mouillage.	93
Tableau 18: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.	95
Tableau 19: Propriétés de propagation des tricots finis dans les deux couleurs.	95
Tableau 20: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de propagation.	96
Tableau 21: Comparaison par paires des propriétés de propagation.	96
Tableau 22: Coefficients de corrélation de la vitesse de propagation avec la masse surfacique et l'épaisseur.	97
Tableau 23: Coefficients de corrélation de la vitesse de propagation avec le temps de séchage.	98
Tableau 24: AOWT et OMMC des tricots finis dans les deux couleurs.	98
Tableau 25: Résultats de l'analyse ANOVA de AOWT et OMMC.	99
Tableau 26: Note de la capacité de gestion de l'humidité globale.	100
Tableau 27: Perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots dans les deux couleurs.	101
Tableau 28: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative. ...	101
Tableau 29 : Conductivité, absorptivité et résistivité thermique des tricots.	103
Tableau 30: Résultats de l'analyse ANOVA de la conductivité thermique.	103
Tableau 31: Comparaison par paires de la conductivité thermique par rapport à la structure J.	104
Tableau 32: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique.	105
Tableau 33: Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique.	106
Tableau 34: Temps de séchage des tricots finis par les deux méthodes.	108
Tableau 35 : Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.	108
Tableau 36: Perméabilité à l'air des tricots finis.	109
Tableau 37: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.	109
Tableau 38: Propriétés de mouillage des tricots finis dans les deux couleurs.	111
Tableau 39 : Résultats de l'analyse ANOVA du taux d'absorption du haut et du bas.	111

Tableau 40: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.	112
Tableau 41: Propriétés de propagation des tricots finis dans les deux couleurs.	112
Tableau 42: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.	113
Tableau 43: AOWT et OMMC des tricots finis jaunes et noirs.	114
Tableau 44: Perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis.	115
Tableau 45: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative. ..	115
Tableau 46 : Conductivité, l'absorptivité et la résistivité thermique des tricots finis.	117
Tableau 47: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique.	118
Tableau 48: Taux d'augmentation du temps de séchage après les cycles de lavage.	120
Tableau 49: Taux de diminution de la perméabilité à l'air après les cycles de lavage.	122
Tableau 50: Perméabilité à la vapeur d'eau relative après les cycles de lavage.	123
Tableau 51 : Détails des tricots fabriqués.	129
Tableau 52: Caractéristiques du fil COCONA® biodégradable.	129
Tableau 53: Propriétés structurales à l'état écru, fini et lavé des tricots J1R, J1B, J2R, J2B, J3R, J3B, J1B67 et J1B100	130
Tableau 54: Performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable des échantillons (J1R, J1B, J2R, J2B, J3R et J3B)	133
Tableau 55: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.	134
Tableau 56 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.	135
Tableau 57: Comparaison par paires de la perméabilité à l'air.	135
Tableau 58 : Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA.	136
Tableau 59: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de mouillage.	137
Tableau 60: Comparaison par paires du temps de mouillage.	137
Tableau 61: Résultats de l'analyse ANOVA du taux d'absorption.	138
Tableau 62: Comparaison par paires du temps de mouillage.	138
Tableau 63: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.	139
Tableau 64: Résultats de l'analyse ANOVA de la vitesse de propagation.	140
Tableau 65: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec la vitesse de propagation.	140
Tableau 66: Résultats de l'analyse ANOVA du AOWT et OMMC.	140
Tableau 67 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative. ..	141
Tableau 68: Comparaison par paires de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.	142
Tableau 69 : Résultats de l'analyse ANOVA de la conductivité thermique des tricots finis.	142
Tableau 70: Comparaison par paires de la conductivité thermique des tricots finis.	142
Tableau 71: Coefficients de corrélation de la conductivité thermique avec les paramètres structuraux des tricots finis.	143
Tableau 72: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique des tricots finis. ...	143
Tableau 73: Comparaison par paires de l'absorptivité thermique des tricots finis.	144
Tableau 74: Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique des tricots finis.	144
Tableau 75: Comparaison par paires de la résistivité thermique des tricots finis.	145

Liste des tableaux

Tableau 80: Effet des pourcentages du mélange avec le fil biodégradable sur les paramètres de confort des tricots finis (<i>JIB</i> , <i>JIB67</i> et <i>JIB100</i>)	146
Tableau 81: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage des tricots finis.....	147
Tableau 82: Comparaison par paires du temps de séchage des tricots finis.	147
Tableau 83 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air des tricots finis.....	149
Tableau 84: Comparaison par paires de la perméabilité à l'air des tricots finis.	149
Tableau 85: Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec les paramètres structuraux.	149
Tableau 86: Coefficients de corrélation de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis avec les paramètres structuraux.	150
Tableau 87: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de mouillage des tricots finis....	151
Tableau 88: Comparaison par paires du temps de mouillage du haut et du bas.....	151
Tableau 89: Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec les paramètres structuraux.	151
Tableau 90: : Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec le temps de séchage.	152
Tableau 91 : Comparaison par paires du taux d'absorption du haut et du bas des tricots finis.	152
Tableau 92: Coefficients de corrélation du taux d'absorption avec les paramètres structuraux.	152
Tableau 93: Résultats de l'analyse ANOVA de la vitesse de propagation des tricots finis. ..	153
Tableau 94: Comparaison par paires de la vitesse de propagation du haut et du bas.	153
Tableau 95: Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec les paramètres structuraux.	154
Tableau 96: Coefficient de corrélation de la vitesse de propagation avec le temps de séchage.	155
Tableau 97: Résultats de l'analyse ANOVA du AOWT et OMMC des tricots finis.	155
Tableau 98: Comparaison par paires du AOWT et OMMC des tricots finis.	155
Tableau 99: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique des tricots finis. ...	156
Tableau 100 : Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique des tricots finis. ..	157
Tableau 101: Comparaison par paires de la résistivité thermique des tricots finis.	157
Tableau 76: Effet des cycles de lavage sur les paramètres de confort des tricots finis (<i>JIR</i> , <i>JIB</i> , <i>J2R</i> , <i>J2B</i> , <i>J3R</i> , <i>J3B</i> , <i>JIB67</i> et <i>JIB100</i>)	159
Tableau 77: Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA.	162
Tableau 78: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de propagation après les cycles de lavage.....	163
Tableau 79: Coefficients de corrélation de la conductivité thermique avec les paramètres structuraux après les cycles de lavage.....	164
Tableau 102: Indices généraux de confort.	170

Liste des abréviations

A	:	Le taux d'absorption du liquide sur la surface inférieure.
a	:	La pente de la droite de régression.
AOWT	:	L'indice de transport unidirectionnelle cumulé.
B	:	La capacité du transport unidirectionnel de liquide.
b	:	L'absorptivité thermique.
C	:	La chaleur perdue ou gagnée par convection.
c	:	La chaleur spécifique.
C _a	:	La concentration de la vapeur d'eau dans l'air.
C _s	:	La concentration de la vapeur d'eau dans la source.
C _{sk}	:	La concentration de la vapeur d'eau à la surface de la peau.
D	:	Le coefficient de diffusion ou la diffusivité massique.
D _{0,T}	:	Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à travers la membrane perméable à la vapeur d'eau à la température d'essai.
D _f	:	Le diamètre moyen du filament.
D _F	:	Le diamètre moyen du fil.
D _{sample,T}	:	Le coefficient de diffusion à travers l'échantillon à la température d'essai.
D _{Total,T}	:	Le coefficient de diffusion total à la température d'essai.
e	:	La distance à travers laquelle la chaleur est transférée.
E	:	La perte de chaleur par évaporation.
F	:	La vitesse de propagation du liquide sur la surface inférieure.
h	:	Le coefficient de transfert de masse convective.
H	:	Le flux thermique permettant de garder une température constante à la surface de la tête de mesure.
h _c	:	Le coefficient de transfert de chaleur convective.
h _D	:	Le coefficient de transfert de masse.
h _r	:	Le coefficient de transfert de chaleur radiative.
HSD	:	Honestly Significant Difference.
IGC	:	Indice Général de confort.
IGC _{et}	:	Indice général de confort étendu.
IGC _{rel}	:	Indice général de confort relative.
K	:	La chaleur perdue ou gagnée par conduction.
l	:	Longueur du fil.
LFA	:	La longueur de fil absorbée.

Liste des abréviations

L_{H_2O}	:	La chaleur latente d'évaporation de l'eau.
L_t	:	Le pourcentage de perte d'eau en masse.
m	:	Le taux de transfert de masse par unité de surface par évaporation.
M	:	La production de chaleur métabolique.
M_0	:	La masse de l'éprouvette humide à $t=0$.
m_a	:	La masse d'eau retenue par la fibre.
M_{conv}	:	La masse de la vapeur d'eau transmise par convection.
M_D	:	La masse de la goutte d'eau.
m_e	:	La masse d'une éprouvette.
M_{H_2O}	:	La masse moléculaire de l'eau.
m_s	:	La masse sèche de la fibre lorsqu'elle est en équilibre avec de l'air complètement sec
M_s	:	La masse surfacique du tricot.
M_{sec}	:	La masse sèche de l'éprouvette.
n	:	Le nombre de filament dans un fil.
N	:	Le nombre de paramètres pris en considération.
Nb	:	Le nombre d'échantillons évalués.
\emptyset_{m0}	:	Le débit massique évaporé à l'équilibre.
$OMMC$:	La capacité de gestion de l'humidité globale.
p	:	La pression de vapeur.
P	:	La puissance de chauffage.
P_D	:	La pression partielle de vapeur d'eau dominante.
P_s	:	La pression de vapeur d'eau saturante.
$p_{sat,T}$:	La pression partielle de vapeur d'eau saturée valable pour la température de l'air dans le laboratoire de mesure.
p_{vap}	:	La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air du laboratoire.
P_{wv}	:	La perméabilité à la vapeur d'eau.
Q	:	La quantité de chaleur conduite.
Q_{cond}	:	Le flux de chaleur par conduction.
Q_{conv}	:	Le flux de chaleur par convection.
Q_{emm}	:	La chaleur emmagasinée.
Q_R	:	Le flux de chaleur par rayonnement.
r	:	Le rayon de l'ouverture capillaire.

Liste des abréviations

R	:	Constante des gaz.
r_A	:	Rang selon la perméabilité à l'air.
r_{AR}	:	Rang selon le taux d'absorption.
Ray	:	La chaleur perdue ou gagnée par rayonnement.
R_{et}	:	La résistance à la vapeur d'eau.
RH	:	L'humidité relative.
R_{H_2O}	:	Constante spécifique de la vapeur d'eau.
r_M	:	Rang selon le temps de mouillage.
r_P	:	Rang selon la vitesse de propagation.
R_t	:	La Résistivité thermique.
r_T	:	Rang selon le temps de séchage.
r_V	:	Rang selon la perméabilité relative à la vapeur d'eau.
S	:	Surface.
T	:	Température.
t	:	Temps.
T_{diff}	:	Le taux de diffusion de la vapeur d'eau selon la loi de Fick.
Tex	:	Le titre en tex.
TF	:	Le facteur de serrage.
th	:	Épaisseur.
th_0	:	Épaisseur de la membrane semi-perméable.
th_s	:	Épaisseur de l'échantillon.
TR	:	Le taux de reprise.
T_{test}	:	Température absolue pendant le test.
u_0	:	La perte de chaleur de la tête de mesure humide sans l'échantillon.
u_s	:	La perte de chaleur de la tête de mesure humide recouverte par l'échantillon.
UV	:	Ultraviolet.
V_{air}	:	Le volume occupé par l'air.
V_{fibre}	:	Le volume occupé par la fibre.
V_{fil}	:	Le volume occupé par le fil.
VTL	:	La société Tunisienne de vêtement de travail et de loisir.
W	:	Le travail extérieur accompli.
X	:	Les coordonnées spatiales de la concentration molaire.

Liste des abréviations

Z	:	Constante qui est déterminée par la procédure d'étalonnage de l'appareil.
γ_{LV}	:	La tension à l'interface entre le liquide et le vapeur.
γ_{SL}	:	La tension à l'interface entre le solide et le liquide.
γ_{SV}	:	La tension à l'interface entre le solide et la vapeur.
ΔC	:	La différence de concentration.
ΔH	:	Le terme de correction du flux thermique déterminé par étalonnage de l'appareil.
ΔP_{vap}	:	La différence de pression de la vapeur d'eau.
ε	:	La porosité du fil.
θ	:	L'angle de contact entre la goutte de liquide et la surface du solide.
λ	:	La conductivité thermique.
ρ	:	La densité.
τ	:	Tortuosité.
φ	:	La fraction de compactage.

Introduction générale

L'objectif principal de chaque sportif est d'améliorer ses performances et d'atteindre l'excellence. Plusieurs outils et facteurs sont déterminants dans cette démarche, les équipements et l'habillement sportif (les combinaisons, les maillots, etc.) contribuent d'une manière directe ou indirecte à l'amélioration des performances sportives. L'habillement ou le vêtement lors de l'exercice sportif doit répondre à certaines spécifications techniques mais doit être aussi confortable. Le confort vestimentaire dans les vêtements de sport a été l'un des domaines de recherche les plus répandus dans le textile. Des efforts et investissements ont été déployés pour développer de nouveaux produits qui répondent aux fonctionnalités requises par les athlètes et pour satisfaire les exigences imposées par les effets de la mode [1–9]. De ce fait, de nouvelles fibres, fils, étoffes et produits et procédés de finition ont été développés.

Le confort est un état subjectif dans lequel l'individu accepte la sévérité de la charge imposée et l'environnement dans lequel il évolue. Ce concept peut être appliqué à la posture, à la température, aux caractéristiques spécifiques de la tâche et aux caractéristiques générales de l'environnement [10]. Le confort vestimentaire est défini sous quatre aspects : physiologique, tactile, ergonomique et thermo-psychologique. Chacun de ces aspects est défini par un ensemble de propriétés [3,11]. Pour être confortables et maintenir l'état de confort d'un point de vue thermo-physiologique, les vêtements doivent permettre de maintenir l'équilibre thermique du corps dans une large gamme de conditions environnementales et d'activités [3,12,13].

La perception de confort physiologique des vêtements de sport est extrêmement influencée par les sensations associées à l'humidité ou à la sécheresse du support textile. Alors, l'aptitude du vêtement à évacuer la sueur de la surface de la peau vers l'extérieur est importante. Le séchage est un acte couramment pratiqué, et une science négligée dans le domaine textile [14]. Par rapport aux autres propriétés du confort vestimentaire, le comportement au séchage des supports textile en tant qu'une propriété de confort vestimentaire a reçu moins d'attention [15]. Les travaux de recherche cités dans la littérature traitant ce sujet sont rares. Le pouvoir de séchage est associé aux autres propriétés hydriques et thermiques comme la perméabilité à l'air, le temps de mouillage, la capacité de propagation, la conductivité, l'absorptivité et la résistivité thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau.

Le développement de vêtements de sport confortables et fonctionnels représente un enjeu important dans l'industrie du textile. En effet, les vêtements de sport ne sont plus simplement conçus pour répondre aux exigences esthétiques ou pratiques, mais doivent également offrir un

confort optimal à l'utilisateur. Ce travail de recherche appliqué s'intéresse à la compréhension et à l'optimisation des paramètres de confort vestimentaire dans certains articles de sport en fonction de plusieurs paramètres de fabrication et/ou de finissage.

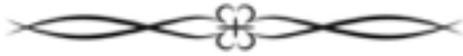
Ce mémoire de thèse est structuré en plusieurs chapitres, chacun abordant un aspect essentiel de cette recherche. Dans le **premier chapitre**, un état de l'art sur le confort vestimentaire dans les vêtements de sport est présenté. Au début de ce chapitre, nous définissons et nous proposons une classification du confort vestimentaire. Ensuite, les interactions du corps humain avec son environnement sont explorées en lien avec les mécanismes d'échange de la chaleur et de l'humidité à travers le textile. Enfin, nous présentons quelques généralités sur les structures textiles utilisés dans les vêtements de sport.

Le **deuxième chapitre** s'intéresse dans sa première partie aux matériels et méthodes utilisés dans cette thèse pour caractériser les paramètres des textiles, ainsi qu'aux outils d'évaluation du confort vestimentaire. Dans une deuxième partie, nous présentons une méthode expérimentale pour la détermination du pouvoir de séchage des étoffes textiles. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des méthodes d'analyse statistique utilisées dans cette étude.

Le **troisième chapitre** est réservé à l'étude de l'influence des paramètres de fabrication sur le confort vestimentaire. Nous analysons l'effet de quelques paramètres de tricotage, de teinture et de finissage sur les principales propriétés de confort. Les résultats de cette étude préliminaire permettent la compréhension de l'effet du type de maille sur les caractéristiques et permettent de sélectionner la conception et les traitements de finissage pour obtenir des tricots plus performants en termes de caractéristiques de confort.

Le **quatrième chapitre** explore les effets de l'utilisation d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable sur les performances liées au confort. Ce chapitre présente une analyse comparative entre les vêtements fabriqués à partir d'un fil fonctionnel ordinaire et ceux conçus avec ce fil biodégradable. Nous proposons aussi dans ce chapitre une synthèse des résultats obtenus à travers un indice général de confort (IGC). Cet indice permet de comparer objectivement les différentes structures textiles étudiées et de classer les vêtements analysés en fonction de leur performance globale en termes de confort.

En résumé, cette thèse s'intéresse au développement de certains vêtements de sport qui allient fonctionnalité, confort et respect de l'environnement.



Chapitre I :
État de l'art sur le confort vestimentaire dans les vêtements de sport



1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons dans une première partie présenter le cadre de cette thèse. Ensuite, nous effectuerons une vue d’ensemble sur le confort vestimentaire en précisant ces aspects. Puis, nous donnerons un aperçu sur les mécanismes d’échanges de chaleur et de l’humidité du corps humain avec l’environnement à travers l’ensemble vestimentaire et nous allons évoquer les facteurs influençant le confort vestimentaire. Finalement, nous allons évoquer quelques généralités sur la matière textile utilisée dans les vêtements de sport.

2. Cadre de ce projet de recherche

Les résultats de cette thèse sont le fruit d’un projet MOBIDOC en association avec la société Tunisienne de vêtement de travail et de loisir (VTL). VTL est le partenaire industriel de cette étude. C’est est une entreprise textile ayant plusieurs domaines d’activités dans le secteur textile comme le tricotage chaîne et trame (rectiligne et circulaire), la teinture, l’impression, le finissage, la sérigraphie, le délavage, la coupe et la confection. Les activités de ce partenaire industriel sont réparties sur neuf usines numérotées de 1 à 9. L’échantillonnage et la fabrication des articles étudiés dans ce travail ont été effectués à VTL 7 où il y’a les départements tricotage, teinture et finissage. Le flux technologique au sein de VTL 7, la nature de la matière première et les activités possibles dans chaque étape sont présentés dans la Figure 1.

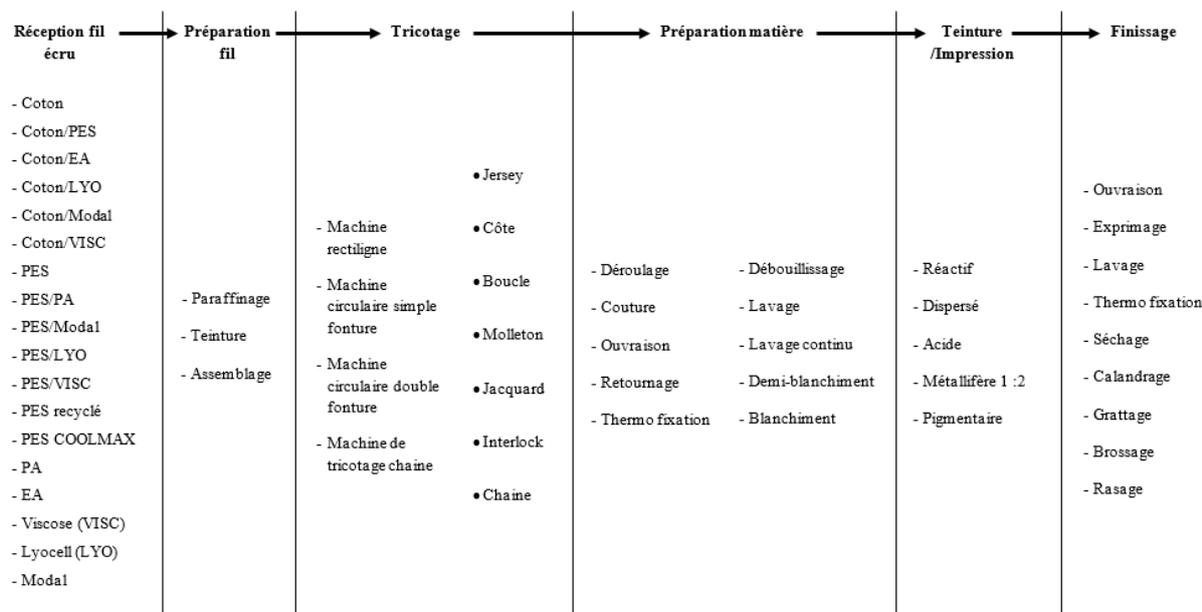


Figure 1: Flux général de la matière au sein du VTL 7.

L’objectif principal de ce travail est d’apporter au partenaire industriel des solutions pour la fabrication d’un certains nombres d’articles permettant de satisfaire les exigences de ses

clients en termes d'aspect, de caractéristiques d'utilisation et de confort lors du porté à l'occasion d'activités physiques et/ou sportives.

De ce fait, les choix des matières, des structures et des procédés sont essentiellement orientés par l'organisme bénéficiaire et sont influencés par les exigences de ses clients.

Pour effectuer cette étude, nous avons essayé de mettre en évidence les facteurs qui influent sur les propriétés du confort vestimentaire d'une structure textile tricotée.

3. Définition et classification du confort vestimentaire

3.1. Définition

Le confort vestimentaire est défini comme une perception thermo-psychologique humaine liée à l'ensemble vestimentaire, qui est le résultat des liens complexes entre les stimulus sensoriels individuels reçus par le cerveau, l'évaluation et la pesée de tous ces stimulus pour formuler finalement une perception subjective du confort global basée sur l'expérience d'utilisation [16]. La Figure 2 présente une illustration du processus de construction d'une perception subjective.

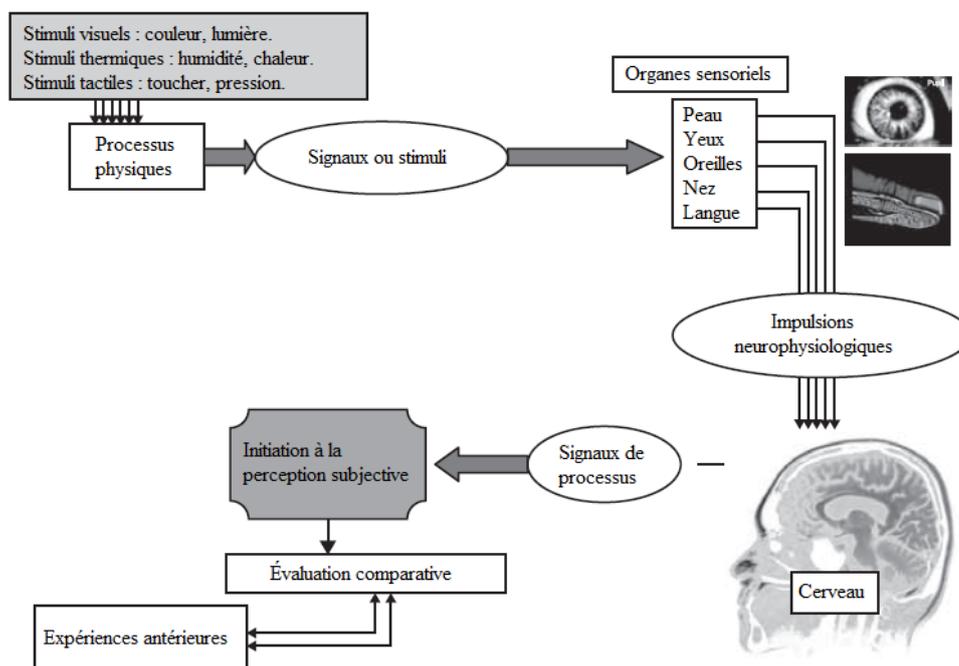


Figure 2: Illustration du processus de construction d'une perception subjective humaine.

3.2. Classification

Le confort vestimentaire peut être aussi considéré comme la cohérence du vêtement avec le circonvoin humain ou l'environnement. Cette consistance comprend des aspects physiques tels que le poids, l'épaisseur, la transmission thermique ou le transfert de chaleur, la respirabilité,

l'absorption, le toucher et la facilité de mouvement ainsi que des aspects esthétiques tels que la couleur, le lustre, la mode et finalement des aspects psychiques comme la personnalité du porteur, la culture et la religion [17]. Le confort vestimentaire est catégorisé sous quatre familles : le confort physiologique, tactile, ergonomique et thermo-psychologique.

3.2.1. Confort thermo-physiologique

Le confort thermo-physiologique fait référence à l'état thermique et au degré de mouillage du système vêtement-corps humain. Cet état est lié à l'efficacité des processus d'échange de chaleur et d'humidité entre le corps humain et l'environnement à travers la ou les couches de vêtement. La capacité de l'ensemble des vêtements portés à favoriser ou inhiber le transfert de chaleur corporelle exerce une influence directe sur la thermorégulation corporelle et éventuellement sur la santé de l'être humain. Le corps humain est en état de confort physiologique lorsque la température corporelle est maintenue à 37°C et que la température cutanée moyenne est d'environ 33°C sans la présence de sueur [17–20]. Le confort thermo-physiologique peut être divisé à son tour en deux aspects dépendants ; le confort thermique et le confort hydrique.

3.2.2. Confort tactile

Le confort tactile ou sensoriel est la sensation ressentie à travers le vêtement lorsqu'il est porté en contact direct avec la peau ou lorsqu'il est tenu à la main [18,20]. Il s'agit des sensations mécaniques provoquées par l'interaction de frottement entre la peau et le textile. Le confort sensoriel est lié à la rugosité de la surface principalement déterminée par la pilosité, la finesse de la fibre et du fil et le type de la fabrication de l'étoffe [20].

De plus la sensation du confort sensoriel est affectée par le degré d'humidité de la surface de la peau et de la surface interne du vêtement. L'augmentation du taux d'humidité à la surface de la peau augmente la friction et le déplacement de la peau contre la surface interne du vêtement ce qui engendre des irritations cutanées [21]. L'inconfort tactile peut être causé par une allergie, une adhérence de la peau, des chatouillements, des picotements, une abrasion de la peau et par la présence de la sueur sur la peau ou absorbé par le textile [19].

3.2.3. Confort ergonomique

Le confort ergonomique ou bien le confort gestuel est lié à la coupe du vêtement, à la souplesse des mouvements lors du port et à la charge gravitationnelle imposée par l'ensemble

vestimentaires [18–22]. Les exigences ergonomiques d'un vêtement sont dépendantes de l'ajustement du vêtement, du glissement et de l'étirement de l'étoffe textile.

L'ajustement du vêtement fournit l'espace alloué pour les tensions cutanées, qui sont affectées par le rapport entre la taille du vêtement et la taille du corps et la nature de la conception du vêtement. Le glissement du vêtement est déterminé principalement par le coefficient de frottement entre la peau et le textile et entre les différentes couches du textile. L'étirement de l'étoffe lors du porté est un facteur important pour le confort de pression, il dépend en grande partie des caractéristiques élastiques du textile et des propriétés de récupération élastique. Les forces de traction et de frottement doivent être balancés pour atteindre un état de confort ergonomique [21].

La restriction des mouvements et la pression excessive imposées par le vêtement sont les principales origines de l'inconfort ergonomique [22]. L'inconfort vestimentaire lié au mouvement est généralement le résultat du fait que lorsque le corps bouge, les dimensions du corps changent [17].

3.2.4. Confort psychologique

Le confort psychologique est affecté principalement par les préférences personnelles des consommateurs, les coutumes et mœurs de la société et la mode courante. Le confort vestimentaire psychologique est caractérisé par l'émotion et l'affection, qui sont liées à l'attrance envers un vêtement particulier [16].

Les facteurs esthétiques notamment la couleur, la texture, la brillance et le drapé contribuent à la sensation de satisfaction psychologique chez le porteur. En raison d'une importante subjectivité et l'absence de paramètres physiques, le confort vestimentaire psychologique ne peut pas être mesuré avec précision et il n'existe pas de méthode standard de mesure des caractéristiques esthétiques des vêtements. L'esthétique du textile est entièrement subjective et différentes personnes peuvent évaluer la même étoffe textile ou le même vêtement à différentes échelles en fonction de leurs propres perceptions. L'inconfort psychologique apparaît lorsque le vêtement est inadapté à la personne qui le porte [17].

4. Interactions du corps humain avec l'environnement

Le confort physiologique de l'être humain n'est pas un besoin luxueux mais plutôt une nécessité. Maintenir la température corporelle dans les intervalles normales assure le bon fonctionnement des organes intérieurs. L'être humain n'est pas une entité stagnante, il peut se trouver dans des conditions climatiques différentes ou sous la charge de différentes activités

physiques. Le corps humain produit la chaleur d'une façon permanente alors un excès ou un défaut de la température corporelle ou cutanée doit être rétabli pour garantir un état thermique stable.

Le corps humain doit réagir aux fluctuations environnementales et physiques en perdant ou en gagnant la chaleur par les mécanismes de transfert thermique. Il existe des mécanismes physiologiques naturelles et involontaires nommés « mécanismes de thermorégulation corporelle ». Deux cas de fluctuations thermiques se manifestent et par conséquent, le corps humain possède deux mécanismes de thermorégulation, le premier se déclenche quand le gradient de température entre le corps humain et l'environnement est positif et le deuxième se déclenche quand ce gradient de température est négatif.

4.1. Mécanismes de transfert thermique

Lorsque deux systèmes sont à des températures différentes, les mécanismes de transfert de chaleur sont les moyens par lesquels l'énergie thermique peut être transférée entre ces deux systèmes. Le système le plus chaud cède de la chaleur au système le plus froid [23].

Les échanges thermiques du corps humain avec l'environnement, comme il est indiqué dans la Figure 3, peuvent être effectués par quatre procédés différents. Par conduction, convection et rayonnement et par évaporation. Ces quatre procédés peuvent garantir selon le cas, un gain ou une perte de chaleur et/ou un transfert de chaleur.

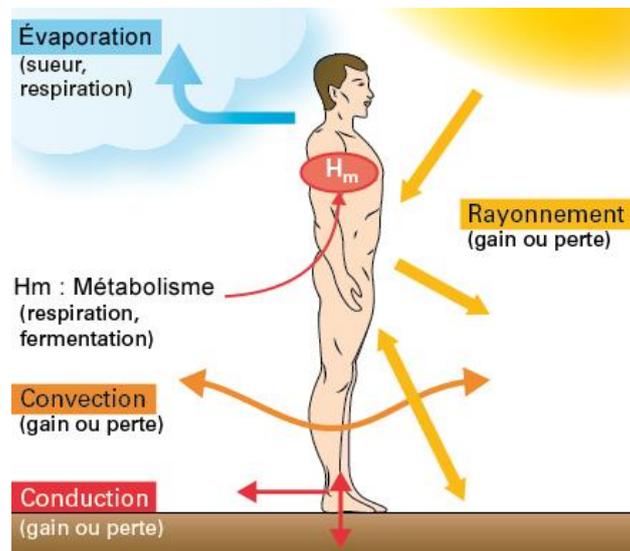


Figure 3: Mécanismes d'échange de chaleur d'un corps humain avec son environnement.

4.1.1. Conduction

La conduction est un phénomène de diffusion qui permet à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide. La conduction signifie le transfert de chaleur par interaction ou

collision de molécules adjacentes entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact jusqu'à ce qu'un équilibre thermique soit atteint comme le montre la figure 4 [24].

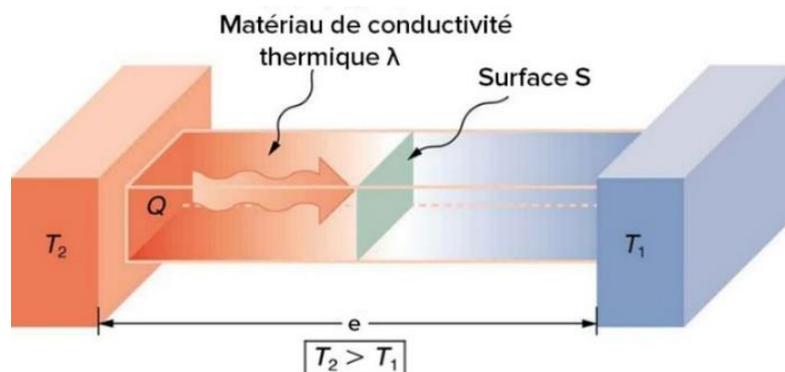


Figure 4: Échange de chaleur par conduction entre deux corps.

L'équation qui décrit le flux de chaleur par conduction en régime permanent est donnée par l'expression suivante [22] :

$$Q_{\text{cond}} = \frac{\lambda \times S}{e} (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Avec

Q_{cond} : le flux de chaleur en Watts (W),

λ : la conductivité thermique en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

S : l'aire de la surface de contact en m^2 ,

e : la distance à travers laquelle la chaleur est transférée en m,

T_1 : la température de la surface à basse température en $^{\circ}\text{K}$,

T_2 : la température de la surface à haute température en $^{\circ}\text{K}$.

4.1.2. Convection

La convection désigne le transfert d'énergie thermique au sein d'un fluide en mouvement (comme l'air ou l'eau) ou entre un fluide en mouvement et une paroi solide. Un débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Habituellement, ce mouvement se produit à la suite de différences de densités. Les particules plus chaudes sont moins denses, de sorte que les particules à température plus élevée se déplaceront vers des régions où la température est plus froide et les particules à température plus basse se déplaceront vers des zones à température plus élevée. Le fluide reste en mouvement jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint [23]. L'équation de transfert de chaleur par convection est [22]:

$$Q_{\text{conv}} = h_c \times (T_2 - T_1) \quad (2)$$

Où Q_{conv} est le flux de chaleur, $(T_2 - T_1)$ est la différence de température entre la surface et le fluide, et h_c est le coefficient de transfert de chaleur convective.

Il existe deux types de transferts convectifs comme il est illustré dans la Figure 5:

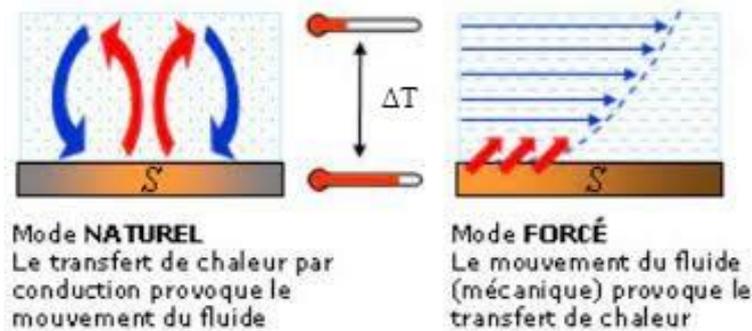


Figure 5: Modes de transfert de chaleur par convection.

- Convection forcée : c'est un type particulier de transfert de chaleur dans lequel les fluides sont forcés de se déplacer, afin d'augmenter le transfert de chaleur.
- Convection naturelle : lorsqu'il existe une différence de température entre deux points d'un fluide.

4.1.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique généré par l'agitation thermique de particules dans la matière quel que soit l'état de celle-ci : solide, liquide ou gaz.

La chaleur transférée sous forme des rayons infrarouge par rayonnement, d'un corps chaud à un corps froid, est appelée chaleur rayonnante. Le transfert de chaleur par rayonnement est illustré dans la Figure 6.

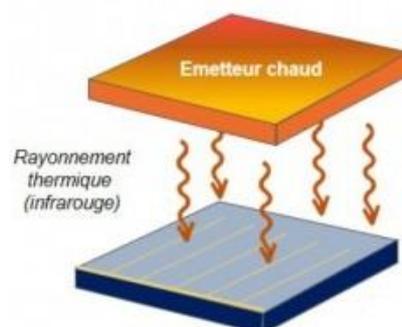


Figure 6: Transfert de chaleur par rayonnement.

Toutes les particules chargées en mouvement émettent un rayonnement électromagnétique. Cette onde émise se déplace jusqu'à ce qu'elle frappe une autre particule.

La particule qui reçoit ce rayonnement le reçoit sous forme d'énergie cinétique. Les particules reçoivent et émettent un rayonnement même après que tout soit à la même température, mais cela n'est pas remarqué en raison du fait que le matériau est à l'équilibre à ce stade [23]. Le transfert de chaleur par rayonnement Q_R ($W.m^{-2}$) est donné par l'équation suivante [22] :

$$Q_R = h_r \times \Delta T \quad (3)$$

Avec

h_r : le coefficient de transfert de chaleur radiative.

ΔT : la différence de la quatrième puissance des températures absolues des surfaces en interaction.

4.1.4. Évaporation

L'évaporation est le passage d'un liquide de l'état liquide à l'état gazeux à une température inférieure à la température d'ébullition. Ce phénomène a pour effet d'absorber de l'énergie thermique par le changement de phase, et donc de réduire la température des deux milieux en contact, ou de freiner leur échauffement par une source. L'énergie nécessaire pour transformer un gramme de liquide en un état gazeux au point d'ébullition est appelée la "chaleur de vaporisation" de ce liquide.

L'évaporation chez l'être humain peut se faire soit par respiration ou par la vaporisation de la sueur au niveau de la surface de la peau [25]. L'étendue de la perte de chaleur par évaporation dépend de la quantité de sueur liquide sur la peau et de la différence entre la pression de vapeur d'eau au niveau de la peau et dans l'environnement ambiant [26]. La vaporisation de la sueur se diffuse loin de la surface d'une manière analogue à celle dans laquelle la chaleur se diffuse par convection. Le taux de transfert de masse par unité de surface par évaporation noté « m » est donné par l'équation (4) [22] :

$$m = h_D \times (C_{sk} - C_a) \quad (4)$$

Avec, C_{sk} et C_a sont la concentration de la vapeur d'eau respectivement à la surface de la peau et dans l'air, et h_D est le coefficient de transfert de masse.

4.2. Sudation

L'activation des glandes sudoripares provoque la sécrétion de la sueur à la surface de la peau, favorisant ainsi la perte de chaleur par évaporation de l'eau contenue dans la sueur. Ces glandes eccrines couvrent la majeure partie du corps [25]. Le nombre de glandes sudoripares

eccrines par unité de surface est différent selon les parties du corps, la distribution du nombre de glandes par cm^2 dans le corps est donnée dans la Figure 7 [16].

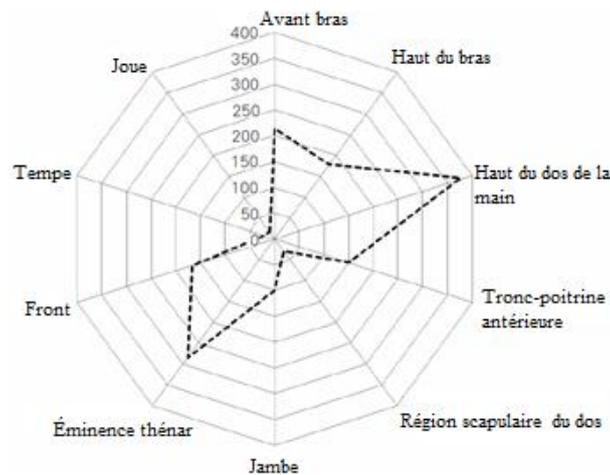


Figure 7: Distribution des glandes sudoripares eccrines par unité de surface.

Le taux de transpiration dépend à la fois du nombre de glandes sudoripares actives et du débit de production de chaque glande active. La principale réponse au chauffage d'une zone cutanée locale est d'augmenter la production de glandes individuelles, plutôt que de stimuler un plus grand nombre de glandes. La sudation ne commence pas simultanément sur tout le corps. Au début de la transpiration, la première zone est généralement le front, suivi dans l'ordre par le haut des bras, les mains, les cuisses, les pieds, le dos et l'abdomen [16,26]. Le taux de transpiration d'un athlète effectuant des exercices de haute intensité dans la chaleur est compris entre 1 et 2.5 l/heure [25].

La sueur est un liquide aqueux, composé principalement de chlorure de sodium. Le potassium, le calcium et le magnésium sont présents en plus petites quantités [27]. La concentration de sodium dans la sueur varie généralement de 10 à 70 mmol/L, selon le régime alimentaire, le taux de sudation et le degré d'acclimatation à la chaleur [16,25].

4.3. Confort physiologique des vêtements de sport

La plage thermique environnementale à laquelle un être humain nu peut survivre confortablement est de 26°C à 30°C [5,16,28]. Par conséquent, les vêtements sont nécessaires pour élargir cet intervalle, offrir aux personnes la possibilité de pratiquer plusieurs activités et essentiellement protéger le corps contre les conditions extérieures comme la chaleur ou le froid, le rayonnement UV et la pluie ou la neige. Avec le progrès de la recherche scientifique dans le textile et l'invention de nouvelles fibres fonctionnelles, l'être humain peut vivre et effectuer

confortablement divers sports, en portant des vêtements convenables, dans une large gamme thermique qui s'étale entre -40°C et $+40^{\circ}\text{C}$ [5,28].

Durant un port quotidien normal, le corps humain génère continuellement et régulièrement une transpiration insensible qui sert à dissiper l'excès de chaleur produit par les processus métaboliques. Dans cet état stable, la chaleur produite par le corps est équilibrée par la perte de chaleur dans l'environnement [5,20]. Dans des conditions de port caractérisées par une pulsation intermittente de transpiration modérée ou abondante engendrée par une activité physique de haut niveau, comme le sport ou par des conditions climatiques sévères, la sueur liquide et une transpiration insensible se produisent pour refroidir le corps.

Dans les conditions de port normales, le taux de transpiration d'une personne au repos est d'environ $15\text{g}/\text{m}^2$ par heure et dans les conditions environnementales chaudes ou durant un effort physique, le taux de transpiration augmente considérablement et peut dépasser $100\text{g}/\text{m}^2$ par heure. Ce taux augmente proportionnellement avec la température ambiante et avec le niveau de l'activité physique [16]. La fonction essentielle du vêtement de sport dans ces cas est de soutenir les mécanismes de thermorégulation et de créer un microclimat thermique et hydrique adéquat au porteur.

La conception fonctionnelle des vêtements de sport est très importante au confort physiologique, car les vêtements de sport sont les garants de la performance ainsi que la santé de l'athlète. Les vêtements construisent une barrière interactive qui doit assurer l'équilibre thermique malgré les variations de température et d'humidité ambiantes et malgré la production énergétique métabolique variée. Cette barrière doit freiner, dans les conditions de froid, la perte de chaleur corporelle et elle doit contribuer à l'emmagasinage de la chaleur issu du corps dans le microclimat entre la peau et le vêtement.

Dans l'autre extrémité climatique, c'est à dire quand il fait chaud, le vêtement du sportif doit favoriser la perte de chaleur excessive et par conséquent le refroidissement du corps et de la peau. De plus, le vêtement de sport doit gérer la sueur liquide causée par la transpiration abondante engendrée dans ces circonstances.

4.4. Interactions entre le corps et le vêtement

Pendant un exercice sportif, une augmentation de l'activité musculaire se produit ce qui entraîne à son tour une augmentation de la production de chaleur dans le corps. A ce moment, les mécanismes physiologiques de perte de chaleur sont activés [25,29]. L'excès de chaleur doit d'abord être transporté de l'intérieur du corps à la surface de la peau, par voie sanguine, où la chaleur peut être perdue par échange thermique avec l'environnement.

La condition de confort thermique cutanée est définie selon Geraldès et al et Jhanji et al [30,31] comme suit : une température cutanée comprise entre 31,5°C et 32,5°C et l'humidité relative du microclimat proche de la peau est inférieure à 60 % en état permanent non actif et pour une condition permanente de travail, une température cutanée comprise entre 34,5 °C et 35,5°C et l'humidité relative du microclimat proche de la peau est inférieure à 70 %.

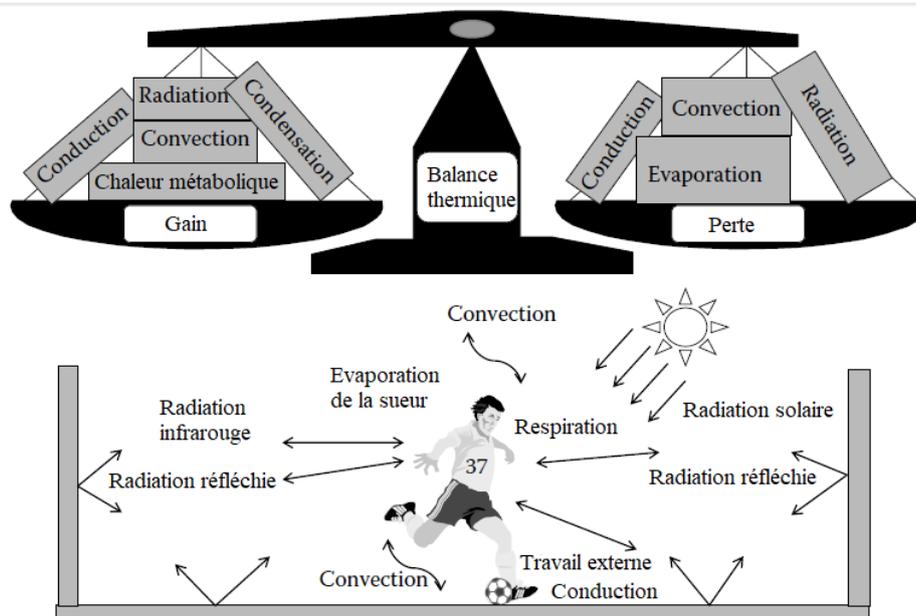


Figure 8: Représentation graphique de la balance thermique du corps avec son environnement.

La Figure 8 représente la balance thermique du corps humain avec son environnement. Les entrées et les sorties de chaleur peuvent être calculées à partir des équations de transfert de chaleur et, lorsqu'elles sont combinées en une seule équation, sans gain ni perte nette, cela s'appelle l'équation du bilan thermique pour le corps humain [22]. Un état thermique stable et confortable du corps humain lors du port d'un vêtement de sport se produit lorsque le gain de chaleur est équilibré par la perte de chaleur suivant l'équation de balance thermique (5).

$$\pm Q_{emm} = M (\pm W) - E \pm K \pm C \pm R_{ay} \quad (5)$$

Où Q_{emm} est la chaleur emmagasinée, M est la production de chaleur métabolique, W est le travail extérieur accompli, E est la perte de chaleur par évaporation (vaporisation de la sueur et respiration), K est la chaleur perdue ou gagnée par conduction, C est la chaleur perdue ou gagnée par convection et R_{ay} est la chaleur perdue ou gagnée par rayonnement.

Si la génération et les entrées de chaleur sont supérieures aux sorties de chaleur, la température corporelle augmente, et si les sorties de chaleur sont supérieures, la température corporelle baisse. Le vêtement de sport assure cet équilibre par des interactions thermiques et

hydriques avec à la fois le corps humain et l'environnement. Les interactions thermiques se traduisent par les mécanismes de transfert de chaleur et les interactions hydriques par la gestion de la sueur dans son état liquide et gazeux.

5. Échange de la chaleur et de l'humidité dans la matière textile

Afin de développer et concevoir des vêtements de sport confortable, il est primordial de connaître et de comprendre les phénomènes et les mécanismes responsables de la transmission de la chaleur et de l'humidité du corps humain vers l'environnement à travers l'ensemble vestimentaire.

5.1. Transmission de la chaleur

Les mécanismes de transmission de la chaleur à travers la matière textile comprennent le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement et le transfert de chaleur latente par l'évaporation de la sueur sur la surface de la peau. Ces mécanismes sont illustrés dans la Figure 9 [5].

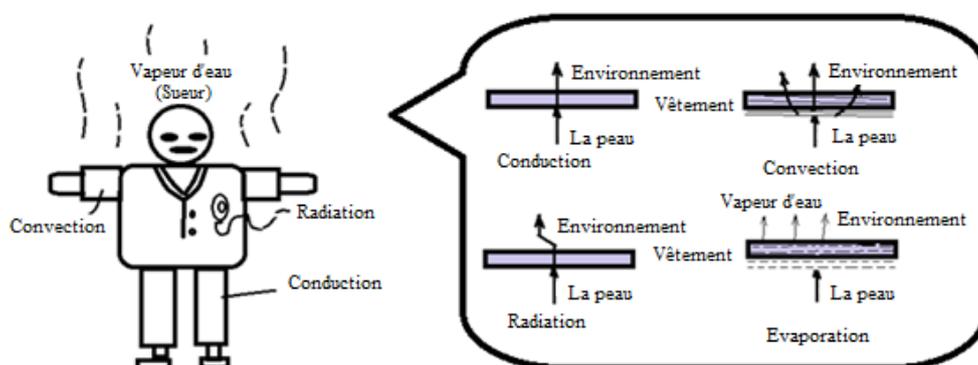


Figure 9: Mécanismes de transferts de chaleur à travers la couche textile.

La conduction thermique traite des changements dans l'énergie interne du système ; le flux de chaleur est le résultat d'un changement d'énergie interne du système dû aux différences spatiales et temporelles de température. Dans ce processus, le changement d'énergie du système est obtenu en modifiant l'énergie de vibration, de collision et de migration des microparticules [26]. L'excitation moléculaire se propage à travers un corps ou d'un corps à un autre par contact direct.

La chaleur est transférée par conduction à travers l'air qui se trouve à la surface et à l'intérieur des couches vestimentaire et à travers les fibres textiles [24]. La conductivité de l'air est beaucoup plus faible avec les fibres textiles synthétiques. Ceci montre l'importance de l'air stagnant emprisonné entre les couches des vêtements dans le pouvoir isolant de l'ensemble

vestimentaire [24]. La Figure 10 présente un histogramme qui illustre la différence entre la conductivité thermique de l'air et des fibres textiles, naturelles et synthétiques [32].

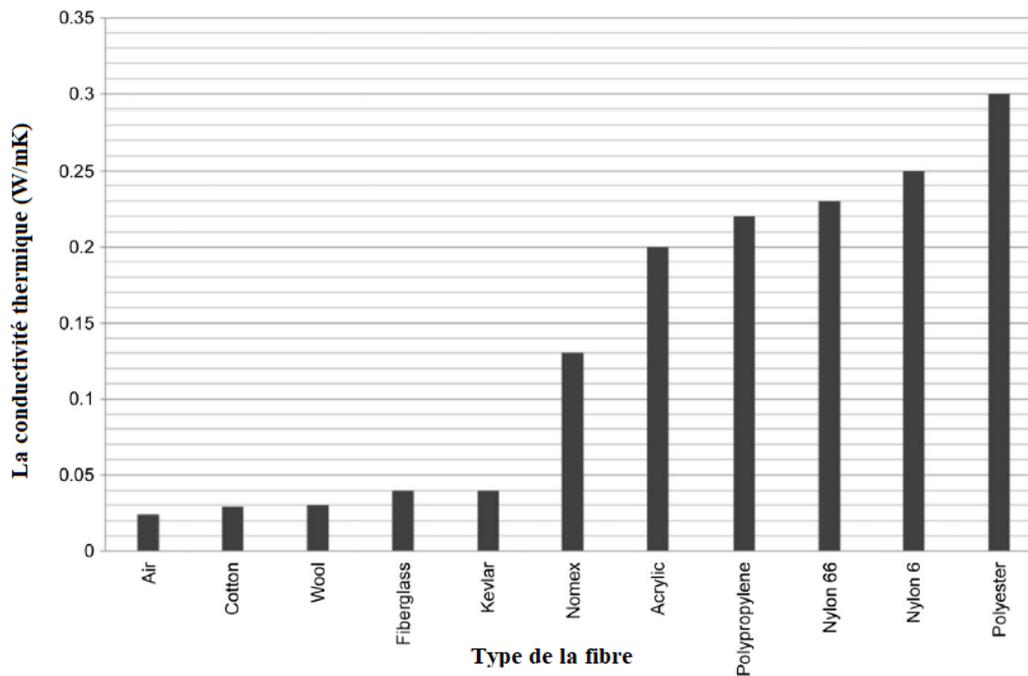


Figure 10 : Conductivité thermique de l'air et de quelques fibres, à une température approximative de 25°C [32].

La convection signifie le transfert de la chaleur d'un endroit à un autre par le stockage de cette chaleur dans une particule dans un fluide en mouvement, un gaz ou un liquide. La perte de chaleur peut se produire par convection vers l'air ambiant plus frais ou par gain de chaleur provenant de l'air ambiant plus chaud [17]. L'air n'est pas retenu par les fibres textiles, et peut se déplacer par convection naturelle (remontée d'air réchauffé) ou par convection forcée (vent, mouvements du corps créant un effet de soufflet) [24]. L'air qui circule près de la surface de la peau transfère la chaleur vers ou depuis le corps et de même contribue à l'évaporation de la sueur [17].

Dans le rayonnement, le flux de chaleur est régi par la différence de température entre l'émetteur de chaleur et l'absorbeur de chaleur. La chaleur peut être transportée entre l'environnement et la surface des vêtements par rayonnement électromagnétique. Ceci se produit également entre les couches de vêtements, et enfin le transport de chaleur rayonnante peut avoir lieu entre les fibres d'un textile, à travers l'air emprisonné. Plus il y a de fibres, moins il y a de transfert de rayonnement [24]. La réponse du rayonnement à un matériau est une combinaison de transmission, de réflexion et d'absorption. Les caractéristiques de rayonnement

du textile sont déterminées par sa température, son émissivité, son absorptivité, sa réflectivité et sa transmissivité [17].

La différence de température entre les deux milieux et la conductivité des matériaux textiles déterminent le taux de transmission de la chaleur [5]. La conduction thermique se produit toujours tant qu'un gradient de température est présent. Lorsque ce gradient de température est faible, le transfert de chaleur par rayonnement peut être ignoré. De plus, si la fraction volumique des fibres est suffisamment élevée, la convection est supprimée par les minuscules pores entre les fibres. Par conséquent, la conduction thermique s'avère être le seul ou le plus important mécanisme de transfert de chaleur dans les textiles [26].

L'échange de chaleur due à la convection peut dominer s'il existe un courant d'air important qui passe à travers la couche vestimentaire ou s'il existe un air en mouvement au sein du microclimat entre la peau et le vêtement. L'air extérieur peut pénétrer dans le vêtement, soit par des ouvertures spécialement conçus ou à travers les pores de l'étoffe textile [5]. Le vent et les mouvements du corps diminuent l'adhérence de la couche d'air isolante ce qui provoque une augmentation du taux de renouvellement de la couche d'air microclimatique entre la peau et le vêtement. De plus, lorsque l'air passe à travers les pores donc l'air emprisonné dans les fibres n'est plus stationnaire, ce qui permet un échange de chaleur convectif [33].

Si une partie d'un liquide s'évapore à une température inférieure au point d'ébullition, elle doit extraire la chaleur de vaporisation nécessaire du liquide restant pour effectuer le changement de phase à l'état gazeux. L'effet rafraîchissant de la transpiration est dû à cette très grande perte de chaleur par vaporisation de l'eau, elle est égale 539 calories/g à l'ébullition, mais encore plus à la température normale de la peau, elle est égale à 580 cal/g. La chaleur de vaporisation est plus grande à la température du corps qu'au point d'ébullition car l'énergie de liaison des molécules d'eau est plus élevée à basse température, et il faut donc plus d'énergie pour les briser à l'état gazeux [27,29].

5.2. Transmission de la vapeur d'eau

La sueur est une substance liquide qui est composée principalement de l'eau. Le changement de phase de la sueur, de la phase liquide vers la phase gazeuse (vapeur d'eau), est le résultat de l'absorption de la chaleur latente du corps humain, ce qui entraîne finalement son refroidissement. La vapeur d'eau doit être évacuée de la peau à l'environnement à travers la couche textile. L'humidité sous forme de vapeur peut être transporté à travers les matériaux textiles par les mécanismes suivants [5,16,17,34].

- Diffusion de la vapeur d'eau à travers les espaces d'air entre les fibres.

- Absorption, transmission et désorption de la vapeur d'eau par les fibres.
- Adsorption et migration de la vapeur d'eau le long de la surface de la fibre.
- Transmission de vapeur d'eau par convection forcée.

Le taux de sudation durant une activité sportive est généralement plus important que le taux d'évaporation, ce qui entraîne l'accumulation de la sueur liquide à la surface de la peau. L'évacuation de la sueur dégoulinée se fait par les phénomènes de mouillage et du mouvement capillaires du textile. La sueur peut être aussi absorbée par le textile dans le cas des fibres hydrophiles [5,17]. Le liquide évacué du système vêtement-corps humain peut être de la sueur liquide sécrétée par les glandes ou bien de l'eau provenant de la condensation de la vapeur d'eau dans les cavités de la matière textile.

5.2.1. Diffusion

La diffusion de l'humidité décrit le processus de la migration des molécules d'eau et/ou l'assemblage des molécules d'eau à travers des matériaux [26]. Le mouvement des molécules est dû au gradient de concentration qui agit dans ce processus comme force motrice de transmission d'humidité, la migration est faite de la zone de grande concentration à la zone de faible concentration [16,35]. Le transfert de molécules d'eau se produit à travers un support textile selon deux principes, à savoir la simple diffusion à travers les espaces d'air entre les fibres et les fils et la diffusion le long des fibres elles-mêmes [16,24].

Le degré de mouvement de l'humidité de chaque matériau est appelé son coefficient de diffusion. Par exemple Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à travers l'air est de 0,239 cm²/s [16]. La diffusion principale de la vapeur d'eau à travers une couche textile se fait dans les espaces d'air car la diffusion de la vapeur d'eau à travers l'air est presque instantanée alors qu'à travers la partie fibreuse du textile elle est limitée par la faible diffusivité des fibres textiles. Donc le processus de diffusion de la vapeur d'eau est affecté par la fraction volumique de la matière textile et du coefficient de diffusion de la fibre. En outre, l'hygroscopicité de la fibre exerce une influence majeure sur le taux de diffusion de la vapeur d'eau [26].

Dans le cas d'un assemblage des fibres non-hygroscopique ou hydrophobe, la diffusion de la vapeur d'eau à travers cet assemblage obéit à la loi de Fick qui énonce que le flux de masse de soluté, c'est-à-dire la masse traversant une unité de surface par unité de temps dans une direction donnée, est proportionnelle au taux de variation de la concentration de soluté dans cette direction [36]. Selon la loi de Fick le taux de diffusion de la vapeur d'eau à travers une couche textile hydrophobe peut être exprimée par l'équation suivante [24] :

$$T_{diff} = -D \frac{dG}{dx} \quad (6)$$

Où T_{diff} est le taux de diffusion, D est le coefficient de diffusion ou la diffusivité massique d'un composant diffusant à travers un autre milieu et $\frac{dG}{dx}$ est le gradient de concentration de vapeur d'eau dans l'espace vide.

Dans le cas où les fibres textiles sont des fibres hydrophiles, la diffusion de vapeur d'eau n'obéit pas à la loi de Fick. Elle est régie par une diffusion anormale non-Fickienne. Dans ce cas, le processus de diffusion se déroule en deux étapes. La première étape correspond à la diffusion Fickienne mais la deuxième étape est beaucoup plus lente qui suit une relation exponentielle entre le gradient de concentration et le flux de vapeur [16].

5.2.2. Sorption et désorption

La désorption fait référence toujours à la libération de l'eau. En contrepartie, le terme sorption désigne le processus d'attraction de l'eau. Quand l'eau traverse le textile, il peut être attiré par les fibres par adsorption ou absorption ou les deux ensembles [16]. L'adsorption est le phénomène de fixation des molécules d'eau sur des sites particuliers localisés à la surface externe de la fibre. Tandis que l'absorption est la pénétration de l'eau à l'intérieur de la fibre textile et la réalisation des liaisons moléculaires pour la fixation [24,37]. Les mécanismes d'adsorption et d'absorption sont illustrés dans la Figure 11.

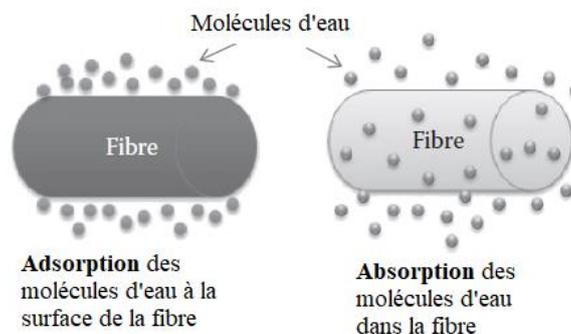


Figure 11: Mécanismes d'adsorption et d'absorption des molécules d'eau par la fibre.

L'adsorption se fait principalement dans le cas des fibres hydrophobes qui n'ont pas des groupes fonctionnels avec lesquelles les molécules d'eau peuvent interagir, alors la quantité totale d'humidité retenue est celle adsorbée. En revanche, pour les fibres hydrophiles, la quantité d'humidité adhérente à la surface représente une proportion négligeable par rapport à la reprise totale [34]. Sous des conditions atmosphériques bien définies, toutes les fibres textiles peuvent retenir de l'humidité, soit par adsorption ou par absorption. Ce niveau de rétention

caractéristique est nommé le taux de reprise. Il est défini comme la masse d'humidité retenue par une fibre divisée par la masse sèche de la fibre. Le taux de reprise TR (%) est calculée par l'équation (7) [18,26,38] :

$$TR(\%) = 100 \times \frac{m_a}{m_s} \quad (7)$$

Avec, m_a est la masse d'eau retenue par la fibre et m_s est la masse sèche de la fibre lorsqu'elle est en équilibre avec de l'air complètement sec. La quantité retenue d'humidité d'une fibre dépend de son taux de reprise qui dépend à son tour de l'humidité relative du microclimat entourant la fibre. De plus, la température ambiante et la pression atmosphérique peuvent avoir un léger impact indépendamment de l'humidité relative [34].

Dans le cas des fibres hydrophiles, la diffusion de la vapeur d'eau se déroule en deux étapes, comme il est mentionné précédemment. La diminution du taux de diffusion lors de la deuxième étape est dû au changement dynamique de la structure du polymère avec la pénétration des molécules d'eau [26]. Lorsque la fibre absorbe l'humidité, les macromolécules de fibres ou les microfibrilles sont écartés par les molécules d'eau absorbées et un gonflement des fibres se produit [16]. La déformation de la fibre qui en résulte crée des contraintes internes qui influent l'absorption d'humidité [38]. La diffusion de la vapeur d'eau se fait principalement dans les espaces vides entre les fibres et entre les fils, l'augmentation de la taille de la fibre par le gonflement entraîne une réduction de la taille de ces espaces ce qui retarde finalement le processus de diffusion [38].

À l'échelle moléculaire, l'absorption de l'eau par la fibre peut être directe ou indirecte. Les premières molécules d'eau sont directement attachées sur les groupes hydrophiles. Les prochaines molécules peuvent être aussi directement attirées par d'autres groupes hydrophiles ou bien elles peuvent former une autre couche sur les molécules d'eau déjà absorbées, ce qui les rend indirectement absorbées. L'effet résultant est illustré dans la Figure 12.

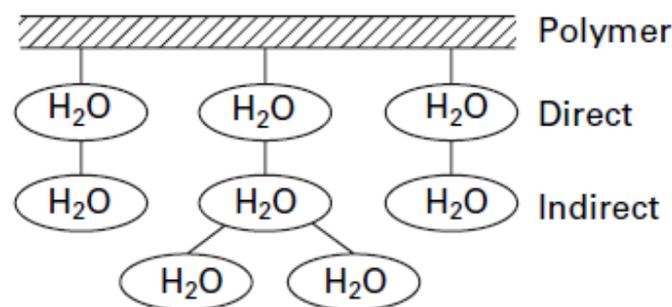


Figure 12: Absorption directe et indirecte des molécules d'eau par la molécule du polymère.

Les molécules d'eau directement attachées seront fermement fixées, s'adaptant étroitement à la structure des molécules. Ils seront limités dans leurs déplacements. Tandis que les molécules d'eau indirectement attachées seront plus lâchement retenues. Durant la désorption, les molécules d'eau indirectement attachées sont plus faciles à enlever et elles détachent les premières de la fibre [38].

5.2.3. Convection

De la même manière que l'échange de la chaleur sec par convection, le mouvement de l'air à travers l'ensemble vestimentaire emporte avec lui de l'humidité contenue dans le microclimat sous forme de vapeur [24]. La quantité de vapeur d'eau transmise par convection est régie par la différence de concentration entre l'atmosphère environnante et la source de la vapeur d'eau. Ce procédé de transmission de l'humidité est exprimé par la relation suivante [16,34].

$$M_{\text{conv}} = A \times h \times (C_s - C_a) \quad (8)$$

Où M_{conv} est la masse de la vapeur d'eau transmise par convection à travers la surface du textile d'aire A , C_s est la concentration de la vapeur d'eau dans la source, C_a est la concentration de la vapeur d'eau dans l'air, et h est le coefficient de transfert de masse convective.

5.2.4. Mouillage et propagation capillaire

Le mouvement de la sueur liquide à travers les matériaux textiles est principalement dû à l'attraction moléculaire de la fibre et de l'eau à la surface de la fibre qui est principalement déterminée par la tension superficielle et la distribution effective des pores capillaires. Le transfert de liquide à travers une structure ayant des espaces vides implique un processus en deux étapes, d'abord le mouillage puis la propagation capillaire [16,24,34].

Le mouillage est défini comme le comportement initial du textile lorsqu'il entre en contact avec un liquide, l'amenant à atteindre les espaces du vêtement et une pression capillaire est produite [39,40]. Le liquide est forcé par cette pression et il est entraîné le long du capillaire en raison de la courbure du ménisque dans les confins étroits des pores [24,34]. Un transport spontané d'un liquide entraîné dans un système poreux par des forces capillaires est appelé « la propagation capillaire ». Étant donné que les forces capillaires sont provoquées par le mouillage, ce transport est le résultat d'un mouillage spontané dans un système capillaire. Alors nous pouvons dire que le mouillage est une condition préalable de la propagation capillaire.

Un liquide qui ne mouille pas les fibres ne peut pas pénétrer dans une étoffe textile [26,40–42]. Le mouillage est le processus initial impliqué dans l'étalement des fluides. Dans ce processus, l'interface fibre-air est remplacée par une interface fibre-liquide [16,26,41]. Les forces agissant à une frontière solide-liquide à l'équilibre sont généralement exprimées par l'équation de Young-Dupré présentée ci-dessous [16,26,41] :

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta \quad (9)$$

Avec, γ représente la tension à l'interface entre les différentes combinaisons de solide (S), de liquide (L) et de vapeur (V), et θ est l'angle de contact entre la goutte de liquide et la surface du solide à mouiller.

La mouillabilité d'un matériau textile peut être caractérisée en mesurant l'angle de contact d'une goutte. Lorsqu'une petite goutte de liquide est mise en contact avec une surface solide plane, deux régimes d'équilibre distincts peuvent être trouvés : mouillage partiel avec un angle de contact fini ou mouillage complet avec un angle de contact nul [16,26,42]. Une surface ayant un faible angle de contact avec l'eau présente une meilleure mouillabilité par rapport aux surfaces ayant des angles de contact élevés. Les surfaces avec des angles de contact avec l'eau de quatre-vingt-dix degrés ou plus sont généralement considérées comme des surfaces hydrophobes [13].

Les surfaces hydrophiles et hydrophobes sont les résultats des interactions à l'interface entre le polymère et l'eau et sont liées à l'énergie de surface des polymères. Sur une surface hydrophile, des groupements polaires existent et de fortes interactions se produisent avec l'eau. Une surface hydrophobe possède de faibles interactions avec l'eau à la surface du polymère, puisque la surface est principalement constituée de groupements non polaires [26,41].

La propagation capillaire ne peut se produire que lorsque des fibres assemblées avec des espaces capillaires entre elles sont mouillées par un liquide. Les forces capillaires résultantes entraînent le liquide dans les espaces inter-fibres et inter-fils [42]. La force capillaire est en fonction de la tension superficielle de l'interface liquide-solide, de l'angle de contact et de la taille de l'ouverture capillaire. La force motrice de l'action capillaire est exprimée par l'équation suivante [19] :

$$\text{Force capillaire} = 2\pi \times r \times \gamma_{SL} \times \cos \theta \quad (10)$$

Avec, r est le rayon de l'ouverture capillaire, γ_{SL} est la tension superficielle de l'interface liquide-solide, et θ est l'angle de contact.

Ainsi, la propagation capillaire est l'écoulement spontané d'un liquide dans un milieu ayant des espaces vides, entraîné par des forces capillaires [26,42] et la capacité de propagation capillaire des matériaux textiles signifie la capacité à maintenir un flux capillaire de liquide à travers les espaces inter-fibres ou inter-fils [34,37,43].

5.2.5. *Condensation*

La condensation d'une manière générale est le phénomène physique de changement de phase de la matière d'un état gazeux à un état condensé (solide ou liquide). Dans notre cas, la condensation fait référence au changement de phase de la vapeur d'eau, de la phase gazeuse à la phase liquide. La condensation de la vapeur d'eau dans un support textile ne se produit que s'il existe un gradient de température à travers l'épaisseur du support de sorte qu'un côté du support textile soit directement exposé à un environnement d'air chaud humide, tandis que l'autre côté de l'étoffe est soumis à une température plus faible [26].

Lors d'une activité physique intense, la vapeur d'eau, à une température supérieure à celle de l'environnement, rencontre la couche vestimentaire qui fonctionne comme un solide froid. L'échange thermique entre l'air chaud humide et la paroi textile sèche et froide engendre la liquéfaction de la vapeur d'eau dans les cavités et les pores de la matière textile [34]. Le déplacement du liquide résultant se fait sous les forces de la tension superficielle et la gravité [24]. Lorsque la concentration de la vapeur d'eau au niveau des deux faces de la couche textile est au niveau de la saturation, une condensation se produit dans toute l'épaisseur de l'étoffe textile. Si la concentration de la vapeur d'eau sur les deux faces est inférieure à la saturation pour la température locale, la condensation ne se produit que sur une région à l'intérieur du textile. Dans ce cas, la condensation se produisant dans l'étoffe textile forme une zone humide, séparée par deux zones sèches. L'étendue de la région humide augmente avec l'augmentation de la condensation [16,24,34]. Quand la condensation a lieu dans l'ensemble vestimentaire, la transmission de la vapeur d'eau diminue par le remplissage des espaces vides par les gouttes d'eau formées [26].

5.3. Transmission combinée de la chaleur et de l'humidité

En plus des mécanismes de transmission de chaleur précédemment indiqués, la transmission de chaleur à travers l'ensemble vestimentaire implique le transfert de la chaleur latente de divers changements de phase des molécules d'eau dans les matériaux fibreux [16]. Les processus de transmission de chaleur et de l'humidité sont couplés par l'échange de la chaleur latente lors des changements de phase tels que l'évaporation ou la condensation et la

sorption ou la désorption [26]. La transmission de la chaleur et de l'humidité dans les matériaux textiles sont liés, il est impossible de changer l'un sans affecter l'autre, et l'équilibre final est impossible dans l'un sans l'autre [38].

Lors de la transmission des molécules d'eau à travers les matières textiles, elles sont adsorbées par les molécules de fibres. La sorption de l'eau est suivie d'un dégagement de chaleur, appelé chaleur de sorption. La chaleur de sorption décrit la quantité d'énergie qui est libérée lorsque la vapeur d'eau dans l'air est adsorbée sur la surface de la fibre ou absorbée à l'intérieur. De même, cette même quantité d'énergie doit être ajoutée lorsque l'humidité est désorbée de la fibre. La chaleur de sorption n'est pas constante, même pour une fibre donnée, mais dépend des conditions environnementales dans lesquelles la sorption ou la désorption se produit [16,26,34,38].

Le processus de condensation libère de la chaleur de condensation, provoquant une augmentation de la température locale du vêtement au lieu de la condensation, modifiant ainsi le gradient de température à travers le vêtement qui existait avant le processus de condensation. Dans la plupart des cas, le gradient de température à travers le système vestimentaire augmente uniformément de la peau humaine à l'environnement extérieur. Au fur et à mesure que la condensation se produit, le gradient de température de la peau à l'endroit de la condensation diminue et le gradient de température du point de condensation à l'environnement extérieur augmente [26].

6. Facteurs affectant le confort vestimentaire

Le confort humain est influencé par l'ensemble vestimentaire et par les conditions environnementales circonvoisines notamment la température, l'humidité et le mouvement de l'air. Dans le cas des vêtements de sport, le confort vestimentaire est affecté aussi par la quantité de chaleur métabolique générée par le corps.

6.1. Nature de l'activité

Le processus de transformation et de libération de l'énergie dans le corps humain est connu sous le nom de métabolisme énergétique. Le taux de production de chaleur dans le corps est connu sous le nom de taux métabolique et comprend toute la chaleur dégagée par toutes les réactions chimiques qui se déroulent dans le corps [17]. Afin de normaliser la quantité d'énergie métabolique produite entre des personnes de différentes tailles, le métabolisme est généralement exprimé par unité de surface. Une unité spécialisée, le « met », a été définie en termes de multiples du métabolisme de base : 1 met correspond à 58,15 W/m² [26]. L'organisme

humain produit la chaleur d'une façon permanente, la quantité de chaleur produite dépend de la nature de l'activité physique effectuée par la personne. A titre indicatif, le Tableau 1 présente une variété d'activités physiques et la quantité de chaleur métabolique correspondante [28,33].

Suivant la quantité de chaleur produite, l'organisme doit dissiper l'excès pour maintenir la balance thermique et par conséquent le confort physiologique. Les réponses corporelles de thermorégulation se déclenchent pour éviter une élévation de la température, l'ampleur de ces mécanismes affecte l'état thermique et hydrique du corps humain. A son tour le taux métabolique est influencé par de nombreux facteurs comme l'âge, le poids et la taille.

Tableau 1: Production de chaleur métabolique d'une variété de niveaux d'exercices.

<i>Nature de l'activité</i>		<i>Production métabolique par unité de surface (W.m⁻²)</i>	<i>Met</i>
Dormit		40.7	0.7
Assis		58.2	1.0
Debout		69.8	1.2
Marche sans inclinaison	2 mph	116.4	2.0
	3 mph	151.3	2.6
	4 mph	221.2	3.8
Course sans inclinaison 10 mph		582	10.0
Exercice intense		1000	17.2

6.2. Température de l'environnement

La température fait référence à la chaleur ou au froid d'un objet ou d'un fluide. Elle est liée à la teneur en chaleur d'une substance. La température de l'environnement entourant le corps humain comprend la température de l'air, à l'extérieur et dans le microclimat, la température radiante et la température des vêtements portés [22]. La température de l'air influence la perte de chaleur par convection et par évaporation. Il y a de plus l'échange continue de chaleur par rayonnement, la chaleur radiante du soleil peut être absorbée par 3 voix ; directement du soleil, après dispersion dans ciel et par réflexion du sol et des objets [22].

6.3. Humidité

L'humidité d'une atmosphère est définie comme la masse d'eau par unité de volume d'air. L'humidité de l'air est également indiquée par la pression de vapeur p , c'est-à-dire la pression

partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère [38]. L'humidité de l'environnement peut être exprimée sous plusieurs formes, cependant, le plus pratique et couramment utilisé est l'humidité relative. L'humidité relative RH (%) est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau dominante P_D et la pression de vapeur d'eau saturante P_s à la même température. RH (%) est calculé par l'équation (11) [22,38].

$$RH(\%)=100\times\frac{P_D}{P_s} \quad (11)$$

Un pourcentage faible de l'humidité relative indique une sécheresse relative et un pourcentage élevé indique une humidité élevée. L'humidité autour du corps représente la force motrice de la perte de chaleur par vapeur et le transfert de vapeur d'eau [22]. L'intervalle de variation de l'humidité est plus large que la température dans la détermination du confort physiologique. Dans des conditions climatiques tropicales, l'humidité de l'atmosphère élevée réduit le gradient de pression de vapeur d'eau entre le microclimat et l'environnement ce qui provoque un retard dans la perte de chaleur par évaporation et des problèmes de condensation de la vapeur d'eau [2,17]. Plus l'air est sec, plus l'évaporation est efficace et des taux de sudation élevée peuvent se produire sans mouiller ni la peau ni les vêtements, par conséquent, plus la perte de chaleur de la peau est élevée [17,26]. Il est à noter que la capacité de rétention d'humidité par l'air est fonction de la température, plus l'air est chaud, plus il peut absorber d'humidité [22].

6.4. Vitesse de l'air

Le mouvement de l'air à travers le corps affecte le flux de chaleur vers et depuis le corps, et donc la température corporelle. Le mouvement de l'air varie dans le temps, l'espace et la direction. La vitesse de l'air moyenne, considérée comme l'intensité de la vitesse de l'air moyenne sur un temps d'exposition et intégrée dans toutes les directions, fournit une valeur globale couramment utilisée pour représenter l'effet du mouvement de l'air sur le corps [22]. Ces mouvements peuvent être générés par une convection naturelle et forcée ainsi que des mouvements corporels de l'être humain. Plus la vitesse de l'air est importante, plus le taux de flux de chaleur et de vapeur d'eau par convection sont élevés. Au-dessus d'une vitesse de 0,15 m/s, chaque augmentation de 0,075 m/s du mouvement de l'air est ressentie par le corps comme une baisse de température de 1°C [17]. A faible température le mouvement de l'air peut causer la sensation de froid.

7. Phénomène de séchage des articles textiles

7.1. Définition

Le séchage est un phénomène qui se produit à cause d'un surplus d'humidité dans le milieu par rapport à son environnement. L'excès d'humidité par rapport à l'état d'équilibre est dégagé du milieu à l'atmosphère extérieure sous forme de vapeur d'eau, comme il est illustré dans la Figure 13 [44].

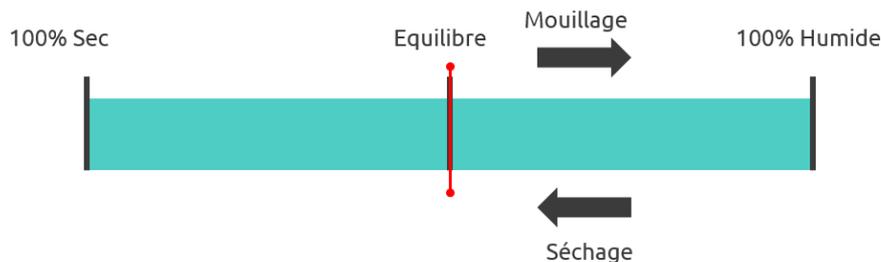


Figure 13: Illustration sur le déséquilibre qui provoque le séchage.

Le séchage est un processus au cours duquel un liquide est retiré d'un milieu donné en mettant en jeu des mécanismes de transfert de chaleur et de masse. La Figure 14 illustre le processus d'échange de la chaleur et de la masse durant le processus de séchage.

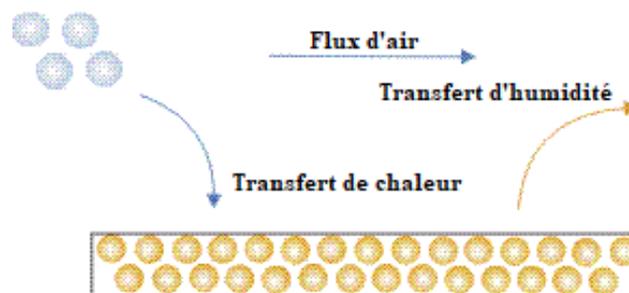


Figure 14: Processus de transfert de chaleur et de masse durant le processus de séchage.

La vitesse par laquelle le séchage se déroule dépend de la vitesse par laquelle l'énergie thermique est transférée aux sites de vaporisation et de la vitesse par laquelle la masse est transférée dans et à partir de la matière fibreuse.

Il existe plusieurs paramètres suivant lesquels nous pouvons évaluer le phénomène de séchage de la matière textile, comme le temps de séchage et le taux de séchage. Le temps de séchage est la durée au bout de laquelle 100% de l'eau appliquée est séchée [45]. Le taux de séchage est la durée nécessaire pour sécher une étoffe textile humidifiée avec une masse connue d'eau [45].

7.2. Importance du séchage dans le confort vestimentaire

Les perceptions de confort des vêtements de sport sont extrêmement influencées par le degré de mouillage de la peau et les sensations associées au taux de l'humidité d'un vêtement. L'excès d'humidité peut être issu de conditions extérieures comme la pluie ou de la sueur produite par le porteur qui n'est pas évacuée ou partiellement condensée au niveau du microclimat vestimentaire [46–48]. Par conséquent, le vêtement porté doit permettre un processus de séchage rapide pour garantir un confort thermique et hydrique au porteur. Il est toujours plus confortable d'avoir une couche adjacente à la peau sèche qu'humide. Le bien-être du porteur pendant ou à la suite d'une activité physique, dépend de la capacité d'un vêtement à évacuer l'excès d'humidité [6,7,34,40,49–53].

Lors d'une activité physique, la surface de la peau et du vêtement porté deviennent humides en raison d'une transpiration excessive. Selon Chinta et Gujar [54], lors d'une activité sportive comme le tennis ou le cyclisme, la chaleur métabolique augmente six fois et la transpiration accroît quatorze fois, comparée à une activité physique légère comme la marche pendant une courte durée.

Une humidité prolongée de la peau peut entraîner une Hidromeiose, qui est un blocage mécanique des glandes sudoripares par le gonflement de l'épiderme [55]. L'Hidromeiose entraîne une diminution du taux de sudation et de l'efficacité du refroidissement par l'évaporation de la sueur, ce qui engendre une augmentation de la chaleur corporelle [16,41,55–58].

En plus du mouillage de la peau, si la sueur reste dans le textile et ne s'évapore pas avec un taux suffisant, cette sueur remplit les pores du textile et empêche la diffusion de la transpiration de vapeur d'eau à travers l'assemblage fibreux vers l'environnement extérieur. Par conséquent, la température du corps augmente et plus de sueur est sécrétée [48,54,57,59–61]. Boughattas et al. [62] confirment cette affirmation. Ils ont étudié les propriétés thermiques et la perméabilité à la vapeur d'eau des étoffes tissées à l'état humide. Ils ont conclu que l'eau liquide dans la structure du tissu humide crée un film partiellement continu, ce qui limite le transfert de vapeur d'eau de la surface de la peau vers l'atmosphère extérieure. Les mêmes résultats ont été confirmés par M. Bogusławska et al. [63].

Alternativement, lorsque le taux de sudation est très élevé, l'augmentation du nombre de gouttes de sueur sur la surface de la peau, et la sueur qui coule retardent le refroidissement corporel [11,16,44,53,54,56,64–67]. Cette quantité de la sueur liquide doit être évacuée par capillarité vers les zones exposées à l'évaporation.

De plus, la présence de liquide dans le vêtement accroît la masse effective du vêtement, provoquant parfois l'affaissement du vêtement contre le corps. Dans de nombreuses activités sportives impliquant la course à pied, la gravité est une force majeure à vaincre. De ce fait, une augmentation de la masse portée peut diminuer les performances du sportif [8,68,69]. Il est rapporté que la dépense énergétique du corps humain augmente pour chaque kilogramme de poids supplémentaire dans les vêtements personnels [70] et peut augmenter considérablement la fatigue et réduire l'efficacité mécanique des muscles [37,54,71,72].

La quantité supplémentaire de force d'attraction ressentie à partir de l'interface du vêtement humide est appelée collage ou adhésivité. Les activités quotidiennes de l'homme et la tension superficielle de l'eau induisent une force de traînée qui est souvent associée à une sensation collante ou moite. Les textiles imbibés de transpiration deviennent collants sur la peau, et gênent ainsi les mouvements du corps. Ceci est considéré selon plusieurs chercheurs comme une source majeure d'inconfort ergonomique et tactile au niveau de vêtement porté [1,9,40,44,46,48,53,54,69,73–79].

Le confort sensoriel des vêtements de sport est déterminé par les sensations mécaniques provoquées par la couche de vêtement en contact avec la peau [43,77]. En outre, le frottement sur la peau est un facteur critique pour les lésions cutanées telles que l'irritation, l'abrasion et les cloques [9,16,21,37,54,57,77,80]. L'abrasion cutanée est une blessure à la peau causée lorsque les cellules de la peau sont éliminées lors du frottement contre des surfaces rugueuses externes [17]. De nombreuses irritations cutanées, dont l'urticaire, ont également été associées au port de vêtements trop petits ou trop humides [81].

Pratiquer du sport dans un environnement venteux et froid peut également entraîner une forte transpiration. Si le taux d'humidité augmente dans le vêtement, son isolation thermique diminue, la réduction varie entre 2 % et 8 % [82]. Au fur et à mesure que l'air à l'intérieur de la structure textile est remplacé par la sueur absorbée, la conductivité thermique de l'ensemble vestimentaire devient plus importante car la conductivité thermique de l'eau est environ 25 fois supérieure à celle de l'air. Avec l'augmentation de la conductivité thermique, l'isolation thermique globale du textile s'effondre. Ainsi, l'élimination de la sueur absorbée et condensée est vitale pour le porteur et elle réduit le risque d'une dangereuse hypothermie [54,57,81–83].

Dans le même contexte, lors de l'arrêt de l'activité physique, la chaleur métabolique commence à baisser, et par la suite la transpiration cesse. Pendant ce temps, l'évaporation de l'humidité de la peau et des vêtements persiste. L'absorption de chaleur due à la désorption et à l'évaporation de l'eau génère une diminution de la chaleur emmagasinée. Ce phénomène est largement connu sous le nom de « refroidissement post-exercice » [16,46,48,75,83,84]. Ce

refroidissement post-exercice peut être extrêmement inconfortable et, avec la diminution de l'isolation thermique par temps froid, il peut entraîner une hypothermie [48,82].

Dans les fibres hygroscopiques, comme le coton, la température du matériau s'élève grâce à la chaleur de sorption. Ainsi, une partie de la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'humidité est produite à partir de la chaleur dégagée par la sorption. Côté chaleur, la chute de la température de surface due à l'évaporation de l'humidité favorise la capacité du tissu à absorber continuellement plus d'humidité. Par conséquent, la capacité de séchage rapide du textile améliore l'absorption d'eau en réduisant la concentration d'humidité dans l'assemblage et en abaissant la chaleur du matériau [85].

L'étude de K. Gurudatt et al. [15] sur les propriétés de séchage du coton, du polyester et d'une variété des tricots en polyester modifié, a révélé que le taux de séchage est inférieur d'au moins deux ordres de grandeur au taux d'absorption.

7.3. Phénomène de séchage

Un matériau textile se compose essentiellement de capillaires interconnectés de forme et de taille irrégulières. Lorsque le mouillage se produit, ces pores sont remplis de liquide en diverses portions [35,86]. Selon A. G. Yiotis [87], après mouillage, on peut distinguer trois types de pores, entièrement occupés par le liquide, entièrement occupés par le gaz et occupés par le gaz mais contenant également des films macroscopiques de liquides. Par conséquent, une différence de pression de vapeur d'eau apparaît entre ces pores remplis et l'atmosphère environnante et il y'aura un échange d'humidité du milieu à haute pression vers le milieu à basse pression. La vitesse à laquelle cet échange a lieu dépend du gradient de pression de vapeur d'eau entre ces deux milieux [35,48,57,87–89].

Le séchage peut être défini comme un processus de drainage, où le liquide qui s'évapore est efficacement déplacé par un gaz non mouillant ou un processus dans lequel un liquide est retiré d'un milieu donné. Généralement, mais pas exclusivement, la principale substance liquide est l'eau [14,87,90–93]. Cette élimination se fait en convertissant le liquide en sa phase gazeuse et ensuite ce gaz sera éliminé.

L'évaporation est obtenue en fournissant une énergie thermique nominale égale à la chaleur latente de vaporisation du liquide [47,86,89,94]. Lorsque de l'air non saturé est en contact avec un matériau humide, un gradient de pression de vapeur s'établit à travers la couche limite. L'eau s'évapore dans l'air et l'humidité de l'air augmente. De la chaleur est nécessaire pour l'évaporation de l'eau du milieu, et la diminution de la température du milieu sera la cause d'une différence de température entre le milieu et l'environnement. En raison du gradient de

température, la chaleur s'écoulera de l'air vers le matériau pour maintenir le processus d'évaporation de l'eau [80,95–98].

La plupart des études réalisées sur le séchage des milieux poreux ont identifié deux périodes distinctes dans le processus d'évaporation d'un liquide à partir d'un milieu donné [14,86,89,90,99–110]. Tout d'abord, le séchage se déroule à une vitesse constante, l'humidité s'évapore comme si elle émanait d'une surface liquide libre, cette période est appelée "période à taux constant". Puis, à mesure que le matériau poreux sèche et que la teneur en humidité est réduite en dessous d'un certain seuil appelé « teneur en humidité critique », le taux commence à baisser jusqu'à ce que la teneur en humidité d'équilibre soit rétablie. Cette période est appelée « la période de chute du taux ». La Figure 15 présente une courbe de séchage typique qui illustre la différence entre les deux périodes.

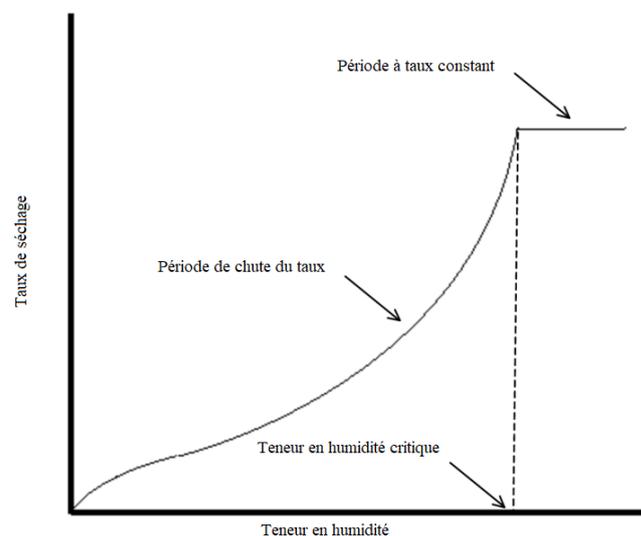


Figure 15: Courbe de séchage typique, le taux de séchage en fonction de la teneur en humidité.

D'autres travaux ont divisé la période de chute du taux en deux sous-périodes, une sous-période linéaire et une non linéaire [35,48,107,111–113]. Les périodes du taux constant et de chute du taux se différencient dans les mécanismes de séchage même si les conditions externes de séchage sont stables tout au long du processus. Comme l'indiquent leurs noms, dans la première période, le transfert de chaleur et de masse se produit à un rythme constant et ensuite il diminue.

La teneur en humidité critique est considérée comme la concentration minimale d'eau à laquelle la montée capillaire à l'interface air-liquide reste suffisamment rapide pour maintenir l'évaporation d'origine maximale à la surface périphérique. À la teneur en humidité critique, la surface de liquide exposée diminue en surface et, par conséquent, la vitesse à laquelle l'eau

s'évapore va diminuer proportionnellement à la diminution de la fraction mouillée de la surface totale exposée [111,114]. Il est constaté que les teneurs en humidité critiques dépendent de la quantité d'humidité adsorbée et, dans une moindre mesure, de la vitesse de séchage et de la structure du matériau. Et elles semblent être indépendantes de l'épaisseur du matériau. En général, la teneur en humidité critique d'un matériau hygroscopique est supérieure à celle d'un matériau hydrophobe de construction similaire [86,99,114].

7.4. Facteurs qui affectent le temps de séchage

Le pouvoir de séchage des vêtements pendant ou après une activité physique importante est régi par deux groupes de facteurs. Le premier groupe comprend les conditions extérieures (température, humidité relative, vitesse de l'air, etc...) et le second groupe comprend les propriétés du matériau textile au cours du séchage (nature de la fibre, finesse du fil, porosité, étanchéité, finition, etc...) [15,95,114,115].

Le premier groupe de facteurs affecte le taux de séchage principalement pendant la période à taux constant [95,107,111]. Pendant cette période, le mécanisme de contrôle du séchage est l'évaporation de l'eau de la surface libre du matériau, et comme il était décrit par Myron J. Coplan [111], le mécanisme est analogue à l'évaporation de l'eau à partir d'un béccher. Ce mécanisme dépend à son tour de la capacité de propagation capillaire transversale du milieu, ce qui est un résultat direct de la disposition et la distribution des micropores et macropores dans le milieu.

Pendant la période de chute du taux, le taux de séchage est régi par le taux de diffusion interne de la vapeur d'eau. A ce stade, les principaux facteurs affectant le taux de séchage sont les propriétés du milieu et les variations des conditions externes n'exercent pas une influence majeure [95,107,108].

7.4.1. Vitesse de l'air

Le mouvement de l'air à la proximité d'un matériau en cours de séchage affecte significativement le taux d'évaporation. Wenbin Li et al. [116] ont établi une méthode pour mesurer la variation dans l'humidité de la surface du textile pendant le processus de libération d'eau à différentes vitesses d'air pour simuler des conditions venteuses. Leurs résultats ont montré qu'il faut plus de temps aux étoffes pour terminer le processus de libération de l'humidité lorsque la vitesse du vent simulée diminue. Ils ont conclu que l'augmentation de la vitesse du vent accélère le taux d'évaporation et que le temps nécessaire pour atteindre la teneur en humidité d'équilibre diminue en conséquence. Les mêmes résultats ont été trouvés par Tereza

Heinisch et al. [47] en mesurant le temps de séchage des étoffes tissées en coton et en polypropylène. Ils ont observé qu'une augmentation de la vitesse du flux d'air, de 2 m/s à 4 m/s, conduit à une diminution du temps de séchage d'environ 20 % au minimum pour tous les d'échantillons testés.

L'influence de la vitesse de l'air agit sur deux volets. Le premier volet est le renouvellement de l'air de l'atmosphère au voisinage de la zone de séchage.

Dans le cas où il existe un renouvellement d'air dans le microclimat entre la peau et le vêtement, l'air riche en vapeur d'eau est remplacé par l'air frais de l'environnement. Cet air est relativement sec, donc on observe une augmentation dans le gradient de concentration d'humidité entre la surface de la peau et le microclimat. L'augmentation du gradient favorise l'évaporation de la sueur et par la suite améliore l'efficacité de refroidissement du corps humain. Un effet similaire se produit lors du passage de l'air sec à travers les cavités de la matière textile, le gradient de concentration qui est l'origine de la force motrice de diffusion de la vapeur d'eau augmente considérablement ce qui amène à une augmentation du taux de diffusion des molécules d'eau du microclimat entre la peau et le vêtement à l'environnement à travers la couche textile [24]. La Figure 16 illustre l'effet du renouvellement de l'air près le front d'évaporation.

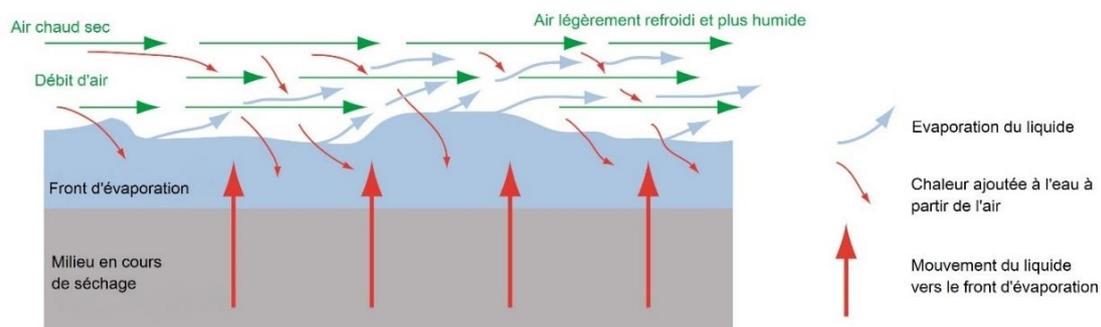


Figure 16: Schéma explicatif sur l'effet du mouvement d'air près du front d'évaporation sur le taux de séchage.

Le deuxième volet est l'influence de la vitesse de l'air sur la couche superficielle d'air immobile sur la matière en cours de séchage. La surface de l'étoffe textile est en fait un espace d'air tridimensionnel. En plus des fibres de surface, la surface du textile contient également de l'air qui s'est coincé entre les fibres et aussi une couche d'air immobile juste au-dessus d'elles. Lyman Fourt et al. [109] ont examiné le comportement de séchage en ligne d'une large gamme des structures textiles. Les étoffes testées contiennent des variétés de fibres et elles ont des structures différentes. Ils ont montré que le facteur régissant la vitesse de séchage est l'épaisseur

des films d'air relativement immobile près de la surface du textile, qui contrôlent le flux de chaleur et de vapeur depuis et vers le milieu humide.

Ce film d'air stationnaire existe à la surface de tout corps solide. IRVING LANGMUIR [117] a mené plusieurs expériences dans lesquelles la présence d'un film d'air stationnaire est démontrée. Ce film a une épaisseur variable qui dépend principalement de la vitesse de l'air. Lors du séchage, l'eau évaporé ne peut traverser son épaisseur que par diffusion.

Le facteur le plus significatif qui affecte l'épaisseur de la couche d'air immobile est la vitesse de l'air [95,107]. IRVING LANGMUIR [117] a prouvé que l'épaisseur du film diminue à mesure que la vitesse du vent augmente. LW C Miles [118] a montré que l'utilisation d'un ventilateur puissant pendant le processus de séchage industriel génère un taux optimal de chauffage à la surface du matériau et une élimination efficace de la vapeur d'eau en réduisant l'épaisseur de la couche d'air immobile à la surface. E.A. Fisher et al. [119] ont indiqué qu'une vitesse de vent élevée balaye une partie du film stationnaire, réduisant ainsi son épaisseur et accélérant le processus de séchage.

Comme le montrent les travaux antérieurs, la vitesse de l'air a un effet important sur le taux de séchage des matières textiles en remplaçant l'air saturé par de l'air frais et en réduisant l'épaisseur du film d'air stationnaire à la surface du textile.

7.4.2. Température et humidité

La fluctuation des forces motrices, de vapeur d'eau ou de chaleur qui affectent la vitesse de séchage, est déclenchée par la variation de la température et de l'humidité relative de l'atmosphère environnante. À une humidité relative élevée, la teneur en vapeur d'eau dans l'air est trop élevée, donc une pression de vapeur d'eau importante existe dans l'air. Cette condition atmosphérique entraîne la diminution du gradient de pression de vapeur d'eau entre l'environnement et le matériau mouillé. Ce qui entraîne à son tour une baisse dans le taux de transmission des particules de vapeur d'eau du milieu vers l'atmosphère. Et à terme, le temps de séchage sera plus élevé [95,96,120].

La température est un facteur important dans le processus de séchage, soit comme un facteur extérieur ou comme un paramètre qui décrit l'état du milieu. La température de l'air ambiant possède une relation plus étroite avec le taux de séchage que la température de la surface d'évaporation du milieu. Cette constatation est publiée par E. A. Fisher et al. [119]. Ils ont mené une série d'expériences pour étudier l'effet de la température sur le taux de séchage des étoffes en laine. Ils ont également constaté que l'effet de la température sur l'augmentation

du taux de séchage d'une étoffe complètement humide est dû à l'augmentation correspondante de la pression de vapeur à la surface d'évaporation, où il existe une surface libre d'eau.

E. A. Fisher [115] attire l'attention sur l'importance de la température comme facteur déterminant durant le processus de séchage en soulignant la différence en pression de vapeur de l'eau à deux températures distinctes. Les pressions de vapeur de l'eau à 25°C et 18°C, sont respectivement de 23,5 et 15,4 mm de mercure. Ahmet Cay et al. [7] ont mené des expériences de séchage sur des structures tricotées en jersey simple à trois températures et humidités relatives différentes, les conditions d'atmosphères standards ont été considérées comme références. Ils ont remarqué que le temps de séchage augmente avec l'augmentation de l'humidité et que l'augmentation de la température de l'air diminue considérablement les temps de séchage. Cette diminution s'est avérée indépendante du type de la fibre. Parmi les tricots testés, ils ont observé que les tricots en polyester et les mélanges de polyester étaient les échantillons les plus affectés par l'augmentation de l'humidité et les tricots en coton et Lyocell étaient les moins influencés. Donc, avec l'augmentation de la nature hygroscopique de la fibre, les effets de l'humidité ambiante sur le taux de séchage diminuaient. Les mêmes résultats ont été trouvés par D Raja et al. [121] concernant l'effet de l'humidité sur les fibres hydrophiles. Ils ont étudié l'influence de l'humidité relative sur le comportement du séchage des étoffes textiles fabriquées avec des fibres hydrophiles. Trois niveaux d'humidité ont été choisis 49 %, 60 % et 72 %. Les résultats ont montré qu'il existe une différence peu significative entre les comportements de séchage dans les trois différents niveaux d'humidité relative.

Outre la température de l'atmosphère, il a été prouvé que la chaleur échangée entre le milieu en cours de séchage et les éléments environnants par conduction ou rayonnement exerce une grande influence sur la vitesse de séchage.

7.4.3. *Autres facteurs*

Afin d'améliorer la perception de confort d'un porteur pendant ou après une activité physique de haut niveau, le temps nécessaire pour que le vêtement sèche doit être raccourci. Pour atteindre cet objectif, il convient d'étudier comment les deux groupes de facteurs affectent le comportement de séchage. Le premier groupe de facteurs ne peut pas être étudié à cette fin, car ils sont hors du contrôle humain. Néanmoins, la compréhension de la façon dont le premier groupe de facteurs affecte le comportement de séchage du textile est importante dans l'établissement d'une méthode pratique pour évaluer cette propriété de confort vestimentaire. Par conséquent, pour améliorer la capacité de séchage du vêtement, il faut étudier l'effet de la variation des paramètres du deuxième groupe de facteurs. La modification des paramètres de

structure textile peut se faire à trois niveaux, au niveau de la fibre, du fil et de la structure textile surfacique.

7.5. Relation entre le séchage et les autres propriétés du confort vestimentaire

Le séchage est un processus qui est considéré comme l'enlèvement de liquide d'un matériau solide mouillé [6,11,122–125]. Tout d'abord, l'eau s'évapore de la surface libre sur l'interface textile-air. La vapeur d'eau est transférée par le flux de convection, puis un gradient d'humidité à l'intérieur de la structure est créé. Ce gradient entraîne l'eau de l'intérieur vers la surface de la structure qui est définie par la diffusion interne [15,47,48,81,122].

Le trajet de la sueur liquide de la surface de la peau vers l'environnement externe lors du port de vêtements peut être divisé en trois étapes [15,53,126,127]. i) Le transfert de sueur de la surface de la peau vers la couche intérieure du vêtement, qui est défini comme la capacité de mouillage du textile. ii) Le passage de la sueur à travers la couche textile, de la couche intérieure à la couche extérieure, qui est défini comme la propagation transversale. iii) Le passage de la sueur de la couche extérieure du vêtement vers l'atmosphère libre, qui est défini comme le séchage. La propagation parallèlement à la surface du textile se déroule aussi simultanément avec ces trois étapes. La Figure 17 présente une illustration de ces trois étapes en posant une goutte sur une surface textile.

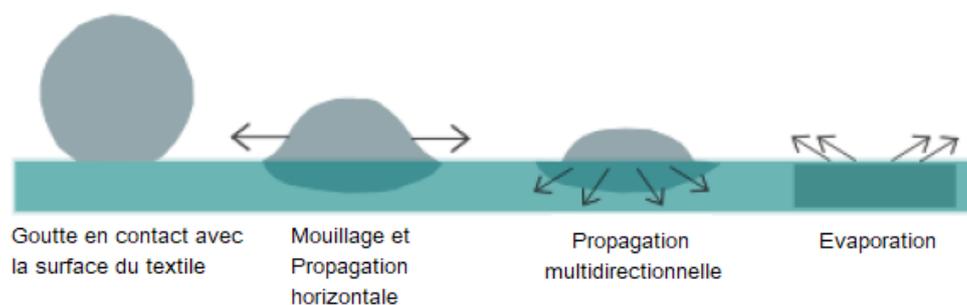


Figure 17: Schéma explicatif des étapes de transfert de la sueur à travers la couche textile.

Nous pouvons déduire que le séchage du vêtement durant le port ne peut pas se produire si le textile ne peut pas absorber la sueur liquide de la surface de la peau mouillée. De même, le séchage de la couche extérieure ne peut se produire que si le textile ne peut pas transporter l'humidité de la surface intérieure mouillée vers la surface extérieure d'évaporation. Le taux de séchage dépend aussi de la surface d'exposition du front d'évaporation, alors la propagation parallèle à la surface est de même importance.

Durant la période de chute du taux, le front d'évaporation est situé à l'intérieur de la structure textile. Alors, la perméabilité à la vapeur d'eau du support détermine le nombre de particules de vapeur d'eau qui peuvent traverser l'assemblage fibreux par unité du temps. Le renouvellement de l'air à l'intérieur de la structure dépend à son tour de la perméabilité à l'air du support.

Lors du séchage, il existe un échange de chaleur entre le textile et l'environnement, alors la conductivité thermique de l'ensemble du vêtement joue un rôle important dans l'efficacité de cet échange. La propriété de séchage englobe la majorité des propriétés du confort vestimentaire, notamment, le mouillage, la propagation capillaire, la perméabilité à l'air, la perméabilité à la vapeur d'eau et les propriétés thermiques.

8. Généralités sur la composition et les structures des vêtements de sport

La matière textile est considérée comme un milieu poreux contenant deux types de pores. Les pores constitués par les espaces entre les filaments ou les fibres dans un fil nommés « Micropores ». L'entrelacement et l'entrecroisement des fils dans les étoffes forment des espaces vides nommés « Macropores ». Un milieu poreux est généralement défini comme étant une matrice solide qui contient des espaces vides appelés pores. Les pores sont des espaces vides pouvant être interconnectés ou séparés. L'interconnexion des pores permet à une phase fluide de percoler à travers un milieu poreux donné [35]. De plus, la distribution et la taille des pores déterminent la capacité globale du milieu à transporter le fluide et à transférer la chaleur à travers sa structure [128]. Les paramètres caractérisant un milieu poreux sont : sa porosité, la tortuosité des capillaires, la distribution et la taille des pores [128]. Dans le cas du textile, ces paramètres sont déterminés par les propriétés structurales de la fibre, du fils et de la contexture de la matière textile surfacique.

8.1. Fibre

Une fibre textile peut être définie comme l'élément structurel de base pour les produits textiles. C'est le plus petit composant textile, il peut être synthétique ou naturel [38,130]. Une fibre textile est une structure très fine avec une très grande flexibilité [37]. Parmi les caractéristiques influentes sur le confort textile, nous trouvons la nature de la fibre et son hygroscopicité.

8.1.1. *Nature de la fibre*

La nature de la fibre a une influence importante sur les propriétés du produit final telles que la résistance, le toucher, le lustre, la durabilité, l'extensibilité, l'absorption de la teinture, la récupération élastique, les propriétés de frottement, le transfert de chaleur et la gestion de l'humidité [17,131].

En termes de confort vestimentaire, les fibres naturelles sont généralement considérées comme étant les fibres les plus confortables au porté. Cette notion existe depuis un certain temps puisque les fibres naturelles ont un potentiel plus élevé pour fournir une isolation thermique et un bon échange hydrique. Alors que les fibres synthétiques sont généralement déficientes en matière d'absorption d'humidité et de conservation de chaleur. Cependant, les fibres synthétiques sont majoritairement utilisées, à la place des fibres naturelles, dans les vêtements de sport à haute activité où il y a une transpiration abondante [17,131]. Les fibres synthétiques sont produites sous forme de filaments [18]. Les filaments synthétiques sont fabriqués en extrudant une solution de polymère à travers une filière. Le nombre d'orifices dans la filière détermine le nombre de filaments dans le fil.

Le filament de polyester est le filament le plus utilisé dans la fabrication de vêtements de sport en raison de ses propriétés telles que sa résistance élevée, sa perméabilité à la vapeur d'eau, sa mauvaise absorption des liquides et sa capacité de séchage rapide.

8.1.2. *Hygroscopicité*

Les fibres hygroscopiques peuvent absorber très facilement la sueur à la surface de la peau et peuvent offrir une meilleure sensation de confort. Néanmoins, l'eau absorbée est retenue dans la structure fibreuse, et il faut beaucoup de temps pour l'évaporer. De ce fait, le vêtement risque d'être entièrement saturé de transpiration et le porteur aura une sensation d'inconfort [129]. De plus, la transmission de l'humidité à travers la couche de l'étoffe textile est affectée par l'hygroscopicité de la fibre. Avec l'absorption d'humidité par la fibre, elle libère de la chaleur, ce qui entraîne une modification du profil de température et de la concentration d'humidité à travers l'étoffe et, par conséquent, le taux de transmission de l'humidité varie. Encore, le gonflement des fibres hygroscopiques génère un rétrécissement des micro-canaux à travers lesquels la vapeur est transmise [18].

De nombreuses interactions entre les molécules d'eau et les molécules de fibres existent. Certaines fibres ont des molécules d'eau fortement liées et incapables de bouger, tandis que d'autres fibres ont des molécules d'eau faiblement attachées mais toujours libres de se déplacer.

Les groupes chimiques existant dans la structure de la fibre déterminent comment les molécules d'eau y adhèrent, il peut s'agir de groupes hydrophiles ou hydrophobes [19,133]. Toutes les fibres naturelles, animales et végétales, ont des groupes dans leurs molécules qui attirent l'eau. Par exemple, la molécule de cellulose contient des groupes hydroxyle ($-OH$), et des liaisons hydrogène peuvent se former entre les molécules d'eau et les groupes hydroxyle comme illustré dans la Figure 18 [38,131]. Les groupes amides ($-NH-$) se trouvent dans la chaîne polymère des fibres protéiques sont également capables d'attirer des molécules d'eau pour former des liaisons hydrogène [19].

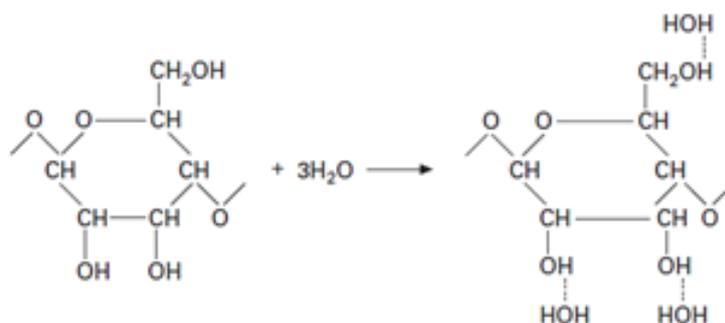


Figure 18: Liaison hydrogène des molécules d'eau avec les groupes hydroxyle de la cellulose.

D'autre part, toutes les fibres synthétiques actuellement fabriquées ont très peu, voire aucun, groupes attirant l'eau, c'est pourquoi elles ont une faible capacité d'absorption d'humidité.

Le choix de la nature des fibres ou des filaments à utiliser dans le vêtement de sport est important et chaque catégorie (hydrophile ou hydrophobe) présente des avantages et des inconvénients par rapport aux transferts thermique et aux propriétés de mouillage et de séchage.

8.2. Fil

Un fil est défini comme un produit de longueur importante avec une section transversale relativement petite, contenant des fibres avec ou sans torsion [32,129]. Il existe deux configurations de fibres qui peuvent exister dans un fil : les fibres discontinues et les filaments qui sont des fibres de même longueur que le fil.

Dans notre étude, nous utilisons principalement des fils multi-filamentaires en polyester. Il s'agit d'un fil multi-filaments qui est un ensemble de faisceaux parallèles de filaments disposés côte à côte parallèlement sur toute la longueur du fil. Les fils à un seul filament sont appelés mono-filaments et ceux à plus d'un filament sont appelés multi-filaments [18]. Les types basiques de fils sont représentés dans la Figure 19.

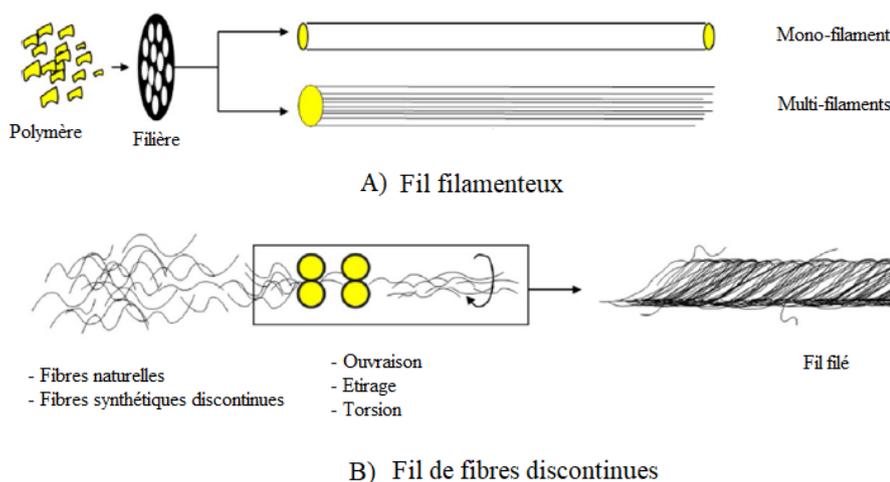


Figure 19: Types basiques de fils. A) Fil filamenteux, B) Fil de fibres discontinues.

Le mélange de différents types de fibres dans un seul fil est réalisé afin de profiter des qualités de chaque composant du mélange pour avoir finalement un produit final amélioré [131]. Plusieurs propriétés peuvent être obtenues à partir de ce mélange comme l'extensibilité, l'absorbance, la résistance, la douceur et l'amélioration des propriétés d'abrasion [18].

8.2.1. Texturation

Généralement, les fils multi-filaments n'ont pas besoin d'être tordus pour éviter que les filaments ne se séparent dans le fil, une légère torsion est appliquée à cette structure (un ou deux tours par centimètre) [129]. Les filaments continus peuvent également être transformés en différentes variantes structurelles par enchevêtrement délibéré ou reconfiguration géométrique, en utilisant une technique appelée texturation dans le but d'obtenir des fils plus extensibles et/ou des fils plus volumineux.

La texturation est un procédé qui modifie la disposition plate et parallèle des multi-filaments à des configurations permanentes telles que des frisures ou des spires qui aident à piéger des poches d'air et confèrent une structure volumineuse au fil [32]. Les propriétés essentielles produites par la texturation sont l'isolation thermique, la douceur, l'élasticité, la capacité de rétention de la forme, l'amélioration de l'absorption et le transport des liquides [131]. Le volume du fil texturé génère une structure plus poreuse, qui offre une meilleure capacité d'absorption et d'étalement du liquide [2,17].

8.2.2. Compactage

Le compactage du fil joue un rôle dans le maintien d'un certain degré d'intégrité structurelle. Dans un multi-filaments, les pressions latérales créées par les filaments externes

appuyant sur les filaments internes et provoquent l'adhésion des filaments entre eux. Comme aucun air ne peut pénétrer entre les filaments, le niveau de compactage est à son maximum. Lorsque le fil est texturé, des espaces inter-filaments sont créés, ce qui réduit le compactage de ces fils [129].

Le compactage des filaments dans une structure de fil peut être quantifié par la quantité d'air immobile enfermée par les filaments à l'intérieur du fil, c'est un terme communément appelé fraction de compactage du fil (φ). Calculé suivant l'équation (12) [129,130].

$$\varphi = \frac{V_{\text{fibre}}}{V_{\text{fil}}} = \frac{V_{\text{fibre}}}{V_{\text{fibre}} + V_{\text{air}}} \quad (12)$$

Avec, V_{fibre} , V_{fil} et V_{air} sont respectivement les volumes occupés par les fibres ou les filaments, du fil et de l'air emprisonné dans le fil.

La variation du taux de compactage influence la capacité du fil à transporter l'eau, sous forme liquide et vapeur, à travers les vides entre les filaments. Avec une valeur de compactage importante, peu d'air pénètre à l'intérieur du fil et la propagation se déroule principalement à la surface externe du fils. Si la valeur de fraction de compactage du fil est petite, alors, l'eau peut se propager entre les fibres à l'intérieur du fil. Des fils ayant différentes fractions de compactage vont présenter des propriétés de confort vestimentaire différentes tels que la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau, les propriétés de gestion de l'humidité et la capacité de séchage.

8.3. Étoffe textile

L'enchevêtrement des textiles linéiques (des fils ou des fibres) sous un ensemble de force de cohésion mécanique ou/et chimique produit une structure ayant un aspect surfacique appelée étoffe textile [18]. L'entrecroisement de deux séries de fils perpendiculaires entre elles (les fils de chaîne et les fils de trame) forment un tissu, l'entrelacement curviligne du fil pour construire une série de boucles appelées mailles reliées entre elles forment un tricot, la disposition unidirectionnelle ou aléatoire des structures linéiques constituent une nappe appelée non-tissé.

Généralement, les étoffes tricotées sont les structures les plus couramment utilisées pour les vêtements de sport, car elles peuvent assurer au porteur le confort ergonomique, tactile et physiologique. En raison de leur grande élasticité et de leur propriété d'anti-froissement, les structures tricotées offrent une liberté de mouvement, une pression exercée réduite et une bonne rétention de forme [19]. De plus, les étoffes tricotées ont peu de points de contact avec la surface de la peau pendant le port. Ceci permet d'avoir moins de sensations d'accrochage et de collage

lorsque le vêtement est mouillé [81]. De plus, en raison de leur structure poreuse, les tricots garantissent la respirabilité du corps en permettant la circulation de l'air frais de l'environnement et l'évacuation de la vapeur d'eau de la surface de la peau.

Les tricots sont classés principalement en tricots chaîne et en tricots trame, en fonction de la direction du mouvement du fil par rapport à la direction de formation du tricot [131]. Dans les tricots à mailles jetées ou tricots chaîne, les mailles sont formées dans le sens de la longueur du tricot d'où l'appellation « chaîne ». Les mailles d'une même rangée sont disposées au même moment par des fils différents. Ces tricots chaîne sont indémaillables. Dans les tricots à mailles cueillies ou tricots trame, les mailles d'une même rangée sont formées les unes après les autres par le même fil et disposées les unes à côté des autres dans le sens de la largeur du tricot d'où l'appellation « trame ». Ces tricots sont faciles à démailler, il suffit de tirer sur l'extrémité du fil à la rangée supérieure pour démailler toutes les boucles. La plupart des tricots utilisés comme vêtements de sports sont des tricots trames [133].

8.3.1. Porosité

La porosité du tricot est le volume total d'espace vide dans une zone spécifiée [17]. Les macropores sont la voie qui permet généralement la pénétration de l'air frais de l'environnement et l'évacuation de l'air saturé en vapeur d'eau du microclimat. Cet effet de ventilation rend le refroidissement du corps humain plus efficace [17,18]. La pénétration du liquide dans l'assemblage textile dépend de la macroporosité de la structure. De plus, l'étalement de l'eau est gouverné par la pression capillaire produite à l'intérieur de ces canaux. Les pores inter-fibres, de dimensions appropriées, produisent une pression et une interconnectivité suffisantes pour permettre le mouvement de l'eau, sous sa forme vapeur et liquide, à l'intérieur de l'étoffe textile [134,135].

La porosité de l'étoffe textile tricotée peut être contrôlée par la forme de la section transversale des fibres, la technique de filage des fils et les paramètres de conception et de construction des tricots. La longueur de fil absorbé et la jauge de la machine sont des paramètres importants qui influencent la porosité de l'étoffe [129]. La jauge de la machine est définie comme le nombre d'aiguilles à tricoter par unité de longueur, le long d'une fonture de la machine à tricoter. Il indique l'ouverture ou la proximité des boucles entremêlées. Plus le nombre d'aiguilles dans la longueur spécifiée est élevé, plus la jauge est élevée et, par conséquent, plus les boucles sont rapprochées les unes des autres [129].

8.3.2. *Mélange de fils*

Le mélange des fils dans un même support textile a pour but d'exploiter la fonctionnalité de chaque type de fil ou de chercher un effet désiré. Le mélange des fils de tricotage peut être effectué au niveau du bobinoir ou par vanisage. Le vanisage est le cueillage de l'aiguille de tricotage de plus d'un fil dans des différents stades de formation de la maille, ces fils sont enfilés dans le même guide fils mais dans des trous séparés et dans le cas d'un vanisage par l'élasthanne un guide spécial est utilisé.

L'emploi du mélange de fils ayant des pores de tailles différentes peut entraver la propagation capillaire des liquides. L'expansion géométrique soudaine entre petits et grands pores dans des milieux poreux hétérogènes peut augmenter la résistance à l'avancement du liquide en contrôlant le mouvement des ménisques dans le capillaire. C'est ce qu'on appelle l'effet de valve capillaire [35].

8.3.3. *Design*

Le tricotage est une technique de fabrication de textile surfacique en créant des boucles entremêlées verticalement à partir d'une longueur continue de fil. Il s'agit d'une méthode d'entrelacement qui consiste à former des fils en boucles, dont chacune n'est libérée qu'après qu'une boucle suivante a été formée et enchevêtrée avec elle, de sorte qu'une structure de boucle de masse stable et sécurisée est obtenue [131]. Une boucle fait référence à une forme produite par une courbe qui s'arrondit et se croise. En tricotage, c'est l'unité de base d'une structure tricotée. Elle est produite en pliant le fil à l'aide de certains éléments de tricotage, à savoir l'aiguille et la platine [133].

L'ornementation du tricot pour des raisons de design peut être introduite au stade du tricotage. Pour diversifier la conception, différents types de mailles peuvent être introduits dans le modèle tricoté, comme les mailles chargées et les flottées [133].

Une maille chargée, présentée dans la Figure 20, est créée lorsqu'une aiguille attrape une nouvelle boucle sans dégager l'ancienne boucle formée sous le clapet. Ainsi, l'aiguille présente deux boucles dans le crochet entraînant la formation d'une maille chargée dans le rang suivant. Une charge est constituée de la boucle tricotée précédemment formée appelée boucle tenue (maille chargée), que l'aiguille avait retenue, et de la boucle ou des boucles qui la rejoignent en tant que boucle de charge, qui se trouve toujours derrière la boucle tenue. La boucle de charge n'est pas imbriquée avec la boucle précédente mais elle est rentrée derrière elle sur le côté inverse de la maille et lorsque l'aiguille est dégagée sur un parcours conséquent, la nouvelle

boucle est tirée à travers la boucle tenue et la boucle de charge depuis l'arrière du tricot [131]. Le tricot avec des mailles chargées est plus épais et moins extensible en raison, respectivement, de l'accumulation de fil à l'endroit de la maille chargée et d'une longueur de fil absorbé plus petite. La maille chargée crée un effet de texture qui dépend des aiguilles sélectionnées pour être chargées [133].

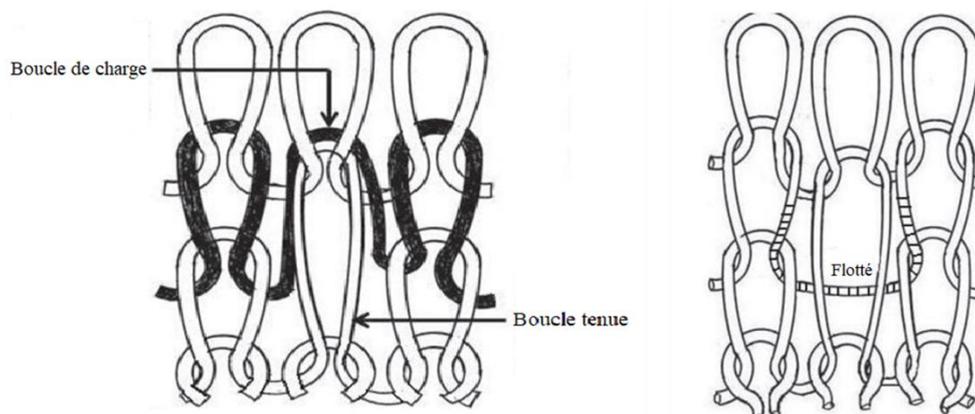


Figure 20: Schéma représentative d'une boucle de charge et d'un flotté.

Une maille flottante ou un flotté, présentée dans la Figure 20, est produite lorsqu'une aiguille tenant la boucle précédemment formée est incapable de remonter et d'attraper le nouveau fil. Le fil passe alors comme une maille flottante ou manquée et repose librement sur l'envers, joignant les deux boucles tricotées produites par les aiguilles adjacentes [130].

Une maille flottante a une apparence en forme de U sur l'envers du tricot présentant des lignes horizontales. Elle rend le tricot plus fin en raison d'une moindre accumulation de fils et plus étroit à mesure que les colonnes sont rapprochées, ce qui réduit l'élasticité dans le sens de la largeur et améliore la stabilité de la structure. Cela rend également le tricot moins extensible, moins rigide et plus léger en raison d'une consommation faible de fil lors de la création de la maille flottante [131].

La teinture du textile joue un rôle important dans la conception et le design des vêtements de sport, pour des raisons commerciales ou fonctionnelles. Selon la nuance sélectionnée, le type de colorant et le critère de qualité demandé, la procédure et les paramètres de la teinture change, comme la durée, la température et les traitements post-teinture. Ces différences peuvent provoquer également des changements dans la structure textile provoquant des comportements différents dans le processus d'échange de chaleur et de masse. De plus, les ondes absorbées et reflétées par certains coloris peuvent affecter la diffusion et l'absorptivité thermique de la matière textile.

8.3.4. *Traitements de finissage*

Les étoffes textiles utilisés à des fins d'habillement doivent subir une grande variété d'étapes de post-teinture avant d'être utilisées, appelées « traitements de finissage ». Les tricotés à usage quotidien subissent des traitements de base, comme la thermo-fixation et l'adoucissage. Par ailleurs, certains traitements chimiques de finissage sont utilisés pour conférer aux supports textiles des propriétés supplémentaires, comme l'ignifugation, l'antibactérien et l'hydrophilie [136].

Dans les vêtements de sport, le traitement de finition le plus couramment appliqué est le traitement d'hydrophilie à cause du caractère hydrophobe des fibres synthétiques utilisées. Avec une meilleure absorption de l'humidité, les fibres synthétiques peuvent assurer une sensation agréable et confortable au porteur permettant la transmission de la vapeur d'eau. Le traitement de finissage hydrophile est appliqué pour améliorer les capacités d'absorption et de transport de l'humidité du support textile. L'étoffe hydrophobe peut être convertie en structure hydrophile par plusieurs méthodes, comme le plasma, la sonochimie, les enzymes ou en appliquant un composé chimique synthétique.

9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la perception du confort vestimentaire dans les vêtements de sport et nous avons souligné les points suivants :

- Le confort vestimentaire est une perception subjective de l'être humain qui peut être classée en quatre aspects notamment le confort thermo-psychologique, le confort sensoriel, le confort ergonomique et le confort thermo-psychologique.
- Le corps humain possède des mécanismes naturels par lesquels il lutte contre les perturbations thermiques extérieures. Ces mécanismes freinent ou favorisent les modes de transfert de chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.
- La couche vestimentaire constitue une barrière interactive face à un transfert de chaleur et de masse.
- La transmission de l'eau peut être effectuée par diffusion, sorption et désorption, convection mouillage et propagation capillaire et par condensation.
- Les facteurs qui influent le confort vestimentaire dans les vêtements de sports sont le niveau de l'activité physique, la température, l'humidité, la vitesse de l'air et les caractéristiques du textile portée.

Dans le chapitre suivant, nous allons indiquer les caractéristiques de la matière textile qui peuvent influencer le confort vestimentaire ainsi que les méthodes de leurs déterminations. Nous allons, par la suite, préciser les différentes propriétés permettant d'évaluer le niveau de confort vestimentaire pour un article de sport et les méthodes expérimentales correspondantes.



Chapitre II : Matériels et Méthodes



1. Introduction

Le développement des vêtements de sport est en croissance continue. Aujourd'hui, une grande attention se porte sur la conception de vêtements pour les athlètes. Les vêtements confortables peuvent améliorer la performance de l'athlète [8]. Dans ce contexte, notre partenaire industriel **VTL** cherche à développer des tricotés qui offrent plus de confort au porteur. Pour répondre aux besoins des clients de notre partenaire industriel, nous devons évaluer le niveau de confort des articles produits pour constater les améliorations éventuellement apportées. De ce fait, il est primordial de déterminer les principaux paramètres en liaison directe avec cette propriété.

D'après l'étude bibliographique présentée dans le chapitre précédent, nous pouvons constater que la texture et les caractéristiques du matériau textile avec les conditions environnementales (température, humidité relative, vitesse du vent, etc...) jouent un rôle important et influence directement les sensations de confort vestimentaire.

Les procédés de fabrication des tricotés (tricotage, teinture et finissage) conditionnent et imposent les propriétés et les paramètres des structures textiles. De ce fait, ce chapitre est consacré principalement à la présentation des méthodes de caractérisation des structures textiles, des procédés de fabrication et des matières utilisées.

2. Caractérisation des paramètres structuraux

2.1. Détermination de la porosité des fils

La porosité du fil notée ε (%) est définie par le pourcentage du volume des pores ou volumique occupé par l'air par rapport au volume du fil. La porosité du fil est considérée égale au pourcentage d'espace d'air contenu dans le volume total du fil. Elle est calculée en utilisant les considérations suivantes [137,138].

Les fils utilisés dans cette étude sont des fils multi filamentaires composés chacun par un nombre « n » de filaments de même longueur « l » que celle du fil. Le fil est considéré comme un cylindre composé de filaments cylindriques. De ce fait :

$$\varepsilon (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\text{Volume occupé par les filaments}}{\text{Volume du fil}} \right) \quad (13)$$

$$\varepsilon (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{n \times \pi \times \frac{D_f^2}{4} \times l}{\pi \times \frac{D_F^2}{4} \times l} \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon (\%) = 100 \times \left(1 - \frac{n \times D_f^2}{D_F^2}\right) \quad (15)$$

Avec, D_f et D_F sont respectivement les diamètres moyens du filament et du fil.

Le dispositif expérimental utilisé pour déterminer ce paramètre est constitué d'un microscope de type LEICA, présenté dans la Figure 21, sur lequel est montée une caméra permettant l'acquisition d'images. Un logiciel spécialisé dans la détermination des caractéristiques géométriques permet d'observer les diamètres des fils et des filaments les composants, avec des agrandissements suffisants.

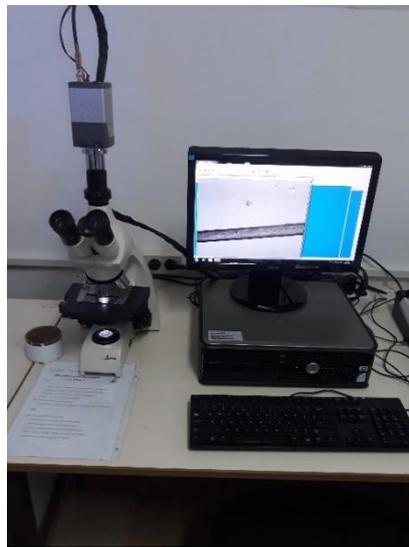


Figure 21: Microscope biologique LEICA et l'unité informatique de mesure.

Pour le calcul de cette valeur, nous avons pris dans des endroits différents plusieurs mesures sur le fil et sur les filaments (100 sur le fil et 125x3 sur les filaments).

2.2. Détermination de la masse surfacique

La masse surfacique d'un tricot est un paramètre important qui est souvent utilisé pour déterminer le coût et la qualité du tricot. La détermination de la masse surfacique est mesurée en utilisant la norme EN 12127 [139]. Un dispositif de découpe circulaire est utilisé pour découper des éprouvettes de forme circulaire dont la surface est égale à 100 cm². La masse de chaque éprouvette est mesurée à l'aide d'une balance numérique de précision 10⁻³. La masse en grammes par mètre carré (g/m²) est déterminée suivant l'équation (16).

$$M_S = m_e \times \frac{1000}{S} \quad (16)$$

Avec, M_S est la masse surfacique du tricot en g/m², m_e est la masse d'une éprouvette en g et S est la surface de l'éprouvette qui est égale à 100 cm².

2.3. Détermination de l'épaisseur

L'épaisseur du tricot est la distance entre la surface supérieure et la surface inférieure de la structure. Pour mesurer l'épaisseur, l'échantillon est placé entre deux plaques de référence qui exercent une pression connue sur l'échantillon. La distance entre les plaques est enregistrée en millimètres, et cette distance correspond à l'épaisseur de la structure tricotée [37].

Pour la détermination des épaisseurs nous avons utilisé le testeur de compression SiroFAST-1, présenté dans la Figure 22, en utilisant la norme ISO 5084 : 1996 [140].

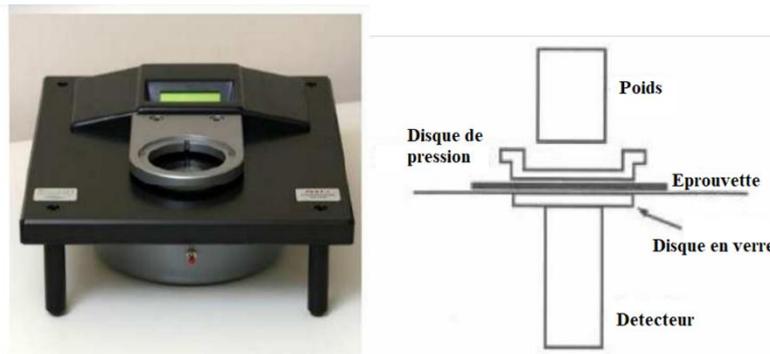


Figure 22 : Photo et schéma descriptif du testeur de compression SiroFAST-1.

2.4. Détermination de la densité des colonnes, des rangées et des mailles

Une rangée est une rangée horizontale de mailles produites par toutes les aiguilles adjacentes au cours d'un même cycle de tricotage. Un tricot est réalisé en faisant des rangées dans un ordre consécutif. Le nombre de mailles dans un parcours est égal au nombre d'aiguilles en fonction. Une colonne est une ligne verticale de mailles réalisées par la même aiguille dans des cycles de tricotage successifs. Le nombre total de colonnes d'un tricot est obtenu à partir du nombre total d'aiguilles utilisées. La densité des mailles est le nombre total de mailles dans une unité de surface. Elle est obtenue en multipliant le nombre de rangées et de colonnes par unité de longueur [131,133]. Le nombre de colonnes et de rangées par centimètre et le nombre de mailles par centimètre carré dans les tricots à maille cueillie sont calculés selon la norme EN 14971 [141].

2.5. Détermination de la longueur de fil absorbée et facteur de serrage

Les étoffes textiles tricotées sont des matrices formées par des boucles entrelacées, appelées mailles. La longueur de fil constituant une maille est nommée la longueur de fil absorbé (LFA). C'est un des paramètres qui caractérise une structure textile tricotée. C'est un facteur de contrôle de qualité important dans la production des tricots. Il a des impacts sur la densité des mailles, la masse surfacique, la longueur du panneau, le serrage, la largeur du tricot

et la stabilité dimensionnelle [19]. La LFA est mesurée par le démaillage du fil d'une rangée, qui est ensuite tendu en appliquant une tension appropriée sans étirage. La longueur du fil est ensuite mesurée pour obtenir la longueur de fil absorbée. Nous avons mesuré ce paramètre en utilisant un maille-mètre selon la norme EN 14970 [142]. La LFA obtenue est la longueur de fil absorbée par 100 mailles.

La valeur de la LFA obtenue sert à calculer le facteur de serrage (TF) des structures tricotées. Le facteur de serrage d'une structure tricotée est défini comme le rapport de la surface couverte par le fil dans une maille par rapport à la surface occupée par cette maille. L'expression de calcul de ce facteur est simplifiée en une équation qui dépend de la LFA et la densité linéaire du fil de tricotage [19,131,133,143].

$$TF = \frac{\sqrt{\text{Tex}}}{\text{LFA}} \quad (17)$$

Avec, Tex est le titre en tex du fil de tricotage et LFA est la longueur de fil absorbée.

Le facteur de serrage indique l'étendue de la surface du tricot couverte par le fil. C'est également une indication ou une mesure du relâchement ou du serrage relatif d'un tricot. Il indique le compactage de la structure tricotée. Le compactage est une propriété importante du tricot qui influence la durabilité, le toucher, la résistance, le drapé, la résistance à l'abrasion, le rétrécissement et la stabilité dimensionnelle. Il influence également les dimensions telles que la longueur, la largeur et l'épaisseur. Il est l'équivalent du facteur de couverture d'une structure tissée [19,131,133,143].

3. Évaluation des caractéristiques du confort vestimentaire

3.1. Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air est une caractéristique importante, elle permet de déterminer la quantité d'air qui traverse une étoffe textile [5,17,20].

La perméabilité à l'air est mesurée comme étant le débit d'air passant perpendiculairement à travers une zone bien définie sous un différentiel de pression d'air entre deux surfaces d'un matériau, elle est exprimée en mm/s.

Pour mesurer cette caractéristique, nous avons utilisé la norme ISO 9237-1995 [144] et l'appareil de mesure Textest FX 3300, présenté à la Figure 23. Le mode opératoire de cet essai consiste à placer un échantillon de tricot sur une surface de 20 cm² et de le faire traverser par de l'air à une pression de 100 Pa. La pression de l'air à la sortie (la perte de charge) permet d'évaluer la perméabilité de l'échantillon.



Figure 23: Testeur de perméabilité à l'air Textest FX 3300.

3.2. Résistance et perméabilité à la vapeur d'eau

La résistance ou la perméabilité à la vapeur d'eau est la résistance ou l'aptitude de l'étoffe textile à transporter l'humidité, sous forme de vapeur, à travers son épaisseur. La résistance à la vapeur d'eau est exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{Pa}/\text{W}$ et la perméabilité à la vapeur d'eau relative est exprimée en pourcentage (%) [20]. La perméabilité à la vapeur d'eau relative est le pourcentage de vapeur d'eau transmise à travers l'échantillon par rapport au pourcentage de vapeur d'eau transmise à travers une épaisseur d'air équivalente [17,20].

L'aptitude d'une étoffe textile à transmettre la vapeur d'eau peut être juger par de nombreuses méthodes comme la méthode par plat d'évaporation, la méthode de la plaque chauffante transpirante protégée et la méthode du mannequin transpirant. Dans cette étude, nous avons utilisé l'instrument PERMETEST SENSORA, illustré dans la Figure 24, conformément à la norme ISO 11092 [145]. L'instrument PERMETEST est également appelé modèle de la peau. C'est un instrument non-destructif qui simule la peau humaine sèche et humide en termes de sensation thermique, il sert à la détermination de la résistance thermique et la résistance à la vapeur d'eau et la perméabilité à la vapeur d'eau [146].

La surface externe de l'échantillon à tester est exposée à un flux d'air parallèle de vitesse réglable et l'autre côté de l'échantillon fait face à une couche humide poreuse (0,2 ml d'eau sont injectés dans la couche), qui simule le vêtement humidifié par la sueur liquide. Un espace de 1 mm entre l'échantillon et cette couche sépare les phases liquide et la vapeur de l'eau. Le principe de fonctionnement de l'instrument consiste à mesurer le flux de chaleur dynamique provoqué par l'évaporation de l'eau traversant l'éprouvette testée. Lorsque l'eau pénètre dans la tête de mesure, une certaine quantité de chaleur est perdue. Cet instrument mesure la perte de chaleur

de la tête de mesure due à l'évaporation de l'eau sans la présence de l'échantillon et tout en étant recouverte par l'échantillon [16–18].

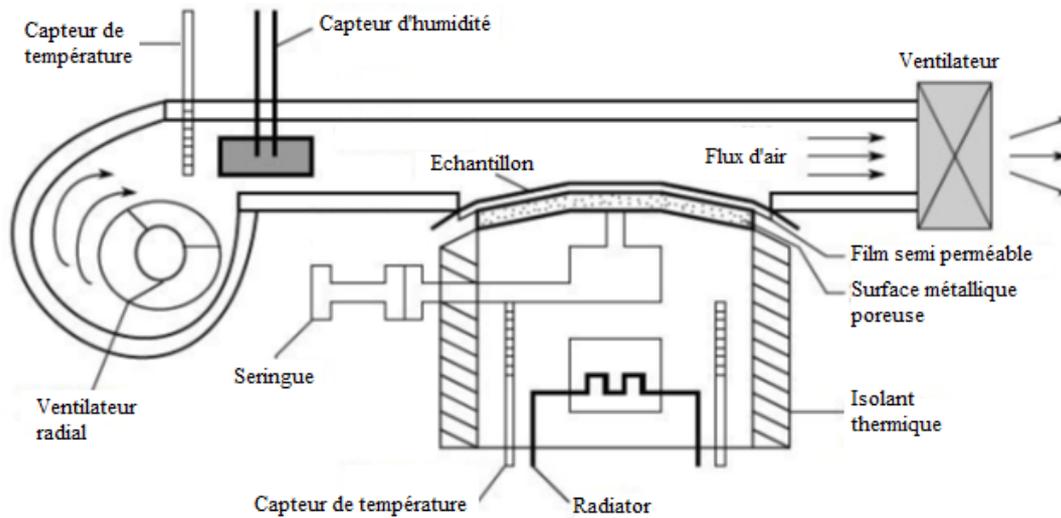


Figure 24: Représentation schématique du PERMETEST.

La perméabilité à la vapeur d'eau P_{wv} est calculée suivant l'équation suivante [65].

$$P_{wv} (\%) = \frac{u_s}{u_o} \times 100 \quad (18)$$

Avec, u_s est la perte de chaleur de la tête de mesure humide recouverte par l'échantillon et u_o est la perte de chaleur de la tête de mesure humide sans l'échantillon. Ces valeurs sont exprimées en $W.m^{-2}$. Pour la mesure de la résistance à la vapeur d'eau R_{et} , la relation suivante est appliquée.

$$R_{et} = (p_{sat,T} - p_{vap}) \left(\frac{1}{u_s} - \frac{1}{u_o} \right) = Z(100 - RH) \left(\frac{1}{u_s} - \frac{1}{u_o} \right) \quad (19)$$

Les valeurs des pressions partielles de vapeur d'eau $p_{sat,T}$ et p_{vap} en Pascals (Pa) dans cette équation représentent la pression partielle de vapeur d'eau saturée valable pour la température de l'air dans le laboratoire de mesure et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air du laboratoire. RH est l'humidité relative. Z est une constante qui est déterminée par la procédure d'étalonnage de l'appareil.

Le fonctionnement du PERMETEST nécessite l'utilisation d'un logiciel spécialement développé pour cette mesure. Après l'ajustement de l'appareil et l'ajout de l'eau distillée contenant 0,1 % de savon liquide utilisé pour le lavage des mains, un tissu en polypropylène hydrophobe est pris comme référence pour l'étalonnage de l'instrument.

3.3. Propriétés de gestion de l'humidité (Moisture Management)

La gestion de l'humidité d'une étoffe textile peut être définie comme le mouvement contrôlé de l'eau liquide (transpiration) de la surface de la peau vers l'atmosphère à travers la couche du textile. Un vêtement de sport, ayant une bonne gestion de l'humidité, empêche la transpiration de rester à la peau ou même à la surface intérieure du vêtement [54,136].

Dans cette étude, les propriétés de gestion de l'humidité ont été déterminées en utilisant l'appareil SDL-ATLAS Moisture Management Tester, présenté dans la Figure 25. Le test est effectué suivant la norme AATCC 195-2009 [147]. Cette norme présente une méthode d'essai pour la mesure, l'évaluation et la classification des propriétés de gestion de l'humidité des structures textiles [17].



Figure 25 : SDL-ATLAS Moisture Management Tester.

Le Moisture Management Tester (MMT) a été développé par l'Université polytechnique de Hong Kong et SDL Atlas Textile Testing Solutions pour déterminer les propriétés dynamiques de transport de liquide des structures textiles tricotées et tissées. Le moisture management tester utilise la technique de changement de la résistance électrique durant le transport de liquide, qui est basée sur la différence substantielle de conductivité électrique de l'air (étoffes non mouillés) et de l'eau (étoffes mouillés). Lorsque le liquide s'infiltré et/ou s'absorbe dans l'échantillon, la résistance électrique de l'échantillon diminue. La méthode du moisture management tester suppose que la valeur du changement de résistance électrique dépend de deux facteurs : la première est les composants de l'eau et la deuxième est la teneur en eau dans l'étoffe, ainsi lorsque l'influence des composants de l'eau est fixe, la résistance électrique mesurée n'est liée qu'à la teneur en eau de l'étoffe [37,148].

Le MMT est composé de capteurs d'humidité concentriques supérieurs et inférieurs. La quantité prédéfinie de solution saline (sueur simulée) est introduite sur la face intérieure de

l'échantillon, ce qui permet à la solution saline de se propager sur la surface extérieure à travers la couche textile.

Le Moisture Management Tester est conçu pour détecter, mesurer et enregistrer le comportement de transport de l'humidité du liquide dans plusieurs directions. Une série d'indices sont définis et calculés pour caractériser les performances de gestion de l'humidité liquide de l'éprouvette d'essai et sont présentées dans le Tableau 2 [43].

Tableau 2: Définition des propriétés de gestion de l'humidité.

<i>Indice</i>	<i>Définition</i>	<i>Unité</i>
Temps de mouillage (Endroit et envers)	Le temps pendant lequel les surfaces de l'échantillon commencent à être mouillées après le début de l'essai.	Secondes
Taux d'absorption (Endroit et envers)	La vitesse moyenne d'absorption du liquide lors du changement initial de la teneur en eau au cours d'un essai.	%/s
Rayon maximal mouillé (Endroit et envers)	C'est le plus grand rayon du cercle d'eau mesuré sur les surfaces.	Mm
La vitesse de propagation (Endroit et envers)	C'est le taux cumulé de mouillage de la surface depuis le centre de l'éprouvette jusqu'au rayon maximal mouillé.	mm/s
L'indice de transport unidirectionnelle cumulé (AOWT)	C'est la différence entre l'aire des courbes de teneur en liquide des surfaces supérieure et inférieure d'un échantillon par rapport au temps.	%
La capacité de gestion de l'humidité globale (OMMC)	C'est un indice de la capacité globale d'une étoffe à transporter le liquide. Il est calculé selon l'équation (20) en combinant trois attributs de performance mesurés : le taux d'absorption du liquide sur la surface inférieure (A), la capacité du transport unidirectionnel de liquide (B) et la vitesse de propagation du liquide sur la surface inférieure (F). $OMMC = 0.25A + 0.50B + 0.25F \quad (20)$	Sans unité

Sur la base de ces paramètres, le Moisture Management Tester distingue sept catégories d'étoffes : étoffe imperméable, étoffe absorbe et sèche rapidement, étoffe à absorption lente et à séchage lent, étoffe hydrofuge, étoffe à absorption rapide et séchage lent, étoffe perméable à l'eau, et enfin, étoffe de gestion de liquide. Chaque propriété de gestion de l'humidité peut être notée, de 1 à 5, selon sa valeur numérique. La Figure 26 présente la grille des notes propres à l'appareil Moisture Management Tester.

Index		Grade				
		1	2	3	4	5
Wetting Time(Sec)	Top	>=120 No Wetting	20-119 Slow	5~19 Medium	3~5 Fast	<3 Very fast
	Bottom	>=120 No Wetting	20-119 Slow	5~19 Medium	3~5 Fast	<3 Very fast
Absorption Rate(%/sec)	Top	0~10 Very slow	10~30 Slow	30~50 Medium	50~100 Fast	>100 Very fast
	Bottom	0~10 Very slow	10~30 Slow	30~50 Medium	50~100 Fast	>100 Very fast
Max Wetted Radius	Top	0~7 No Wetting	7~12 Small	12~17 Medum	17~22 Fast	>22 Very fast
	Bottom	0~7 No Wetting	7~12 Small	12~17 Medum	17~22 Fast	>22 Very fast
Spreading speed(mm/sec)	Top	0~1 Very slow	1~2 Slow	2~3 Medium	3~4 Fast	>4 Very fast
	Bottom	0~1 Very slow	1~2 Slow	2~3 Medium	3~4 Fast	>4 Very fast
One-way Transport Capacity		<-50 Very poor	-50~100 Poor	100~200 Good	200~400 Very Good	>400 Excellent
OMMC		0~0.2 Very poor	0.2~0.4 Poor	0.4~0.6 Good	0.6~0.8 Very Good	>0.8 Excellent

Figure 26: Grille des notes des propriétés de gestion de l'humidité.

3.4. Propriétés de transfert thermique

Les propriétés thermiques déterminées dans cette étude sont la conductivité thermique, la résistivité thermique et l'absorptivité thermique.

La conductivité thermique est une propriété intrinsèque du matériau qui indique sa capacité à conduire la chaleur [20,149]. C'est le flux de chaleur (énergie par unité de surface et par unité de temps) divisé par le gradient de température. La conductivité thermique est calculée à l'aide de l'expression suivante [150].

$$\lambda = \frac{Q \cdot t_h}{S \cdot \Delta T \cdot t} \quad (21)$$

- λ : La conductivité thermique (W/mK).
- Q : La quantité de chaleur conduite (J).
- S : La surface à travers laquelle la chaleur est conduite (m²).
- t : Le temps de conductivité (s).
- t_h : L'épaisseur de l'étoffe (m).
- ΔT : La baisse de température (K).

La résistivité thermique décrit l'aptitude d'un matériau à résister au flux de chaleur passant à travers son épaisseur [78]. La résistivité thermique d'une étoffe est le rapport de la différence de température entre les deux faces de la structure sur le débit de chaleur par unité de surface normale aux faces. Elle est analogue à la résistance électrique dans le cas d'un

passage de courant à travers un conducteur électrique [151]. La résistivité thermique peut être calculer avec l'équation suivante [152].

$$R_t = \frac{th}{\lambda} \quad (22)$$

- R_t : Résistivité thermique ($mK \cdot W^{-1} \cdot m^{-2}$).
- th : Épaisseur de la structure (m).
- λ : La conductivité thermique (W/mK).

L'absorptivité thermique caractérise la sensation thermique durant un bref contact de la peau humaine avec une surface textile. Elle est définie comme un brusque flux de chaleur qui se produit lorsque deux matériaux avec des températures différentes entrent en contact l'un avec l'autre. L'absorptivité thermique est calculée selon l'équation (23) ou elle peut être estimée en mesurant le taux initial de changement de température, plus le taux initial de changement de température est élevé, plus la fraîcheur au toucher est importante [17,138,153].

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c} \quad (23)$$

- b : L'absorptivité thermique ($Ws^{1/2}/m^2 K$).
- ρ : La densité (kg/m^3).
- λ : La conductivité thermique ($W/m K$).
- c : La chaleur spécifique ($J/kg K$).

Lorsque la peau entre en contact avec la surface interne du vêtement, qui est normalement à une température inférieure à celle de la peau, la chaleur est évacuée de la peau. La perte de chaleur provoque une chute de la température de la peau, qui est détectée par des thermorécepteurs sous-cutanés. Plus le débit du flux de chaleur est élevé, plus la chute de température à proximité des thermorécepteurs est rapide et plus la sensation de fraîcheur est importante. Le taux de changement de température, résultant du flux de chaleur de la peau vers le vêtement à une température plus faible lorsqu'il est mis en contact avec celui-ci, est déterminé par l'inertie thermique du matériau. L'inertie thermique est fonction de la densité, de la chaleur spécifique et de la conductivité thermique du matériau. Tout matériau capable d'absorber et de bien conduire la chaleur évacue facilement la chaleur de la peau et procure une sensation de fraîcheur, c'est-à-dire que plus l'inertie thermique est élevée, plus il est froid au toucher [17,24,35,148,154,155].

Dans cette étude, l'ALAMBETA est l'instrument utilisé pour mesurer les propriétés thermiques du confort vestimentaire. Cet instrument simule le flux de chaleur qui se transmet de la peau humaine à une étoffe textile lors d'un court contact. La caractéristique principale est un capteur unique qui mesure la chute thermique entre les surfaces d'une plaque non métallique très mince en utilisant un micro-thermocouple différentiel multiple [156]. Un schéma simplifié de l'ALAMBETA est présenté à la Figure 27.

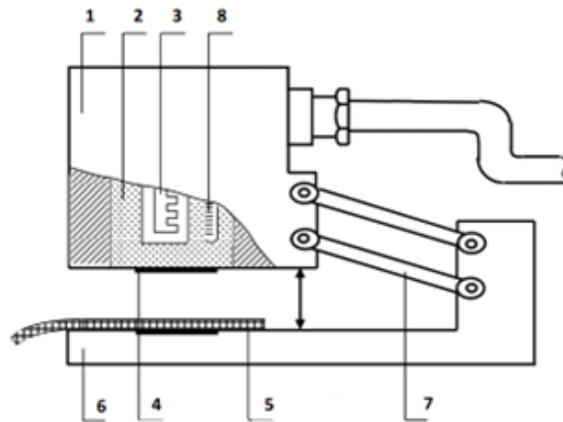


Figure 27 : Diagramme simplifié de l'instrument ALAMBETA.

La tête de mesure (1) contient un bloc de cuivre (2), qui est chauffé à 33 °C, simulant la température de la peau humaine au moyen d'un chauffage électrique (3). La température est contrôlée par un thermomètre (8) connecté au régulateur. La partie inférieure du bloc chauffé est équipée d'un capteur de flux thermique direct (4). Le capteur mesure la chute de température entre les surfaces d'une plaque non métallique très mince à l'aide d'un micro-thermocouple différentiel multiple. Avant la mesure, la tête est maintenue à une hauteur (H) au-dessus de la plaque de base (6) recouverte par l'échantillon (5). Le mécanisme (7) assure le mouvement correct de la tête de mesure. La pression de la tête sur le tissu peut être ajustée dans la plage de 100 à 1000 Pa et affecte sensiblement les résultats. La chaleur commence à circuler à travers l'échantillon, puis la température de surface de l'échantillon change soudainement et l'instrument enregistre l'évolution du flux thermique. Cette procédure est similaire à la mise du doigt sur un tissu à sélectionner. Simultanément l'épaisseur de l'échantillon est mesurée [157].

3.5. Méthodes de caractérisation du séchage

Le séchage est un mécanisme complexe mettant en jeu des phénomènes de transport de chaleur et de masse [86]. Le séchage d'un matériau textile est déclenché lorsque la teneur en humidité du textile est supérieure à l'humidité de l'atmosphère [108]. Le comportement de séchage du textile peut être estimé par la mesure du temps de séchage et/ou le calcul du taux de

séchage. Les propriétés du séchage des tricotés peuvent être déterminées suivant plusieurs méthodes expérimentales que nous allons présenter et comparer. La précision de ces différentes méthodes se base principalement sur la stabilité des conditions expérimentales (essentiellement la vitesse de l'air) et aussi sur les moyens de mesures. Il est ainsi important de vérifier la stabilité de la vitesse d'air.

3.5.1. Contrôle de la vitesse de l'air

Pour contrôler la vélocité de l'air passant sur la surface d'essai, nous avons utilisé un anémomètre, l'image de l'appareil est présentée dans la Figure 28.a. C'est un instrument qui sert à mesurer la vitesse instantanée, en mètre par seconde, d'un courant d'air. La Figure 28.b est un schéma approximatif du montage d'essai de l'expérience de séchage, les flèches indiquent les positions où l'anémomètre a été placé pour mesurer la vélocité d'air. Le contrôle de la vélocité d'air a été effectué avant chaque série de mesures. La vitesse de l'air passant, soit perpendiculairement ou parallèlement à la surface du textile, doit être inférieure ou égale à 0.1 m/s. Nous avons adopté cette condition en se référant à la norme ISO 17617 [45].

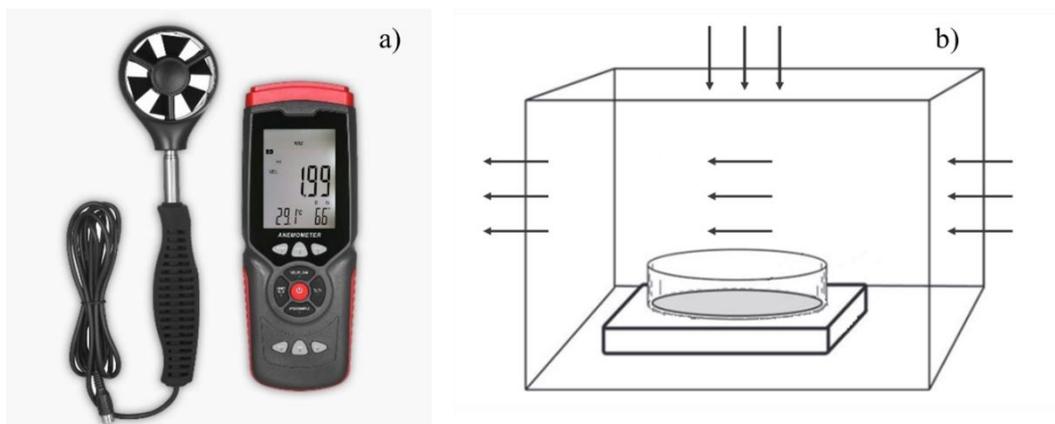


Figure 28: a) anémomètre, b) montage d'essai de l'expérience de séchage avec les flèches indiquant la direction du flux d'air.

3.5.2. Méthode de mesure du séchage selon la norme ISO 17617

La mesure du séchage selon la norme ISO 17617 consiste à suivre la perte de masse d'une goutte évaporée à partir d'une étoffe textile. Cette goutte de 0.1ml est déposée au fond d'une boîte de Pétri et sur laquelle on place un échantillon circulaire ayant une superficie de 113 cm². La variation de la masse de l'échantillon imbibé est enregistrée toutes les 5 minutes. Avant de réaliser l'essai, l'échantillon est conditionné dans une atmosphère standard pendant 24h. Durant l'essai une enceinte de 4 parois et sans plafond est utilisée et la vitesse de l'air doit être inférieure à 0.1 m/s.

La méthode de calcul du temps et du taux de séchage est décrite dans la norme ISO 17617 [45] comme suit. Tout d'abord, il faut calculer le pourcentage de perte d'eau en masse (L_t), selon l'équation (24) et dessiner le graphique $L_t=f(t)$. Ensuite, il faut déterminer la pente de la droite de régression de cette courbe a , ce qui représente le taux de séchage exprimé en (%/min).

$$L_t(\%) = \frac{M_0 - M_t}{M_D} \times 100 \quad (24)$$

Avec,

M_0 : la masse de l'éprouvette humide à $t=0$

M_D , qui est égale à $M_0 - M_{\text{sec}}$: la masse de la goutte d'eau.

M_{sec} : la masse sèche de l'éprouvette.

L'équation de la droite de régression a la forme suivante.

$$y = at + b \quad (25)$$

Avec, y est le pourcentage de perte d'eau en masse à l'instant t (min) et b est une constante. Le temps de séchage correspond à un pourcentage de perte d'eau en masse égale à 100%. Pour calculer ce temps, il faut remplacer y par 100 et trouver t .

3.5.3. Méthode de mesure du séchage utilisée par le partenaire industriel

Cette méthode est proche de celle de la norme ISO 17617 [45]. Les différences résident dans le fait d'utiliser des échantillons de surfaces plus petites que celle utilisée dans la norme et d'utiliser une quantité d'eau plus importante dans ce cas 200 mg. De plus, la boîte de Pétri est remplacée par une coupelle concave

3.5.4. Proposition d'une nouvelle méthode de calcul de la cinétique de séchage en utilisant le PERMETEST

Nous avons remarqué que la méthode gravimétrique de la détermination de la masse de la goutte évaporée en fonction du temps n'est pas précise vue la variation de la vitesse de l'air et la perturbation provoquée par la fermeture et l'ouverture des parois de l'enceinte. C'est pour cette raison que nous proposons une nouvelle méthode en se basant sur le principe de fonctionnement de l'appareil PERMETEST permettant de déterminer la résistance et la perméabilité à la vapeur d'eau relative. En effet sur le PERMETEST la vitesse de l'air est bien contrôlée (0,1 et 2 m/s). Le canal de circulation de l'air est bien isolé ce qui permet de contrôler

les propriétés de l'air en contact avec l'échantillon : température, humidité et vitesse. Encore, il n'y a aucune perturbation durant l'essai. L'essai de séchage s'effectue sans aucune perturbation externe.

Le PERMETEST est utilisé comme dispositif de mesure avec une modification de la démarche expérimentale pour pouvoir étudier la cinétique de l'évaporation de la goutte déposée sur la surface de l'étoffe. Pour y parvenir, il faut, bloquer le passage de la vapeur à travers la membrane semi-perméable et par la suite à travers l'étoffe textile. Dans notre cas, la membrane semi-perméable est remplacée par un film en plastique non perméable à l'eau ni à la vapeur d'eau. La modification apportée consiste à placer un film en cellophane à la place de la membrane semi-perméable sur la tête de mesure. La masse de la goutte d'eau utilisée est de 200 ± 2 mg. La Figure 29 illustre l'emplacement du film en cellophane sur la tête de mesure.

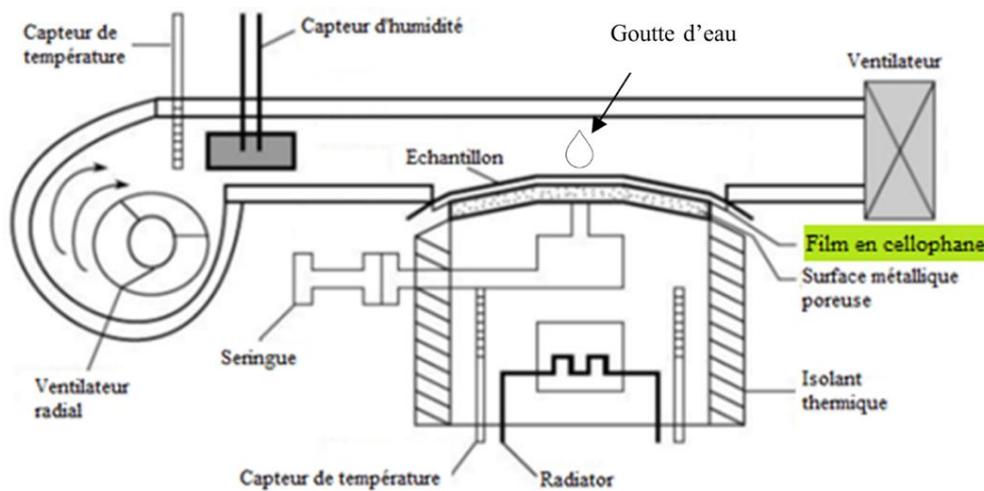


Figure 29: Schéma descriptif de la nouvelle configuration du PERMETEST pour étudier la cinétique de séchage d'une goutte

Les conditions standards pour mesurer la résistance à l'évaporation par la méthode de la plaque chauffante sont les suivantes, $T = 35^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ et $\text{RH} = 40\% \pm 3\%$. Dans d'autres conditions de mesure, la température peut être modifiée. Dans notre cas, nous déterminons la résistance à la vapeur d'eau dans les conditions d'essai ambiantes à l'aide du PERMETEST.

En se basant sur le principe de mesure du dispositif "Hot plate" et selon la norme ISO 11092 [158], un modèle de la résistance à la vapeur d'eau et en utilisant des paramètres structuraux faciles à mesurer, le modèle a été développé.

Selon la norme ISO 11092 [158], à l'équilibre la résistance à l'évaporation (R_{et}) est déterminée comme suit :

$$R_{et} = \frac{(P_{sat,T} - P_{vap})S}{H - \Delta H} - R_{et0} \quad (26)$$

Avec :

- $P_{sat,T}$: La pression partielle de la vapeur d'eau saturée à la surface de l'unité de mesure dans des conditions d'essai [Pa].
- P_{vap} : La pression partielle de la vapeur d'eau de l'air dans les conditions d'essai [Pa],
- S : La surface de l'échantillon [m²].
- H : le flux thermique permettant de garder une température constante à la surface de la tête de mesure [W].
- ΔH : Le terme de correction du flux thermique déterminé par étalonnage de l'appareil [W].

Le PERMETEST détermine (R_{et0}) d'une membrane semi-perméable qui simule la peau humaine. Sans échantillon textile, la résistance à la vapeur d'eau de la membrane semi-perméable (R_{et0}) est :

$$R_{et0} = \frac{(P_{sat,T} - P_{vap})S}{H_0 - \Delta H_0} \quad (27)$$

La puissance de chauffage (P) nécessaire pour maintenir une température de surface de plaque constante est :

$$\frac{P}{S} = \frac{H - \Delta H}{S} \quad (28)$$

En se basant sur les conditions de continuité et le principe de conservation de la masse : le flux de chauffage fourni par la plaque chauffante est égal au flux d'évaporation (flux de refroidissement) et nous avons :

$$\frac{P}{S} = L_{H_2O} \phi_{m0} \quad (29)$$

Avec :

- L_{H_2O} : chaleur latente d'évaporation de l'eau [J/kg],
- ϕ_{m0} : débit massique évaporé à l'équilibre [kg/m²s].

En combinant les équations (27), (28) et (29) nous obtenons :

$$R_{et0} = \frac{(P_{sat,T} - P_{vap})}{L_{H_2O} \phi_{m0}} \quad (30)$$

Selon la première loi de Fick, à l'équilibre, le flux massique de vapeur d'eau à travers la membrane perméable à la vapeur d'eau est :

$$\phi_{m0} = D_{0,T} M_{H_2O} \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad (31)$$

Avec :

- $D_{0,T}$: Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à travers la membrane perméable à la vapeur d'eau à la température d'essai [m^2/s],
- M_{H_2O} : masse moléculaire de l'eau ($18.015 \cdot 10^{-3} \text{kg/mol}$),
- ΔC : différence de concentration [mol/m^3],
- X : coordonnées spatiales de la concentration molaire [m].

Comme il est cité par Fourt and Harris [159] , la différence de concentration (ΔC) peut être obtenue par la relation suivante :

$$\Delta C = \frac{\Delta P_{vap}}{RT_{test}} \quad (32)$$

Avec :

- $\Delta P_{vap} = P_{sat,T} - P_{vap}$: différence de pression de la vapeur d'eau [Pa],
- R : constante des gaz ($8.315 \cdot 10^3 \text{J/Kmol} \cdot \text{°K}$),
- T_{test} : Température absolue pendant le test [°K].

Ainsi, le flux massique de la vapeur d'eau lors de l'évaporation de la membrane semi-perméable est donné par l'expression suivante :

$$\phi_{m0} = \frac{D_{0,T}}{t_{h0}} \frac{P_{sat,T} - P_{vap}}{R_{H_2O} T_{test}} \quad (33)$$

Avec :

- $R_{H_2O} = R/M_{H_2O}$: Constante spécifique de la vapeur d'eau ($461.5 \text{J/(kg} \cdot \text{°K)}$),
- t_{h0} : épaisseur de la membrane semi-perméable [m].

En remplaçant l'expression du débit massique (ϕ_{m0}) dans l'équation (30), nous obtenons l'expression suivante :

$$R_{et0} = \frac{t_{h0}}{D_{0,T}} \frac{R_{H_2O} T_{test}}{L_{H_2O}} \quad (34)$$

Par analogie :

$$R_{et} = \frac{t_{h0} + t_{hs}}{D_{Total,T}} \frac{R_{H_2O} T_{test}}{L_{H_2O}} - R_{et0} \quad (35)$$

On remarque que le système est en série. La résistance à la vapeur d'eau de la membrane (R_{et0}) représente l'action d'étalonnage effectuée au début des mesures (sans échantillon). Le système (membrane semi-perméable et échantillon) est en série. Il faut donc noter que :

$$\frac{t_{h0} + t_{hs}}{D_{Total,T}} = \frac{t_{hs}}{D_{sample,T}} + \frac{t_{h0}}{D_{0,T}} \quad (36)$$

Avec :

- t_{hs} : épaisseur de l'échantillon [m],
- $D_{Total,T}$: Coefficient de diffusion total à la température d'essai [m^2/s],
- $D_{sample,T}$: Coefficient de diffusion à travers l'échantillon à la température d'essai [m^2/s].

Ainsi, l'équation (35) conduit à :

$$R_{et} = \frac{R_{H_2O} T_{test}}{L_{H_2O}} \left(\frac{t_{hs}}{D_{sample,T}} + \frac{t_{h0}}{D_{0,T}} \right) - R_{et0} \quad (37)$$

En couvrant la tête de mesure par un film en cellophane, la seule source d'évaporation est celle de la goutte déposée sur l'échantillon et en contact avec l'air. Ainsi, $R_{et0} = 0$. Il n'y pas de transmission de la vapeur d'eau sans échantillon et le flux de chaleur sera toujours maintenu à 100 W qui est la valeur fixée lors de l'étalonnage de PERMETEST.

La Figure 30 illustre la stabilité du flux thermique sans échantillon (présentant une peau nue et non perméable à la vapeur d'eau) et celui avec échantillon sec et conditionné 24 heures dans les conditions d'essai et sans goutte déposée à sa surface.

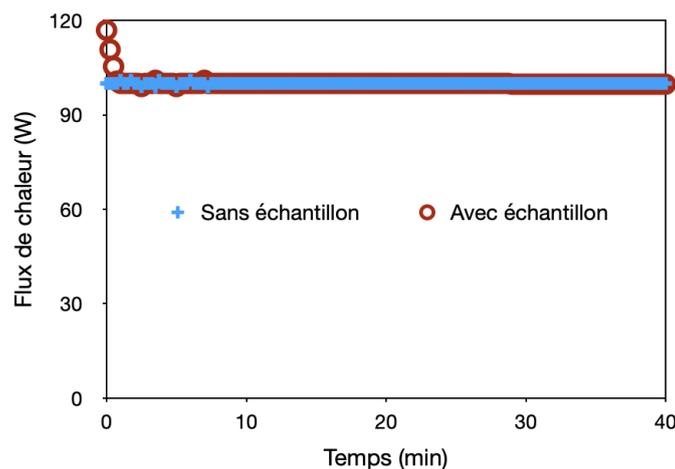


Figure 30: Évolution de flux de chaleur sans échantillon et avec échantillon.

On constate que ce flux est stable avec une valeur moyenne de l'ordre de 100 W sans échantillon et de 100.14 W avec échantillon avec des coefficients de variation respectivement

égal à 0.22 % et à 1.65 %. Il est à noter qu'aux premiers instants le flux de chaleur après le dépôt de l'échantillon sur la tête de mesure est supérieur à 100 W en commençant par une valeur de 116 W et il se stabilise par la suite à une valeur de 100 W à partir de 45 secondes. Cette fluctuation est causée par l'ouverture du couvercle de la tête de mesure pour la mise en place de l'échantillon ce qui provoque une variation des condition climatiques dans le canal d'air.

Ainsi l'équation (37) est réduite à :

$$R_{et} = \frac{t_{hs}}{D_{sample,T}} \frac{R_{H_2O} T_{test}}{L_{H_2O}} \quad (38)$$

L'équation (38) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\frac{t_{hs}}{D_{sample,T}} = \frac{L_{H_2O}}{R_{H_2O} T_{test}} R_{et} \quad (39)$$

Dans les milieux poreux tels que les étoffes textiles avec une porosité (ε) et une tortuosité (τ), le coefficient de diffusion effective de la vapeur d'eau est :

$$D_{sample,T} = D_{air,T} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (40)$$

$D_{air,T}$ est le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air à la température d'essai. Donc par analogie l'équation (33) devient :

$$\phi_{m_{sample,T_{test}}} = \frac{D_{sample,T_{test}}}{t_{hs}} \frac{P_{sat,T_{test}} - P_{vap}}{R_{H_2O} T_{test}} \quad (41)$$

En remplaçant l'expression du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau donnée par l'équation (40) dans l'équation (41) on obtient :

$$\phi_{m_{sample,T_{test}}} = \frac{\varepsilon D_{air,T_{test}}}{\tau} \frac{P_{sat,T_{test}} - P_{vap}}{t_{hs} R_{H_2O} T_{test}} \quad (42)$$

En utilisant l'équation (27), on obtient le flux d'évaporation massique d'une goutte comme suit :

$$\phi_{m_{sample,T_{test}}} = \frac{\varepsilon D_{air,T_{test}}}{\tau} \frac{P(P_{sat,T_{test}} - P_{vap})}{t_{hs} L_{H_2O} R_{H_2O} T_{test}} \quad (43)$$

Il est à rappeler que P [W] est le flux thermique de refroidissement. Ce modèle tient compte des paramètres physiques et géométriques (épaisseur, tortuosité et porosité totale) et également des paramètres liés aux conditions d'essai (température et humidité).

La Figure 31 illustre la cinétique de la masse d'une goutte d'eau selon la nouvelle méthode proposée en utilisant les flux thermiques enregistrés par l'appareil PERMETEST.

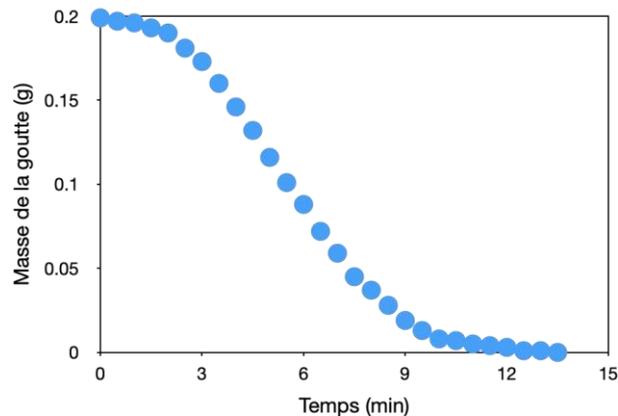


Figure 31: Exemple de l'évolution de la masse d'une goutte d'eau en fonction du temps suivant la nouvelle méthode utilisant le PERMETEST

3.5.5. Comparaison entre les différentes méthodes et méthodes adoptées

Nous avons à notre disposition trois méthodes expérimentales. La première est la méthode de la norme ISO 17617 [45], la deuxième est une procédure d'essai interne propre aux clients de **VTL** et la troisième est celle qu'on vient de développer à partir du PERMETEST. Le mode opératoire et l'appareillage des deux premières méthodes sont similaires. Les différences entre les trois méthodes expérimentales sont résumées dans le Tableau 3. La dernière colonne présente la méthode adoptée dans cette étude pour réaliser les essais de séchage.

Il est à noter que, pour mesurer la cinétique de séchage des tricots développés dans ce travail de recherche, nous avons utilisé la méthode dite adoptée qui a été validée par les clients du partenaire industriel et la méthode que nous avons développée utilisant l'appareil PERMETEST.

Tableau 3: Comparaison entre les deux normes et la méthode adoptée.

<i>Points de différences</i>	<i>ISO 17617</i>	<i>Méthode interne</i>	<i>Méthode du PERMETEST</i>	<i>Méthode adoptée</i>
Goutte d'eau	Volume = 0.1 ±0.01 ml	Masse = 200 ±2 mg	Masse = 200 ±2 mg	Masse = 200 ±2 mg
Taille de l'échantillon	Circulaire de surface égale à 113 cm ²	Circulaire de surface égale à 100 cm ²	Circulaire de surface égale à 100 cm ²	Circulaire de surface égale à 100 cm ²
Nombre d'échantillon	3	1	3	3
Enceinte durant l'essai	4 Parois et sans plafond	2 parois (avant et arrière)	Canal de ventilation à vitesse d'air 0 m/s	2 parois (avant et arrière)
Enceinte durant l'enregistrement	4 Parois et sans plafond	4 parois + plafond		4 parois + plafond
Boite	Boite de pétri d'hauteur intérieur de 20 mm	Coupelle	Sans boite	Coupelle
Conditionnement	Placer l'échantillon dans une atmosphère standard avant le test pendant 24h.	Placer l'échantillon dans une atmosphère standard avant le test pendant 4 h minimum.	Placer l'échantillon dans une atmosphère standard avant le test pendant 24h.	Placer l'échantillon dans une atmosphère standard avant le test pendant 24h.
Vitesse de l'air	<= 0.1 m/s	Non mentionnée	0 m/s	<= 0.1 m/s
Intervalle d'enregistrement du poids	Chaque 5 min	Chaque 2 min	30 s	Chaque 2 min
Condition(s) d'achèvement	- Jusqu'à 60 min. - Jusqu'à ce que la masse de l'eau résiduelle descende en dessous de 10 % de la masse initiale.	Jusqu'à ce que le poids de l'éprouvette soit égal à son poids initial M_s	Jusqu'au poids de l'éprouvette soit égale à son poids initiale M_s .	Jusqu'à ce que le poids de l'éprouvette soit égal à son poids initial M_s
Temps de séchage (100%)	Calculé par régression linéaire	Le temps quand l'échantillon revient à l'état initial	Le temps quand l'échantillon revient à l'état initial	Calculé par régression linéaire
Taux de séchage	Calculé par régression linéaire	Non mentionné	Calculé par régression linéaire	Calculé par régression linéaire
Essai préliminaire d'absorbance	Les échantillons doivent avoir un temps d'absorbance <= 60 s.	Pas de condition de validation	Pas de condition de validation	Pas de condition de validation

4. Outils d'analyse statistique

L'évaluation statistique des données obtenues est effectuée avec le logiciel MINITAB. Une analyse de variance (ANOVA) à un et à deux facteurs a été réalisée pour examiner la différence significative des variations des propriétés de confort vestimentaire. Des

comparaisons multiples avec le test post-hoc de Tukey « Honestly Significant Difference » ont été effectuées pour préciser où se situe la différence significative au sein des groupes [160]. Pour étudier l'effet des cycles de lavage domestique sur les propriétés de confort des vêtements, un test t apparié a été utilisé. Pour analyser les relations entre les propriétés et leur corrélation avec les caractéristiques structurelles des tissus tricotés, une analyse de corrélation de Pearson a été effectuée.

4.1. ANOVA

Dans le domaine de l'analyse statistique, l'analyse de la variance (ANOVA) constitue une technique fondamentale pour comparer les moyennes de plusieurs échantillons. Cet outil puissant permet aux chercheurs de découvrir des différences significatives entre les groupes, mettant ainsi en évidence les relations complexes entre les variables de réponse numériques et une variable explicative. L'ANOVA est une technique statistique essentielle pour comparer les moyennes entre plusieurs groupes indépendants et comprendre la variabilité des données. L'objectif principal est de déterminer si les différences observées dans les moyennes de l'échantillon sont statistiquement significatives ou si elles peuvent être le résultat du hasard [161–163].

L'ANOVA divise la variabilité totale des données en deux composantes : la variabilité entre les groupes et la variabilité au sein des groupes. L'hypothèse nulle (H_0) stipule que toutes les moyennes de groupe sont égales, tandis que l'hypothèse alternative (H_1) suggère qu'au moins une moyenne du groupe est différente.

L'ANOVA à deux facteurs évalue l'impact de deux facteurs indépendants sur une variable dépendante et examine s'il existe un effet d'interaction entre les facteurs. Cette analyse est particulièrement utile lorsqu'on souhaite comprendre non seulement les principaux effets de chaque facteur, mais également la manière dont les facteurs interagissent les uns avec les autres. L'effet d'interaction révèle si l'effet d'une variable indépendante dépend du niveau de l'autre variable [164].

L'interprétation des résultats de l'ANOVA implique l'examen de la valeur de F et de sa valeur p associée. Si la valeur p est inférieure au niveau de signification choisi (généralement 0,05), l'hypothèse nulle est rejetée, indiquant qu'au moins une moyenne de groupe est significativement différente des autres. Les effets principaux significatifs indiquent que les variables indépendantes ont un impact significatif sur la réponse. Un effet d'interaction significatif suggère que l'effet d'une variable indépendante dépend du niveau de l'autre variable.

Dans le cas d'un résultat significatif de l'analyse de la variance, des tests post-hoc, tels que le test de TUKEY « Honestly Significant Difference », peuvent être utilisés pour déterminer quels groupes spécifiques diffèrent de manière significative.

4.2. Post Hoc test (TUKEY HSD)

Lorsque l'ANOVA indique des différences significatives, des tests post-hoc sont effectués pour identifier les groupes spécifiques qui diffèrent les uns des autres. Ces tests contrôlent les erreurs de type I, qui peuvent survenir lorsque plusieurs comparaisons sont effectuées [165,166].

Plus précisément, un test post hoc est un test statistique de suivi qui est effectué après qu'une comparaison de plus de deux groupes montre un résultat significatif (indiquant qu'il existe des différences entre les groupes). Si une ANOVA révèle un effet significatif pour une variable indépendante comportant plus de deux niveaux, il est plus intéressant de continuer et d'effectuer des tests supplémentaires pour identifier où ces différences se produisent. L'effet principal significatif indique qu'il existe une différence entre au moins deux moyennes des trois groupes, mais il n'indique pas quelles moyennes diffèrent de quelles moyennes. Pour identifier les moyennes qui diffèrent de manière significative, on a recours à utiliser des tests post-hoc (par exemple, le groupe 1 diffère-t-il du groupe 2 ou du groupe 3, le groupe 2 et le groupe 3 diffèrent-ils). Ainsi, le test post hoc est un moyen de déterminer où se situe la différence significative et entre quels groupes ou tests [166].

Il existe une variété de tests post hoc. Ils sont conçus pour contrôler le taux d'erreur en raison du grand nombre de comparaisons différentes effectuées. Cependant, ils diffèrent par le degré de contrôle qu'ils exercent sur le taux d'erreur. Il n'y a pas de consensus sur où et quand appliquer les différentes mesures. Une recommandation raisonnable consiste à effectuer une série de tests post hoc. Là où ils aboutissent tous aux mêmes conclusions, il n'y a clairement aucun problème. S'ils aboutissent à des conclusions très différentes pour un ensemble de données particulier, il convient alors d'en évaluer les raisons et l'importance. Certains tests post-hoc les plus couramment utilisés sont la différence la moins significative de FISHER, l'ajustement de BONFERRONI, le test de NEWMAN-KEULS, le nouveau test à plages multiples de DUNCAN, le test de TUKEY, le test de DUNNETT et le test de SCHEFFE [161,167].

La méthode de TUKEY permet, dans l'ANOVA, de créer des intervalles de confiance pour toutes les différences deux à deux entre les moyennes des niveaux de facteurs, tout en contrôlant le taux d'erreur à un niveau spécifié. Lorsque des comparaisons multiples sont

effectuées, il est important de prendre en considération le « FAMILYWISE ERROR RATE » car le risque de faire une erreur de 1^{er} type lors d'une série de comparaisons est plus élevé que le taux d'erreur de chacune des comparaisons individuelles. Pour contrecarrer ce taux d'erreur plus élevé, le test HSD de Tukey contrôle le taux d'erreur global dans toutes les comparaisons par paires, garantissant que le « FAMILYWISE ERROR RATE » (la probabilité de commettre au moins une erreur de type I dans l'une des comparaisons) ne dépasse pas le seuil de signification choisi. Il y parvient en utilisant la statistique de STUDENT pour calculer une valeur critique (HSD) qui représente le seuil de signification. Si la différence absolue entre les moyennes de deux groupes dépasse la valeur HSD, la différence est considérée comme statistiquement significative [163].

La principale différence entre le test Honestly Significant Difference (HSD) de TUKEY et les autres tests post-hoc réside dans la manière dont ils contrôlent l'erreur de type I (la probabilité de rejeter à tort une véritable hypothèse nulle) lors de comparaisons multiples.

Avantages :

- Maintient le niveau de signification global dans toutes les comparaisons.
- Fournit un seuil clair de signification.
- Applicable à n'importe quel nombre de comparaisons de groupes.

Limites :

- Suppose des écarts égaux entre les groupes.
- Peut-être moins puissant que d'autres tests post hoc pour détecter de petites différences.

4.3. Le T-test

Le t-test est utilisé pour comparer les moyennes de deux groupes. Il existe deux types principaux : le t-test pour échantillons indépendants et le t-test pour échantillons appariés. Ces tests partagent deux choses en commun. Premièrement, ils testent tous deux l'égalité des moyennes. Deuxièmement, ils s'appuient tous deux sur la distribution de student pour produire les probabilités utilisées pour tester la signification statistique. Cependant, ces deux types de tests sont en réalité très différents [168].

Un t-test pour échantillons indépendants peut comparer les résultats moyens aux tests des élèves enseignés à l'aide de deux méthodes différentes. Si la valeur t calculée est supérieure à la valeur t critique, cela indique que la différence entre les moyennes des deux groupes est statistiquement significative au niveau alpha spécifié.

Le test t pour échantillons appariés compare les moyennes de deux groupes apparentés, comme les mesures prises avant et après un traitement sur les mêmes sujets. L'hypothèse nulle (H_0) ne postule aucune différence de moyenne, tandis que l'hypothèse alternative (H_1) suggère une différence. Un test t pour échantillons appariés peut évaluer si un programme de formation améliore de manière significative les performances des employés en comparant leurs scores avant et après le programme. Un résultat significatif indique qu'il existe une différence statistiquement significative entre les moyennes des échantillons appariés.²

4.4. PEARSON corrélation

L'analyse de régression de PEARSON évalue la relation linéaire entre deux variables continues. Il s'agit d'une statistique paramétrique qui indique la force et la direction de la relation entre deux variables continues (c'est-à-dire mesurées sur une échelle d'intervalle ou de ratio). En évaluant dans quelle mesure deux variables covarient (c'est-à-dire varient l'une par rapport à l'autre), le coefficient de corrélation produit-moment de PEARSON détermine le degré auquel une relation linéaire existe entre les variables. Une variable (généralement désignée comme variable X) est appelée variable indépendante ou prédicteur et une autre variable, appelée variable dépendante ou critère, est généralement désignée comme variable Y. Le degré de précision avec lequel un chercheur est capable de prédire le score d'un sujet sur la variable critère à partir du score du sujet sur la variable prédictive dépend de la force de la relation linéaire entre les deux variables [162].

Le coefficient de corrélation de Pearson varie de -1 à 1, où -1 indique une relation linéaire négative parfaite, 0 indique aucune relation linéaire et 1 indique une relation linéaire positive parfaite. Un coefficient de corrélation de Pearson dont la valeur est comprise entre 0,7 et 0,9 indique la forte corrélation entre les variables. Les variables modérément associées ont un coefficient de corrélation de Pearson d'une ampleur comprise entre 0,5 et 0,7.

L'analyse de régression tente d'expliquer les données (les scores des variables dépendantes) en termes d'un ensemble de variables indépendantes ou de prédicteurs (le modèle) et d'une composante résiduelle (l'erreur). Généralement, un chercheur qui applique la régression s'intéresse à prédire une variable dépendante quantitative à partir d'une ou plusieurs variables indépendantes quantitatives, et à déterminer la contribution relative de chaque variable indépendante à la prédiction : il s'intéresse à quelle proportion de la variation de la variable dépendante peut être attribuée à la variation de la ou des variables indépendantes [162].

5. Processus de fabrication et Matière utilisée

Le processus général de fabrication des supports textiles tricotés au sein de **VTL** est présenté dans le logigramme de la Figure 32.



Figure 32: Étapes de fabrication des échantillons.

5.1. Tricotage

Pour la fabrication des échantillons objet de cette étude, nous avons utilisé la même machine de tricotage. Il s'agit d'une machine circulaire à simple fonture de la marque **ORIZIO®**. Le diamètre du cylindre est de 30 pouces. La jauge (E) est égale à 28, le nombre de chute est égal à 72 et le nombre d'aiguilles est de 2582.

5.2. Teinture et blanchiment

Après le tricotage, le tube tricoté subit soit une teinture, soit un blanchiment dans le cas où la couleur finale est le blanc. Pour cette étude nous avons fabriqué des échantillons dans la couleur blanche, jaune et noire. Les cycles de blanchiment et de la teinture de la couleur jaune et noire sont présentés respectivement dans les Figure 33, Figure 34 et Figure 35.

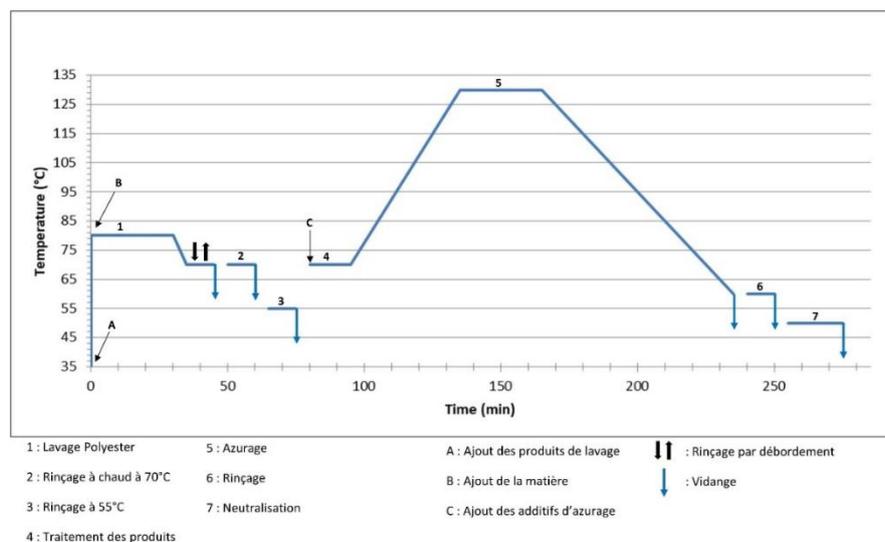


Figure 33: Cycle de blanchiment

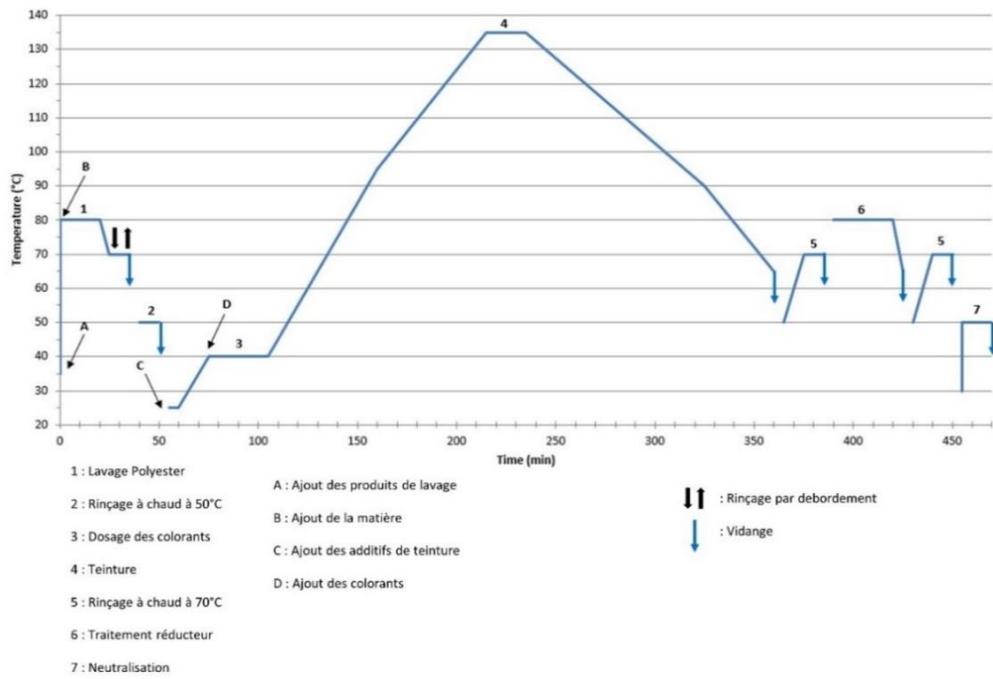


Figure 34: Cycle de la teinture de la couleur jaune

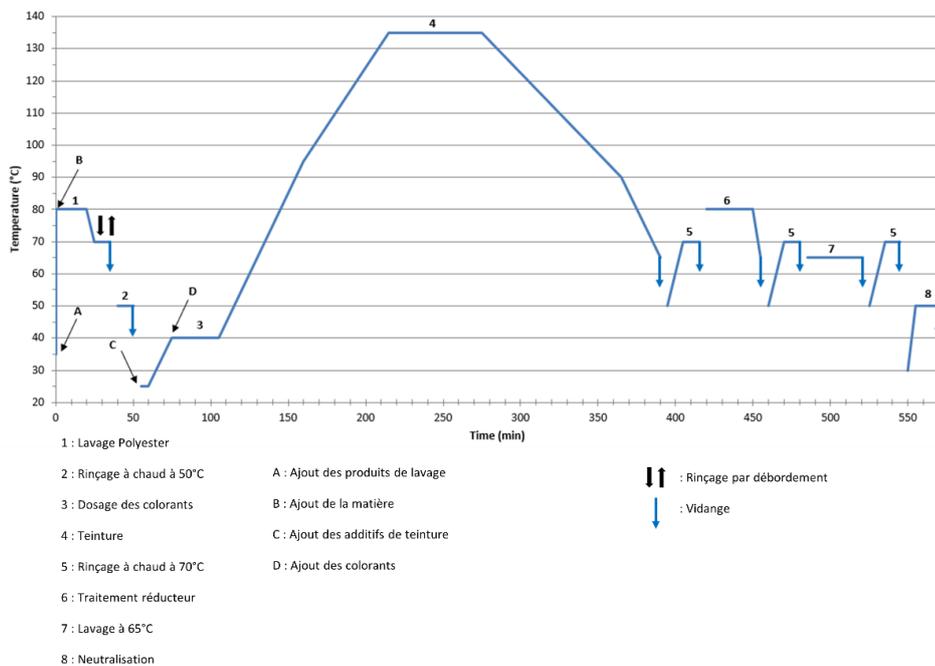


Figure 35: Cycle de teinture de la couleur noir

Les colorants dispersés ont été employés pour la teinture avec un rapport de bain égal à 1/10. Ces traitements ont été effectués dans une petite machine de teinture « Jigger » conçue pour les études en laboratoire, d'une capacité maximale de 25 kilogrammes. Ensuite, les tubes blanchis ou teints passent par l'opération d'exprimage et d'ouvraison.

5.3. Traitements de finissage par foulardage

Le traitement de finissage par foulardage est appliqué, il s'agit d'un traitement pour rendre les tricots plus hydrophiles. Le composant chimique introduit dans ce traitement est l'ULTRAPHIL TG. C'est un produit non ionique constitué d'une dispersion d'un polymère hydrophile, il est composé de polyuréthane et une émulsion du Polysiloxane. Il est utilisé pour les tricots 100 % Polyester et les mélanges en polyester avec les fibres cellulosiques. Ce produit confère aux tricots des propriétés d'hydrophilie, de douceur, d'antistatique et la capacité de libérer facilement les salissures. La Figure 36 illustre le processus de finissage utilisé.

Le traitement de finissage par foulardage est effectué dans une machine RAME, avant le thermo fixation. Le tricot est imprégné à une vitesse égale à 20 m/min dans un bain contenant 50 g/l de l'agent hydrophile. Le bain est maintenu à une température égale à 20°C et un pH égal à 4.5. Le tricot passe ensuite entre deux rouleaux d'exprimage pour que le produit pénètre dans la structure et que l'excès de liquide soit éliminé. Le taux d'exprimage est contrôlé approximativement à 50 %. Après l'exprimage, le tricot est convoyé à des chambres de vapeur chaudes pour le séchage et la thermo fixation. La température des chambres est contrôlée entre 120°C et 130°C.

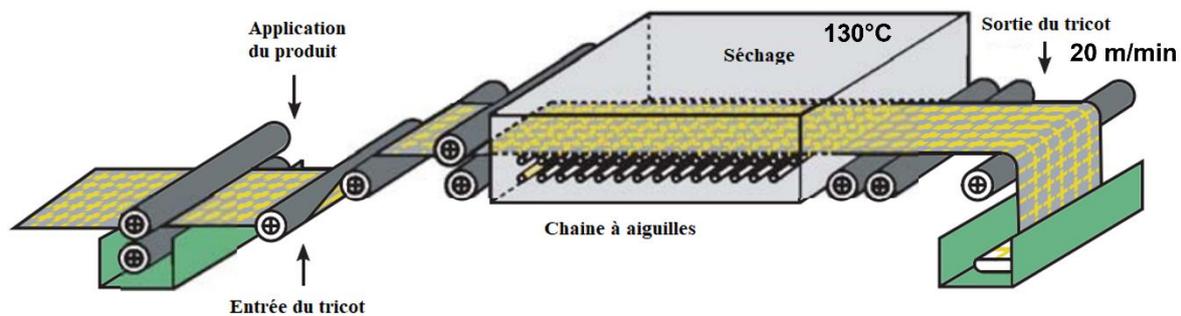


Figure 36: Schéma explicatif du principe de fonctionnement de la machine RAME.

5.4. Traitements de finissage par épuisement

Une deuxième technique de finissage a été utilisée. Il s'agit de la technique par épuisement. Après la dernière étape de teinture ou blanchiment, l'eau est vidée de la machine de teinture. La solution contenant l'agent hydrophile « Ultraphil TG » est injectée dans le bain avec la matière textile en mouvement. Les détails techniques du traitement sont spécifiés dans le Tableau 4. Après le traitement, la matière est transportée pour l'exprimage, l'ouvraison et le séchage et la thermo fixation sur la RAME. La vitesse de passage et la température des chambres chaudes sont les mêmes que celles du traitement par foulardage.

Tableau 4: Détails techniques du traitement de finissage par épuisement.

<i>Nom du produit</i>	ULTRAPHIL TG
<i>Concentration</i>	2.5 %
<i>pH</i>	4.5
<i>Température</i>	40 °C
<i>Durée</i>	20 min

La technique de finissage généralement appliquée par notre partenaire industriel est le finissage par foulardage. Cette méthode nécessite moins d'énergie et d'eau. Encore, la méthode de foulardage est plus rapide. Cependant, l'application de l'agent chimique par foulardage peut entraîner une distribution non uniforme de l'agent hydrophile. L'application par épuisement offre une distribution plus uniforme du produit sur l'étoffe et une bonne fixation et pénétration de l'agent hydrophile.

L'application de l'agent hydrophile par épuisement peut offrir à la matière textile meilleure fixation de l'agent hydrophile, ce qui peut engendrer une amélioration du temps de séchage et des autres propriétés du confort vestimentaire.

5.5. Lavage domestique

Afin de garantir la conservation des fonctionnalités du produit final après utilisation. Nous proposons d'étudier les paramètres de confort après cinq (5) cycles de lavage domestique. Le cycle de lavage domestique consiste en un lavage dans une machine de type lave-linge domestique et un séchage dans une machine de séchage équipé d'un tambour rotatif. Les détails du cycle de lavage et séchage sont indiqués dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Détails sur le cycle de lavage domestique

	<i>Lavage</i>	<i>Séchage</i>
<i>Constituants</i>	Détergent + Masse	Masse
<i>Température</i>	40 °C	60 °C
<i>Durée</i>	60 min	30 min
<i>Vitesse</i>	-	800 tr/min

5.6. Matières textiles utilisées

Les fils de tricotage les plus utilisés par notre partenaire (VTL) dans les supports destinés pour la fabrication des vêtements de sport sont les fils en polyester. Depuis les années 1950, la production mondiale de cette fibre n'a cessé de croître. Initialement destiné à des usages domestiques, le polyester s'est progressivement imposé dans l'industrie du vêtement de sport, en grande partie grâce à ses propriétés et à son faible coût [169].

Le polyester est un terme utilisé pour les polymères à longue chaîne chimiquement composés d'au moins 85% en poids d'un ester, qui est un sel organique formé à partir de la réaction entre un alcool et un acide [129,132].

Le polymère de polyester est linéaire et il est généralement le téréphtalate de polyéthylène. Il existe deux méthodes de polymérisation des polymères de polyester pour des applications textiles. Premièrement, un échange d'esters via le téréphtalate de diméthyle et la deuxième méthode, comme le montre la Figure 37, est l'estérification directe de l'acide avec de l'éthylène glycol [18,130].

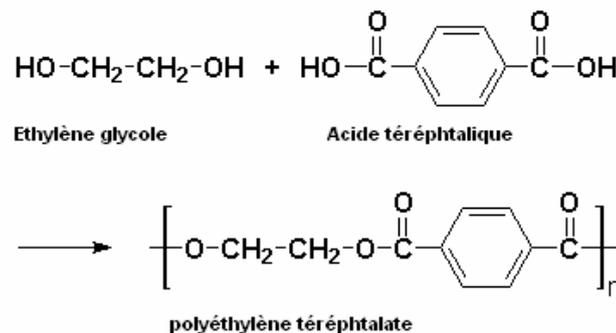


Figure 37: Réaction chimique de polymérisation du polyéthylène téréphtalate.

Les fibres de polyester sont naturellement hydrophobes en raison de la non-polarité et de la structure très cristalline de ses polymères, qui inhibent l'entrée des molécules d'eau dans le système polymérique, ce qui favorise l'étalement et l'évaporation de l'eau [132]. Cependant, la capacité d'absorption de l'humidité et le comportement de propagation peuvent être améliorés avec des formes de section transversales spécialement conçues par l'application des produits chimiques lors du finissage. Ainsi, les étoffes en polyester, dotés d'un cœur hydrophobe et d'une surface hydrophile, permettent d'évacuer l'humidité vers l'extérieur, facilitant son évaporation au contact de l'air [169,170].

Le polyester est souvent privilégié dans la fabrication des vêtements de sport en raison de sa légèreté, de sa résistance à la décoloration, de sa durabilité, de sa facilité d'entretien et de son séchage rapide.

Dans cette étude, nous avons fabriqué nos échantillons en utilisant des fils de polyester différents.

5.6.1. Le fil de polyester

Le processus de fabrication du fil de polyester se fait principalement par filage à fusion, où le polymère est chauffé, puis extrudé à travers des filières avec un nombre de trous égal au

nombre de filaments désirés dans le fil. Ces derniers sont ensuite étirés pour augmenter leur résistance et peuvent être texturés afin de produire des fils plus volumineux ou élastiques selon les applications. Le filage par fusion est une méthode rapide et efficace, utilisée massivement dans la production industrielle des fils en polyester [18,171]. Le premier fil polyester utilisé dans ce travail est un fil texturé à une section transversale circulaire issu d'un filage par fusion (Figure 38).

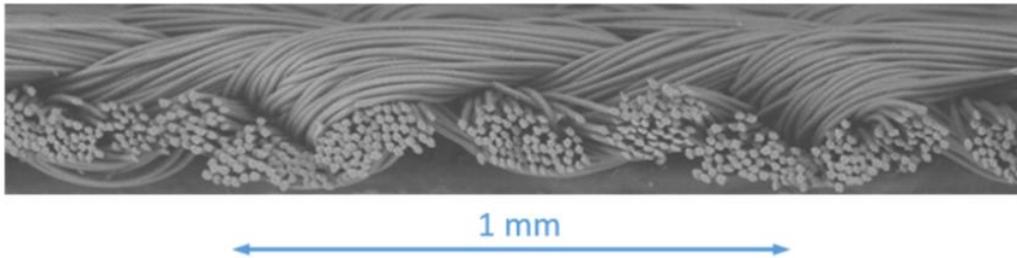


Figure 38: Image MEB d'une coupe sectionnelle d'un tricot jersey tricoté avec un multi-filaments de section circulaire d'un polyester ordinaire.

5.6.2. *Le fil en polyester fonctionnel COCONA®*

Le second fil polyester utilisé dans ce travail est le polyester COCONA®. C'est un fil fonctionnel qui offre des avantages de confort dans les vêtements de sports. Ce fil est fabriqué avec des fibres de polyester qui disposent de la technologie 37.5®. Cette technologie fonctionne grâce à des particules actives intégrées en permanence dans la fibre qui capturent et libèrent la vapeur d'eau. La Figure 39 illustre l'arrangement des particules sur la fibre et la fixation des molécules d'eau sur les particules actives. Ces particules réagissent activement à la chaleur corporelle. La fibre est constituée par deux types de particules. Un composé minéral à base de sable volcanique et un charbon actif à base de coques de noix de coco. Ces deux matériaux sont ensuite incorporés dans un mélange maître, qui représente la fibre de polyester fonctionnelle.

La technologie 37.5® fonctionne à un niveau microscopique avec des particules actives qui présentent des qualités importantes. Elles attirent l'eau et grâce à des forces électromagnétiques, elles attirent la vapeur d'eau générée par le corps humain. Ces particules sont des matériaux ultra poreux qui augmentent considérablement la surface spécifique de la fibre ce qui permet au fil d'évaporer de l'eau plus rapidement. Les particules volcaniques absorbent l'énergie infrarouge émise naturellement par le corps pour accélérer l'évaporation de la sueur s'il fait chaud ou pour conserver la chaleur s'il fait froid [172].

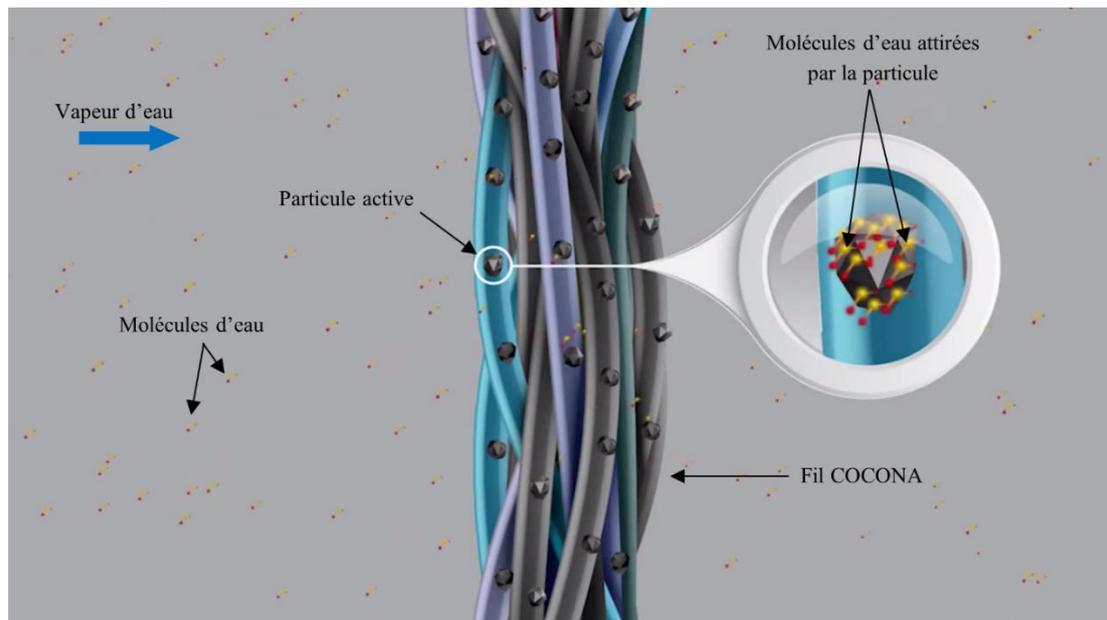


Figure 39: Schéma explicatif sur le fonctionnement du fil COCONA®.

D'après le fournisseur du fil, les étoffes fabriquées à partir de ce fil maintiennent la chaleur corporelle, durant n'importe quelles activités sportives, au-dessous de 37.5 °C. Cette technologie s'adapte pour aider le porteur à sentir de la fraîcheur lorsqu'il fait chaud ou à empêcher la diffusion de la chaleur lorsqu'il fait froid [172].

Les caractéristiques techniques des fils utilisés sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6: Caractéristiques des fils de tricotage.

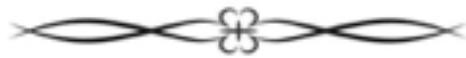
<i>Fil</i>	<i>Titre (dtex)</i>	<i>Nombre de filaments</i>	<i>Diamètre de la fibre (µm)</i>	<i>Diamètre du fil (µm)</i>	<i>Porosité (%)</i>
<i>Polyester classique</i>	83	72	12.17	190	70.46
<i>CV (%)</i>			8.65	4.98	
<i>σ</i>			1.05	9.21	
<i>Polyester COCONA®</i>	83	42	13.93	200	76.71
<i>CV (%)</i>			7.89	6.37	
<i>σ</i>			1.09	13.33	

6. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les méthodes expérimentales utilisées pour caractériser la matière textile sous forme de fils et d'étoffes tricotées (Titre, diamètre des fibres et des fils, porosité, masse surfacique, épaisseur, densité des colonnes, etc.). Ensuite, nous avons présenté les méthodes de mesure des paramètres du confort vestimentaire des tricots fabriqués (la perméabilité à l'air, la perméabilité à la vapeur d'eau, les propriétés thermiques, la capacité de mouillage, les propriétés du séchage et les propriétés de gestion de l'humidité). Enfin, nous

avons présenté le processus de fabrication des tricots élaborées pour cette étude et les matières textiles utilisées.

Le prochain chapitre est consacré à l'évaluation des propriétés de confort et à l'étude de l'influence de certains paramètres de fabrication sur ces propriétés.



**Chapitre III : Influence des paramètres et des
procédés de fabrication sur les propriétés du confort
vestimentaire**



1. Introduction

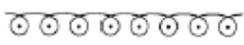
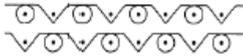
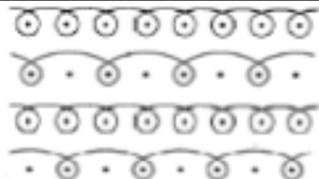
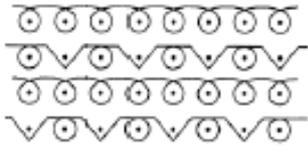
Le confort dans les vêtements de sport est un besoin important, il est affecté par les propriétés des fibres, des fils et des tricots. Une bonne compréhension de ces facteurs est essentielle pour la conception de vêtements fonctionnels. Les caractéristiques de fabrications des tricots influencent significativement le niveau de confort du produit final. L'objectif de ce chapitre est d'examiner l'effet de quelques facteurs sur les propriétés du confort vestimentaire. Ce chapitre est divisé en trois parties. La première partie est consacrée à l'étude de l'effet du type de la maille de tricotage et le processus de la teinture sur les propriétés du confort vestimentaire. La deuxième partie est réservée à l'étude de l'effet de la technique d'application du traitement de finissage sur ces propriétés. La dernière partie est consacrée à la présentation et à la discussion des changements de ces propriétés suite à des cycles de lavage domestique.

2. Analyse et caractérisation des structures

2.1. Présentation des échantillons

Pour les besoins de cette étude, nous avons fabriqué cinq structures tricotées différentes sur une machine circulaire simple fonture de marque "ORIZIO®". Ces structures comportent des mailles chargées et des flottées. Les échantillons préparés sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7: Liages des structures tricotées.

Réf	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
Description	Jersey simple	Flotté 1×1	Piqué
Liage			
Réf	<i>C</i>		<i>L</i>
Description	jersey flotté		Piqué Lacoste
Liage			

Tous les tricots ont été fabriqués par un mélange de deux fils texturés ayants le même titre, un fil polyester fonctionnel COCONA® et un fil polyester ordinaire. Le pourcentage de chaque fil dans le mélange est de 50 %. Les tricots écrus produits ont été divisés en deux groupes, le premier groupe est teint avec une couleur jaune et le deuxième groupe est teint avec une couleur noire.

Pour distinguer les tricots après le procédé de teinture, la lettre "**C**" (comme claire) est ajoutée à la référence des tricots teints en jaune et la lettre "**F**" (comme foncée) est ajoutée à la référence des tricots teints en noir. L'application de l'agent hydrophile, lors du finissage, est effectuée par foulardage ou par épuisement, alors la lettre "**F**" est ajoutée à la référence des tricots finis par foulardage et la lettre "**E**" est ajoutée dans le cas où le finissage est effectué par épuisement. A titre d'exemple, **JCF** est un tricot jersey de couleur jaune fini par foulardage et **JFF** est un tricot jersey de couleur noir fini par foulardage.

2.2. Propriétés structurales

Les propriétés de contexture des tricots écrus sont présentées dans le Tableau 8.

Tableau 8: Propriétés structurales des tricots écrus.

Réf	Masse surfacique (g/m ²)	Épaisseur (mm)	Colonnes (C/cm)	Rangée (R/cm)	Maille (M/cm ²)	LFA de 100 AG (cm)	
J	70.70	0.59	14.20	21	298.20	26.69	
CV (%)	1.08	4.55	3.15	4.76		1.30	
F	73.40	0.66	16.90	26.40	446	16.83	
CV (%)	2.42	4.52	3.24	2.07		1.54	
P	61.70	0.62	12.90	21.60	278.70	25.76	
CV (%)	1.23	3.32	1.73	4.14		1.04	
C	78.14	0.70	16.40	20.60	338	Maille	Flottée
						28.89	18.60
CV (%)	2.14	2.74	3.34	4.34		1.09	1.32
L	72.50	0.88	12	22.80	273.60	Maille	Charge
						25.60	24.80
CV (%)	2.18	2.78	0	4.80		0.49	0.99

D'après les résultats trouvés, nous pouvons constater que les masses surfaciques et les épaisseurs les plus importantes sont ceux des tricots Jersey flotté "C" et des tricots piqué Lacoste "L". L'ajout des charges aux tricots augmente la quantité de la matière textile dans les tricots et par conséquent augmente la masse surfacique, alors que le relief supplémentaire ajouté par les charges a provoqué une augmentation des épaisseurs. Cependant, les flottées ont provoqué une augmentation importante de la densité des mailles. Ce résultat est constaté pour le tricot flotté 1x1 et en comparant la densité des mailles des structures jersey simple "J" et jersey flotté "C". La longueur du fil absorbée (LFA) est la plus faible pour le tricot flotté 1x1, cependant, sa densité de mailles élevée a permis de rendre sa masse surfacique comparable à celles des autres structures.

Les propriétés structurales des échantillons après les procédés de teinture et de finissage et avant et après l'application des cycles de lavage domestiques sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9: Propriétés structurales des tricotés finis avant et après lavage.

<i>Réf</i>	<i>Masse surfacique (g/m²)</i>		<i>Épaisseur (mm)</i>		<i>Colonnes (C/cm)</i>		<i>Rangée (R/cm)</i>		<i>Maille (M/cm²)</i>		<i>LFA de 100 AG (cm)</i>			
	<i>Av</i>	<i>Ap</i>	<i>Av</i>	<i>Ap</i>	<i>Av</i>	<i>Ap</i>	<i>Av</i>	<i>Ap</i>	<i>Av</i>	<i>Ap</i>	<i>Av</i>		<i>Ap</i>	
<i>JCF</i>	82.06	87.04	0.47	0.48	18	18.60	19.40	20.40	349.20	379.40	24.11	23.91		
<i>CV (%)</i>	1.91	4.43	1.24	2.29	0	2.94	2.82	2.68			1.55	1.43		
<i>JFF</i>	77.14	81.66	0.45	0.49	17.40	18.40	19.80	21	344.80	386.40	20.55	21.46		
<i>CV (%)</i>	0.86	0.57	1.08	1.84	3.15	2.98	4.23	4.76			1.40	2.01		
<i>JCE</i>	82	91.30	0.47	0.50	18	18.60	20.20	19.60	363.60	364.60	25.58	24.71		
<i>CV (%)</i>	1.13	1.41	0.95	0.90	0	2.94	2.21	2.79			1.53	1.71		
<i>JFE</i>	79.08	84.86	0.47	0.49	18.20	18.40	19	20.40	345.60	375.40	23.09	24.45		
<i>CV (%)</i>	2.50	1.04	1.42	2.29	2.46	2.98	3.72	2.68			1.68	1.27		
<i>FCF</i>	82.62	92.96	0.44	0.48	19.80	20	24.40	27	483	540	15.63	15.54		
<i>CV (%)</i>	1.01	0.43	1.01	1.13	2.26	0	2.24	2.62			1.68	1.06		
<i>FFF</i>	82.75	88.84	0.45	0.46	19.40	19.40	25.40	29.80	493	578.20	15.43	16.16		
<i>CV (%)</i>	0.89	0.61	1.18	0	2.82	2.82	3.52	1.50			1.62	1.80		
<i>FCE</i>	82.50	94.38	0.45	0.49	18.80	20.40	27.60	27.40	519	558.80	16.12	16.09		
<i>CV (%)</i>	1.68	1.15	0.96	1.11	2.38	2.68	1.98	3.26			1.51	1.51		
<i>FFE</i>	78.66	84.7	0.42	0.43	18	18.40	26	27.80	468	511.60	15.59	15.82		
<i>CV (%)</i>	0.58	1.11	2.19	1.29	0	2.98	0	1.61			3.11	2.04		
<i>PCF</i>	88.60	93.82	0.57	0.59	15.40	16.20	23.20	24.40	357	395.20	23.99	23.61		
<i>CV (%)</i>	1.48	0.98	0.72	1.42	3.56	2.76	3.61	2.24			1.48	1.46		
<i>PFF</i>	85.74	87.76	0.55	0.55	15.50	15.80	21.80	22	338	347.60	24.13	24.36		
<i>CV (%)</i>	2.63	2.45	2.41	3.28	2.28	2.83	3.84	3.21			1.42	1.05		
<i>PCE</i>	88.14	92.34	0.56	0.58	16	16	23.20	22.60	371.20	361.60	24.71	24.11		
<i>CV (%)</i>	1.28	1.18	1.59	2.24	0	0	3.61	3.96			1.18	1.88		
<i>PFE</i>	86.50	88.30	0.55	0.57	15	15.80	23.20	22.80	348	360.40	25.62	22.80		
<i>CV (%)</i>	2.22	1.98	2	1.46	0	2.83	3.61	4.80			1.55	1.15		
<i>CCF</i>	81.98	85.54	0.48	0.50	18	18.40	18.60	19.20	334.80	353.40	<i>Maille</i>	<i>Flottée</i>	<i>Maille</i>	<i>Flottée</i>
<i>CV (%)</i>	1.11	1.27	1.93	0.88	0	2.98	4.81	4.36			24.40	15.96	23.07	14.88
											1.42	1.96	1.17	1.55
<i>CFF</i>	82.36	83.56	0.50	0.54	18.60	17.80	19.20	20.40	357.12	363.20	25.50	16.55	26.83	17.49
<i>CV (%)</i>	1.57	0.85	1.22	1.50	1.73	2.51	2.46	4.388			1.75	1.17	2	1.02
<i>LCF</i>	88.82	93.16	0.53	0.56	16	15.40	23.60	25.20	377.60	388.10	<i>Maille</i>	<i>Charge</i>	<i>Maille</i>	<i>Charge</i>
<i>CV (%)</i>	1.81	1.30	0	1.26	0	3.56	2.32	2.42			26.10	25.36	24.99	24.33
											0.81	0.77	0.30	1.15
<i>LFF</i>	89.50	92.02	0.56	0.57	15	16	22.60	24.20	336	387.20	26.22	25.44	26.34	25.76
<i>CV (%)</i>	2.44	1.38	2.19	1.56	0	0	2.83	1.85			0.68	0.93	0.93	0.92

D'après les résultats exposés dans le Tableau 9, nous pouvons constater que le procédé de teinture et de finissage (ajout du colorant et agent hydrophile) a provoqué :

✓ Une augmentation de la masse surfacique de toutes les structures tricotées. Cette augmentation est la combinaison de deux causes principales. La première est la fixation du colorant et de l'agent hydrophile sur la matière textile alors que la deuxième cause est expliquée par l'augmentation de la densité des mailles par cm^2 de toutes les structures. Le procédé de teinture est effectué à des températures élevées provoquant le compactage des structures tricotées. Ceci est constaté du fait que la densité des colonnes par centimètre (C/cm) a augmenté aussi d'une manière importante pour toutes les structures tricotées

✓ Une diminution des épaisseurs de toutes structures, cette diminution est principalement provoquée par l'étape d'exprimage effectuée à la suite de la teinture. L'application d'une contrainte mécanique de compression sur la structure textile alors que celle-ci se trouve encore à une température élevée permet de réduire légèrement l'épaisseur (d'un à deux dixièmes de mm).

✓ Le procédé de lavage domestique a provoqué une augmentation de la masse surfacique à la suite d'une augmentation de la densité de maille constatée après l'application des cycles de lavage – séchage. L'augmentation de l'épaisseur après le lavage – séchage est constaté mais reste dans des proportions faibles.

3. Influence des paramètres de tricotage et des procédés de teinture sur les paramètres du confort vestimentaire

3.1. Phénomène de séchage

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence des paramètres des procédés de fabrication sur un paramètre important du confort vestimentaire qui est le séchage des structures tricotées. Le phénomène de séchage est caractérisé par sa cinétique et par le temps de séchage. Les cinétiques de séchage présentées sont celles obtenues par la méthode adoptée (validée par les clients du partenaire industriel) et celles obtenues par la méthode développée par notre équipe de recherche en utilisant l'appareil PERMETEST. Ceci permettra à la fois d'analyser les résultats, de présenter les différences entre les deux méthodes et de valider la méthode proposée. Par la suite, nous présentons les temps de séchage pour chaque article étudié.

3.1.1. Cinétique de séchage

Les cinétiques de séchage obtenues sont présentées par la Figure 40. Les courbes en « ● » représentent les valeurs calculées à partir de la méthode du PERMETEST et les courbes en

« ○ » représentent les valeurs expérimentales mesurées selon la méthode adoptée de l'entreprise.

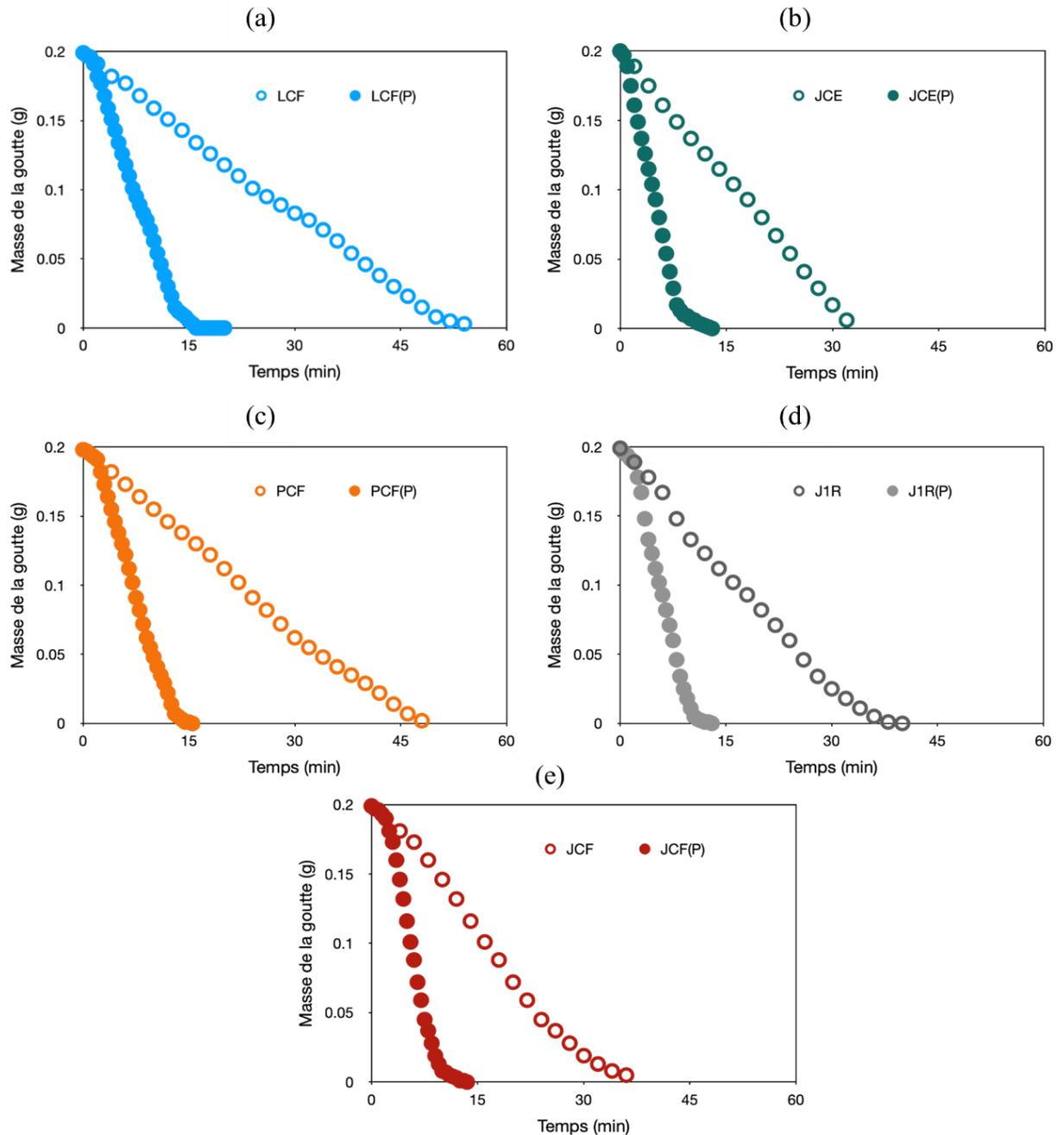


Figure 40: Courbes de la masse de la goutte d'eau en fonction du temps suivant la norme « ○ » et suivant le modèle « ● ». a) LCF, b) JCE, c) PCF, d) J1R, e) JCF.

Nous remarquons que les courbes des deux méthodes donnent des résultats différents. La masse de la goutte suit un profil décroissant dans les deux méthodes. Cependant, la pente de la courbe décroissante avec la méthode utilisant l'appareil PERMETEST est plus importante donnant lieu à un temps de séchage réduit. Cette différence est la conséquence directe du changement des conditions d'essais. En effet, la température de la tête de mesure du

PERMETEST est supérieure à la température de l'essai expérimental dans la méthode adoptée, ce qui exerce une influence significative sur le taux de séchage. La forme de la tête d'essai du PERMETEST est concave, alors que la coupelle utilisée avec la méthode adoptée est convexe. La forme concave favorise la propagation horizontale de l'eau ce qui augmente le rayon et la vitesse de propagation de la goutte. De ce fait, la surface d'échange de la masse et de la chaleur augmente ce qui diminue sensiblement le temps d'évaporation et de séchage. L'étendue de propagation de la goutte d'eau n'est pas assez grande dans le cas de la coupelle, ce qui donne une vitesse d'évaporation moins importante et une cinétique de séchage différente.

Les courbes de la cinétique de séchage obtenus représentent un comportement typique des courbes de séchage des milieux poreux et précisément des matériaux textiles. Ces courbes démarrent avec une forte pente décroissante indiquent que l'humidité est éliminée à un rythme rapide au début du processus de séchage et mettant en évidence la période de séchage à taux constant. L'aplatissent progressivement des courbes, à mesure que le temps avance, indique que le matériau entre dans une période de chute du taux de séchage. A la fin, la diminution de la masse de la goutte d'eau est très faible, les courbes se stabilisent, ce qui montre que le processus de séchage est presque terminé, et que le matériau approche de son humidité d'équilibre. À partir de ce stade, aucun séchage significatif ne se produit à moins que les conditions externes changent.

Les courbes obtenues avec la méthode du PERMETEST montrent clairement une transition entre la période à taux constant et la période de chute du taux de séchage. L'humidité critique se situe au point où la courbe change de pente, passant d'une forte décroissance à une pente plus aplatie. À ce niveau, l'humidité commence à migrer des couches internes du matériau vers la surface.

Après avoir analysé les résultats et les graphiques obtenus par les deux méthodes, nous pouvons remarquer que les deux méthodes utilisées pour étudier le phénomène de séchage permettent d'obtenir la cinétique de séchage et le temps de séchage avec des différences liées aux modes opératoires.

Dans la suite, nous allons présenter les avantages de la méthode utilisant le PERMETEST par rapport à celle adoptée et utilisée par le partenaire industriel. En effet, la nouvelle méthode permet de mieux analyser le comportement au séchage des articles textiles. La Figure 41 présente des exemples de résultats obtenus avec cette dernière méthode.

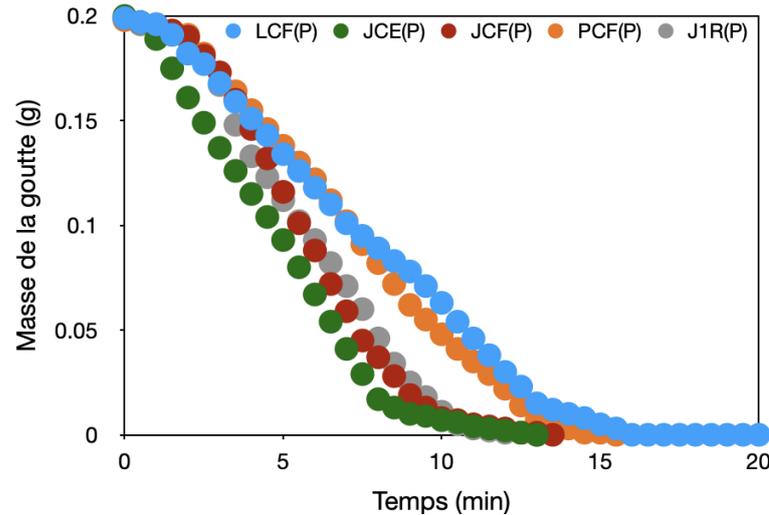


Figure 41: Cinétique de séchage d'une goutte d'eau suivant la nouvelle méthode en utilisant le PERMETEST.

L'analyse des résultats présentés dans la Figure 41 permet de distinguer trois phases différentes :

- ✓ La première phase est située entre 0 et 2 ± 0.5 minutes : dans cette phase la cinétique de séchage est faible avec un aplatissement au niveau du changement de la masse de la goutte. En effet, la pente de diminution de la masse de la goutte est de l'ordre de -0.0045 ± 0.0006 g/min pour le cas de l'échantillon *JCF*. À ce niveau, la pénétration de la goutte à travers l'épaisseur de l'échantillon est plus importante comparé au séchage et le diamètre de l'étalement de la goutte est relativement faible. De ce fait la surface de la goutte exposée à l'évaporation est plus petite.
- ✓ La deuxième phase est située entre 2 ± 0.5 et 10 ± 1 minutes : au niveau de cette seconde phase la cinétique de diminution de la masse de la goutte enregistre une pente négative plus accentuée. En effet, le coefficient de séchage pour l'échantillon *JCF* est de l'ordre de -0.02 ± 0.006 g/min. Lors de cette phase, la goutte est entièrement diffusée à travers l'étoffe. Ainsi la goutte est complètement étalée sur la surface de l'échantillon ce qui favorise son évaporation.
- ✓ La troisième phase débute à partir de 10 ± 1 et aille jusqu'à 13 ± 0.5 minutes. Lors de cette dernière phase, la pente de diminution de la goutte est moins importante. Elle est de l'ordre de -0.0024 ± 0.0004 g/min pour le cas du tricot *JCF* et tend vers 0. Ceci présente la quantité d'eau absorbée par l'échantillon et qui est difficile à extraire sans une énergie externe.

Ces trois phases n'étaient pas lisibles par la méthode utilisée et adoptée par le partenaire industriel. De ce fait, la méthode utilisant le PERMETEST est plus intéressante et permet d'avoir un meilleur choix de contexture et des paramètres structuraux des articles tricotés.

3.1.2. Temps de séchage

Le Tableau 10 présente les temps de séchage des tricots finis. Nous constatons que les tricots ayant des mailles chargées ont les temps de séchage les plus importants dans les deux coloris. Le tricot piqué Lacoste, **L**, avec 54 minutes dans la couleur jaune et 46 minutes dans la couleur noire, alors que les tricots piqué **P** possèdent des temps de séchage de 48 minutes dans la couleur jaune et 45 minutes dans la couleur noire. Ce résultat est similaire à celui trouvé par Kyatuheire et al. [173]. Ils ont indiqué que les tricots en côte anglaise et en côte perlée, qui représentent les seules structures comportant des charges (dans leur étude), ont des temps de séchage plus faibles que les autres structures.

Tableau 10 : Temps de séchage des tricots finis dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>	<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>
JCF	36	JFF	35
σ	0	σ	1.41
FCF	38	FFF	34
σ	0	σ	0
PCF	48	PFF	45
σ	0	σ	0
CCF	36	CCF	34
σ	0	σ	0
LCF	54	LFF	46
σ	0	σ	0

En effet, une boucle de charge est une maille non entrelacée avec l'ancienne maille. La boucle de charge s'imbrique sur l'envers de la tête de l'ancienne maille ce qui forme une double épaisseur de fils. La superposition des fils diminue la surface globale exposée à l'environnement externe et crée des zones de détention du liquide. Contrairement aux autres structures (**J**, **F** et **C**) qui possèdent des zones de détention juste au niveau des points d'entrelacement des fils et le reste de la surface des fils est libre et ainsi plus exposée à l'air. L'existence de ces zones engendre l'emprisonnement du liquide dans les espaces vides entre les fibres des deux fils et avec l'absence d'un front d'évaporation, ils entravent la vitesse de séchage globale du tricot.

Durant le processus de séchage, le front d'évaporation recule de la surface extérieure à des endroits internes, et simultanément, un transport capillaire du liquide se déroule dans les espaces inter fibres qui est régit par le gradient de concentration de l'eau existant entre les zones mouillées et celles sèches. L'évaporation de l'eau dans les zones de détention nécessite initialement un déplacement du liquide immobilisé avant qu'il ne soit évaporé ce qui prolonge le temps de séchage. L'importance de l'exposition du front d'évaporation est signalée par Yang Yang et al. [123], ils ont conclu que le temps de séchage diminue en augmentant la surface de

contact entre le liquide dans la structure textile et l'air de l'environnement extérieur, ce qui favorise l'évaporation de l'humidité.

Les structures ayant des mailles flottées, *F* et *C*, ont un meilleur temps de séchage comparées aux structures avec des mailles chargées, dans les deux couleurs. Cela peut être dû à la surface d'exposition du fil de tricotage, qui est plus grande dans le cas d'un flotté. La relation entre le temps de séchage et la surface d'exposition du front d'évaporation est plus profondément étudié par M. Manshahia et A. Das [174]. Ils ont examiné le transfert de chaleur et de masse de différentes structures textiles tricotées. Ils ont trouvé que les tricots ayant des mailles flottées sèchent plus rapidement. Ce résultat a été attribué à leur construction ouverte qui permettait une pénétration facile de l'air et une libération rapide de l'eau par convection forcée. Ils ont ajouté que des filaments plus fins avec une surface spécifique plus élevée offrent une capacité de transport interne rapide de l'eau, ce qui augmente la zone mouillée et entraîne par la suite une évaporation plus rapide de la sueur.

Les résultats de l'analyse de la variance de l'effet de la structure sur le temps de séchage, présentés dans le Tableau 11, indiquent que le temps de séchage change d'une manière significative avec le changement de la structure. En d'autres termes, le type de maille de tricotage a un effet significatif sur le temps de séchage des structures tricotées.

Tableau 11 : Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Temps de séchage</i>	Valeur de F	504.25	162.00	18.25
	Valeur de p	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

La comparaison entre les groupes de structures, réalisée avec le test post hoc de Tukey, indique que la différence du temps de séchage entre les tricots avec des mailles chargées (*P* et *L*) d'une part et d'autre part les autres structures (*J*, *F* et *C*) est significative. Le Tableau 12 montre les valeurs de p ajustées du test de Tukey. Ces résultats révèlent que les mailles chargées exercent une influence considérable sur le temps de séchage. Néanmoins, les flottés n'affectent pas significativement le temps de séchage des tricots finis.

Tableau 12: Comparaison par paires du temps de séchage.

	<i>Valeur de p ajustée entre les groupes</i>			
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>L</i>
<i>J</i>	0.794	0.000*	0.794	0.000*
<i>F</i>	-	0.000*	0.242	0.000*
<i>P</i>	0.000*	-	0.000*	0.000*
<i>C</i>	0.242	0.000*	-	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Les variantes noires montrent des temps de séchage plus courts que les variantes jaunes. Cette différence entre les deux couleurs peut être due à une plus grande dégradation de la matière textile provoquée par des sollicitations mécaniques et thermiques prolongés durant le processus d'ennoblissement. En effet, la teinture de la couleur noire nécessite plus du temps que la teinture de la couleur jaune. De plus, il existe plus de traitements qui suivent la teinture en coloris noir, six traitements post teinture et quatre traitements après le processus de la teinture jaune.

Selon les résultats de l'analyse de la variance indiqués dans le Tableau 11, on constate une différence significative entre le temps de séchage des variantes noires et jaunes. De plus, il a été prouvé qu'il existe un effet significatif d'interaction entre la structure et la couleur de la structure sur le temps de séchage.

3.2.Perméabilité à l'air

Les valeurs de la perméabilité à l'air des tricots, jaunes et noires, à l'état fini sont représentées dans le Tableau 13.

Tableau 13: Perméabilité à l'air des tricots dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>
<i>JCF</i>	2371	<i>PFF</i>	1869
<i>σ</i>	83.32	<i>σ</i>	93.03
<i>JFF</i>	2316	<i>CCF</i>	2219
<i>σ</i>	106.58	<i>σ</i>	48.17
<i>FCF</i>	2127	<i>CFE</i>	2055
<i>σ</i>	51.65	<i>σ</i>	58.92
<i>FFF</i>	2101	<i>LCF</i>	2098
<i>σ</i>	46.29	<i>σ</i>	51.38
<i>PCF</i>	1622	<i>LFF</i>	2083
<i>σ</i>	62.32	<i>σ</i>	68.48

Les deux tricots en jersey simple *JCF* et *JFF* ont les meilleures valeurs de perméabilité à l'air parmi les autres structures par des valeurs de 2371 mm/s et 2316 mm/s respectivement. Les tricots *P* sont les moins perméables à l'air. Ceci est expliqué par la structure du tricot qui comporte des mailles chargées. Les boucles de charges rendent le tricot plus lourds et plus épais (cf. les Tableau 8 et 9), ceci les rend moins perméable à l'air. Les tricots *PCF*, *PFF*, *LCF* et *LFF* sont les tricots ayant les valeurs de masse surfacique et d'épaisseur les plus importantes. D'un point de vue masse surfacique, le coefficient de Pearson trouvé permet de confirmer cette correspondance négative entre la perméabilité à l'air et la masse surfacique avec une valeur égale à -0,644. Aussi, Figen SELLİ et Yıldıray TURHAN [175] ont montré que si la masse

surfacique de la structure textile tricotée augmente alors la capacité de l'air à pénétrer à travers son épaisseur diminue d'une manière significative. De la part de l'épaisseur, la perméabilité à l'air a été trouvée fortement et négativement corrélée avec l'épaisseur avec un coefficient de Pearson égal à -0,718. En outre, Esra Taştan Özkan et al. [150] ont trouvé que la perméabilité à l'air la plus élevée est observée dans la structure la moins épaisse.

Comme illustré dans le Tableau 14, l'évaluation ANOVA des résultats a démontré que la structure a un effet significatif sur la perméabilité à l'air. En utilisant la méthode de Tukey, nous avons classé les cinq structures en trois groupes, qui présentent une différence significative entre eux. Le groupe A contient la structure *J*. Le groupe B contient les structures *C*, *F* et *L*. Le groupe C contient la structure *P*. L'incorporation des mailles flottées et chargées exerce un effet négativement significatif.

Tableau 14: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	Valeur de F	190.31	0.03	23.52
	Valeur de p	0.000*	0.853	0.000*

*: Statistiquement significatif.

A l'exception de la structure *P*, les autres échantillons ayant une coloration claire (jaune) présente une perméabilité à l'air supérieure à celle des tricots ayant une coloration foncée (noir). L'écart entre les tricots de couleurs différentes n'est pas assez flagrant, mais nous observons que *C* et *P* ont l'écart le plus important. *CCF* est plus perméable que *CFF* car il a une masse surfacique, une épaisseur et une densité des mailles plus importantes que le tricot *CFF*. La même constatation est appliquée pour justifier le fait que le tricot *PPF* est plus perméable que *PCF*.

L'analyse statistique a montré que le cycle de teinture n'a pas d'influence significative sur la perméabilité à l'air. Cependant, il intervient dans le terme d'interaction qui a un effet significatif. Par conséquent, il existe une différence significative entre les processus de teinture en raison de la différence des structures.

Y. Jhanji et al. [31] ont montré qu'une forte corrélation positive existe entre la perméabilité à l'air et le pourcentage d'évaporation de l'eau. Ils ont conclu que plus les étoffes textiles sont perméables à l'air plus l'évaporation de l'eau est rapide et donc elles sèchent plus rapidement.

3.3. Propriétés de gestion de l'humidité

La comparaison entre les propriétés de gestion de l'humidité est effectuée sur les tricots à l'état finis pour les deux couleurs.

3.3.1. Propriétés de mouillage

Les résultats des propriétés de mouillage des tricots sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15: Les propriétés de mouillage des tricots dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Temps de mouillage du haut (s)</i>	<i>Temps de mouillage du bas (s)</i>	<i>Taux d'absorption du haut (%/s)</i>	<i>Taux d'absorption du bas (%/s)</i>
<i>JCF</i>	2.06	2.04	67.20	82
<i>σ</i>	0.11	0.09	3.33	1.42
<i>JFF</i>	1.98	2.00	68.90	82.4
<i>σ</i>	0.07	0.08	3.17	1.4
<i>FCF</i>	2.04	2.09	71.18	81.17
<i>σ</i>	0.12	0.08	3.03	1.56
<i>FFF</i>	1.94	1.98	75.60	82.7
<i>σ</i>	0.04	0.04	1.85	0.7
<i>PCF</i>	2.24	2.24	64.12	72.13
<i>σ</i>	0.11	0.14	3.18	4.09
<i>PFF</i>	2.19	2.20	65.03	73.94
<i>σ</i>	0.06	0.06	3.66	2.8
<i>CCF</i>	2.05	2.10	68.98	79.65
<i>σ</i>	0.1	0.07	0.8	1.05
<i>CFF</i>	2.02	2.07	70.82	80.14
<i>σ</i>	0.06	0.08	1.15	0.9
<i>LCF</i>	3.60	3.65	66.80	75.57
<i>σ</i>	0.09	0.1	2.96	1.51
<i>LFF</i>	2.19	2.20	76.20	85.7
<i>σ</i>	0.08	0.1	1.16	1.2

Les tricots ayant les temps de mouillage les plus élevés sont les tricots comportant des mailles chargées (*P* et *L*). Les mêmes résultats sont observés pour les taux d'absorption du haut et du bas. L'exception est trouvée dans les valeurs du taux d'absorption du tricot *LFF*, qui a le meilleur taux d'absorption. Selon les résultats de l'analyse de la variance présentés dans le Tableau 16, la structure a une influence significative sur les propriétés du mouillage.

Tableau 16: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de mouillage.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	173.31	135.23	118.02
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*
<i>Temps de mouillage du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	177.72	139.11	124.51
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*
<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	15.60	1.04	9.67
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.315	0.000*
<i>Taux d'absorption du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	41.43	13.71	16.57
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.001*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Afin de détecter la différence de significativité entre les groupes de structure dans les propriétés de mouillages, le test Tukey est effectué. Les résultats sont présentés dans le Tableau 17 et indiquent qu'une différence du temps de mouillage existe entre les tricots chargés et les autres structures. La maille chargée provoque une influence sur le temps de mouillage tandis que, la maille flottée n'a pas d'effet significatif. L'analyse de la variance montre aussi que l'effet de la structure sur le taux d'absorption est significatif.

Tableau 17: Comparaison par paires des propriétés de mouillage.

<i>Différence entre les groupes de structure</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>		
	<i>Temps de mouillage</i>	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
C – F	0.632	0.051	0.135
J – F	0.949	0.001*	0.997
P – F	0.000*	0.000*	0.000*
L – F	0.000*	0.540	0.544
J – C	0.957	0.527	0.055
P – C	0.002*	0.001*	0.000*
L – C	0.000*	0.665	0.898
P – J	0.000*	0.043*	0.000*
L – J	0.000*	0.044*	0.321
L – P	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Pour le taux d'absorption du haut, la comparaison multiple a révélé que les valeurs de la structure *P* sont significativement différentes par rapport aux valeurs des autres structures. Si nous considérons que la structure *J* est l'échantillon de référence, alors la seule différence non-significative, selon le test post hoc, est trouvée entre la structure *J* et la structure *C*. Pour le taux d'absorption du bas, la structure *P* est significativement différente par rapport aux autres structures, comme il est indiqué dans le Tableau 17.

Les structures *P* et *L* ont des faibles capacités de mouillage comparées aux autres structures. Ce résultat peut être expliqué, dans un premier lieu, par la formation des reliefs à

l'envers des tricots par les mailles chargées, ce relief contribue au ralentissement du processus de mouillage lors du contact initial avec la goutte d'eau. D'après la recherche de Meltem Yanılmaz et Fatma Kalaoglu [176], plus la surface de l'étoffe textile est rugueuse plus l'angle de contact est grand et finalement plus le mouillage est difficile. De ce fait, les tricots ayant des mailles chargées sont plus difficiles à mouiller. Dans un deuxième lieu, l'épaisseur supérieure des structures *P* et *L* est à l'origine d'un mouillage lent. Ce résultat est trouvé aussi par Nilgün ÖZDİL et al. [127] qui ont constaté que les tricots fins (faible épaisseur) montrent un mouillage plus rapide que les tricots épais, lorsque des quantités d'eau égales sont appliquées.

Les tricots noirs ont des temps de mouillage plus courts que les tricots jaunes. Les structures *J*, *F*, *P* et *C* montrent des différences mineures entre le temps de mouillage des deux variantes. Tandis que dans la structure *L*, l'écart entre la variante jaune et la variante noire est plus important. Cette irrégularité est observée aussi dans les résultats du taux d'absorption. En calculant la différence entre les valeurs des deux couleurs de la structure *L*, nous trouvons que le tricot *LCF* a un temps de mouillage plus important de 1.43 secondes, un taux d'absorbance moins élevé de 9.4 %/s que le tricot *LFF*. Selon les résultats de l'analyse de la variance présentés dans le Tableau 16, le cycle de teinture a une influence significative sur le temps de mouillage et le taux d'absorption du bas. L'interaction significative des deux variables indépendantes justifie la différence importante entre les propriétés de mouillage des tricots *LCF* et *LFF*. L'analyse de l'interaction de la structure avec la couleur suggère que le type de teinture a un effet significatif sur le taux d'absorption du haut selon le type du liage.

La différence dans le comportement de mouillage entre *LCF* et *LFF* peut être dû à l'écart entre les densités des mailles de ces deux variantes, 377.6 Mailles/cm² pour *LCF* et 336 Mailles/cm² pour *LFF*. En effet, les travaux de Meltem Yanılmaz et Fatma Kalaoglu [176] ont montré que la réduction de la taille des ouvertures entre les fils en augmentant la densité des mailles rendent le tricot plus serré, cela rend le tricot plus résistant aux pression hydrostatiques qui provoquent le mouillage des surfaces. Alors, lorsque la densité des mailles augmente, elle provoque une diminution de l'aptitude de mouillage de la structure tricotée.

Les propriétés de mouillage mesurées suivent la même évolution que les valeurs du temps de séchage. Le temps de séchage est mesuré à partir du moment d'application du liquide, c'est-à-dire du moment de contact entre la goutte d'eau et la surface textile, jusqu'à l'évaporation totale de la quantité d'eau appliquée. Pour avoir une bonne capacité de séchage, premièrement le textile doit être facilement mouillé par la sueur liquide, Donc avoir une excellente capacité de mouillage contribue à avoir un bon pouvoir de séchage.

Le Tableau 18 montre les coefficients de corrélation entre les temps de mouillage et le temps de séchage. Le temps de séchage est bien corrélé avec le temps de mouillage.

Tableau 18: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.

	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	0.795	0.778

3.3.2. Propriétés de propagation

Les propriétés de propagation sont représentées par le rayon de propagation maximal et la vitesse de propagation. Ces propriétés sont indiquées dans le Tableau 19.

Tableau 19: Propriétés de propagation des tricots finis dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Rayon de propagation maximal du haut (mm)</i>	<i>Rayon de propagation maximal du bas (mm)</i>	<i>Vitesse de propagation du haut (mm/s)</i>	<i>Vitesse de propagation du bas (mm /s)</i>
<i>JCF</i>	30	30	9.02	8.83
σ	0	0	0.32	0.32
<i>JFF</i>	30	30	9.56	9.34
σ	0	0	0.3	0.24
<i>FCF</i>	30	30	9.1	9.01
σ	0	0	0.26	0.16
<i>FFF</i>	30	30	9.3	9.02
σ	0	0	0.26	0.18
<i>PCF</i>	28.6	29	6.84	6.73
σ	2	2	0.5	0.5
<i>PFF</i>	30	30	6.87	6.88
σ	0	0	0.31	0.27
<i>CCF</i>	30	30	8.56	8.44
σ	0	0	0.26	0.26
<i>CFF</i>	30	30	8.8	8.72
σ	0	0	0.12	0.11
<i>LCF</i>	30	30	5.04	4.9
σ	0	0	0.42	0.4
<i>LFF</i>	30	30	7.82	7.74
σ	0	0	0.41	0.42

D'après les valeurs trouvées, nous constatons que les rayons de propagation sont presque identiques dans toutes les structures préparées. En ce qui concerne la vitesse de propagation, nous constatons que les structures ayant des mailles chargées (**P** et **L**) ont des vitesses de propagation plus faibles que les autres structures. L'analyse de la variance révèle que la structure exerce une influence considérable sur la vitesse de propagation, comme il est montré dans le Tableau 20.

Tableau 20: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de propagation.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	158.95	44.21	34.11
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*
<i>Vitesse de propagation du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	171.32	51.99	40.47
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

La faible vitesse de propagation des tricots chargés peut être due à la présence de zones de détention qui freinent l'avancement du liquide. La superposition de la charge sur la tête de l'ancienne maille entraîne une discontinuité des canaux entre les fibres et entre les fils. De plus, les macro-pores générés par la formation de la charge retiennent plus de liquide ce qui amène à une lente propagation.

La comparaison par paires a montré qu'il existe une différence significative entre les vitesses de propagation sauf entre les structures *F* et *J*, comme il est présenté dans le Tableau 21.

Tableau 21: Comparaison par paires des propriétés de propagation.

<i>Différence entre les groupes de structure</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
C – F	0.038*	0.032*
J – F	0.866	0.987
P – F	0.000*	0.000*
L – F	0.000*	0.000*
J – C	0.002*	0.006*
P – C	0.000*	0.000*
L – C	0.000*	0.000*
P – J	0.000*	0.000*
L – J	0.000*	0.000*
L – P	0.049*	0.011*

*: Statistiquement significatif.

Cependant, les structures *C*, *F* et *J* contiennent des micros et macros-tubes capillaires connectés et distribués d'une façon uniforme, alors le flux du liquide à travers ces pores est plus rapide. Ces résultats peuvent être appuyés par E. Önera et A. Okur [177]. Ils ont observé que les structures ayant des flottées présentent une montée de liquide plus élevée par rapport aux structures ayant des charges.

Le changement des valeurs de la masse surfacique et de l'épaisseur est la conséquence directe de la modification du type de maille. Les tricots les plus lourds et les plus épais sont les structures comportant des mailles chargées.

La relation entre ces deux paramètres structuraux avec la vitesse de propagation est justifiée par l'analyse de corrélation de Pearson effectuée durant cette étude et par les résultats

trouvés dans la littérature. Les coefficients de corrélation de la vitesse de propagation avec la masse surfacique et l'épaisseur sont indiqués dans le Tableau 22.

Tableau 22: Coefficients de corrélation de la vitesse de propagation avec la masse surfacique et l'épaisseur.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Épaisseur</i>
<i>Vitesse de propagation du haut</i>	-0.806	-0.773
<i>Vitesse de propagation du bas</i>	-0.799	-0.757

La masse surfacique et l'épaisseur sont fortement et négativement corrélées par rapport à la vitesse de propagation. Ceci est confirmé aussi par P Senthilkumar et T Suganthi [178]. Ils ont constaté que les tricots présentent une ascension capillaire et vitesse de propagation faible en raison de leurs masse surfacique et épaisseur élevées. Encore, Elena Onofrei et al. [69] ont trouvé que les tricots avec une masse importante et une grande épaisseur montrent la plus mauvaise capacité de propagation, et que ces tricots contiennent des mailles chargées.

La comparaison entre les deux couleurs montre que les variantes jaunes ont des vitesses de propagation moins importantes que les variantes noires. Alors, le mouvement du liquide dans le réseau capillaire des tricots noirs est plus facile que les tricots jaunes. Le recouvrement partiel des multi-filaments de l'effet de texturation dans les tricots noirs rend les fils plus plats et les tubes capillaires plus continue, ce qui génère un flux de liquide fluide et rapide. L'arrangement aléatoire des filaments dans les fils texturés provoque une discontinuité dans le réseau capillaire. Encore, il existe plus de volume d'emménagement du liquide ce qui inhibe finalement son écoulement fluide. A.B. Nyoni et D. Brook [179] ont montré que les canaux capillaires sont mieux définis dans les fils plats et continus que dans les fils texturés et par conséquent, les liquides s'infiltreront dans ces structures spontanément à cause de la pression capillaire.

Le Tableau 20 montre les résultats de l'analyse statistique de l'effet de la couleur sur les propriétés de propagation. La valeur de p indique que le processus de teinture a une influence significative sur la vitesse de propagation. De plus, il y a une interaction significative entre la structure et la couleur. Ceci justifie la différence importante dans la vitesse de propagation entre le tricot *LCF* et le tricot *LFF*, qui est égale à 2.81 mm/s. L'influence de la couleur sur la vitesse de propagation change selon la structure.

L'aptitude d'un support textile à diffuser le liquide dans toutes les directions est importante dans la détermination de la capacité global de séchage. L'étendu de l'étalement du liquide après le mouillage est le facteur clé dans le processus d'échange de masse du textile avec son environnement. Après le mouillage, le liquide doit se propager et couvrir le maximum

de surface dans une courte durée. Plus le front d'évaporation est grand plus le temps de séchage diminue [180]. La forte relation entre le temps de séchage et la surface de propagation est prouvée dans plusieurs travaux dans la littérature. P Senthilkumar et T Suganthi [178] ont conclu que plus le rayon de propagation est important et la vitesse de propagation est élevée, plus l'évaporation est importante et le temps de séchage est minimal. MB Sampath et al. [181] ont montré que lorsque la surface étalée est plus importante, l'évaporation du liquide du textile est également plus importante.

Le Tableau 23 présente les résultats de l'analyse de corrélation entre la vitesse de propagation et le temps de séchage. D'après ce tableau, il existe une forte corrélation négative entre le temps de séchage et la vitesse de propagation. L'augmentation de la vitesse de propagation diminue le temps de séchage.

Tableau 23: Coefficients de corrélation de la vitesse de propagation avec le temps de séchage.

	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	-0.948	-0.947

3.3.3. AOWT et OMMC

Les résultats de l'indice de transport unidirectionnel cumulé (AOWT) et la capacité de gestion de l'humidité globale (OMMC) sont présentés dans le Tableau 24.

Tableau 24: AOWT et OMMC des tricots finis dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>AOWT (%)</i>	<i>OMMC</i>	<i>Réf</i>	<i>AOWT (%)</i>	<i>OMMC</i>
<i>JCF</i>	97.87	0.61	<i>PFF</i>	110.35	0.59
<i>σ</i>	2.59	0.06	<i>σ</i>	6.54	0.03
<i>JFF</i>	91.08	0.61	<i>CCF</i>	98.29	0.62
<i>σ</i>	3.44	0.02	<i>σ</i>	0.24	0.02
<i>FCF</i>	99.93	0.63	<i>CFF</i>	94.25	0.61
<i>σ</i>	4.25	0.02	<i>σ</i>	4.08	0.02
<i>FFF</i>	63.02	0.56	<i>LCF</i>	136.89	0.66
<i>σ</i>	3.17	0.01	<i>σ</i>	13.6	0.02
<i>PCF</i>	113.54	0.61	<i>LFF</i>	88.83	0.55
<i>σ</i>	6.2	0.02	<i>σ</i>	3.26	0.01

Les structures comportant des mailles chargées présentent des valeurs d'indice de transport unidirectionnel cumulé plus importantes que les autres structures. C'est la conséquence des macro-pores formés par l'élargissement de la maille tenue à la suite de la

formation d'une charge. Le passage transversal instantané du liquide peut s'effectuer à travers ces pores, ce qui justifie les valeurs importantes de cet indice pour les tricots chargés.

La structure exerce une influence importante sur l'indice de transport unidirectionnel cumulé, cette constatation est justifiée par les résultats de l'analyse de la variance présentés dans le Tableau 25. La comparaison par paires entre les différentes structures a montré que les cinq structures peuvent être classé en trois groupes. Le groupe A contient les structures *L* et *P*. Le groupe B contient les structures *C* et *J* et le groupe C contient la structure *F*.

Nous observons dans le Tableau 24 que l'indice de transport unidirectionnel des variantes jaunes est supérieur à celui des variantes noires. La différence est très importante dans les structures *F* et *L*. Ces structures montrent des différences dans l'épaisseur et la masse surfacique, les valeurs de ces paramètres structurales sont moins importantes dans la variante jaune que dans la variante noire. Une petite masse fibreuse et une faible épaisseur permettent d'avoir un passage plus important du liquide à travers la couche du tricot. Selon le Tableau 25, le cycle de teinture a un effet significatif sur l'indice de transport unidirectionnel. Encore, l'interaction entre la structure et la couleur est considérable. L'influence de la couleur est variable en fonction de la structure. Ce qui justifie l'écart trouvé entre les couleurs de différentes structures.

Tableau 25: Résultats de l'analyse ANOVA de AOWT et OMMC.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>AOWT</i>	<i>Valeur de F</i>	73.77	178.92	51.56
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*
<i>OMMC</i>	<i>Valeur de F</i>	3.65	37.93	6.07
	<i>Valeur de p</i>	0.013*	0.000*	0.001*

*: Statistiquement significatif.

L'indice de transport unidirectionnel cumulé indique la capacité de l'étoffe textile à diffuser le liquide à travers son épaisseur. Le passage transversal rapide de la sueur de la face intérieure à la face extérieure provoque instantanément le processus d'évaporation et par la suite un temps de séchage plus court. La relation entre le temps de séchage et l'indice de transport unidirectionnel cumulé est significatif d'après l'analyse de corrélation, avec un coefficient de Pearson égale à 0.784.

Les valeurs de la capacité de gestion de l'humidité globale des tricots sont présentées dans le Tableau 24. Dans la majorité des structures, la variante jaune a une valeur de la capacité de gestion de l'humidité globale plus importante que la variante noire. Toutes les variantes jaunes

gèrent mieux l'humidité que les variantes des tricots avec la couleur noire. Le Tableau 26 montre les notes attribuées aux tricots.

Tableau 26: Note de la capacité de gestion de l'humidité globale.

Structure	Couleur	Note de la capacité de gestion de l'humidité globale	
		Jaune	Noir
<i>F</i>		Très bien	Bien
<i>J</i>		Très bien	Très bien
<i>P</i>		Très bien	Bien
<i>C</i>		Très bien	Très bien
<i>L</i>		Très bien	Bien

Les tricots jaunes gèrent l'humidité d'une manière plus efficace que les variantes noires, d'après l'indicateur de la capacité de gestion de l'humidité global. Bien que les variantes noires présentent une meilleure aptitude au mouillage et une capacité de propagation capillaire plus rapide, ils ont des indices moins importants que les tricots jaunes. Ceci est dû à la formule de calcul de cet indice qui prend en considération l'indice de transport unidirectionnel cumulé davantage que les autres propriétés. Dans notre étude, les variantes jaunes ont des indices de transport plus important que les variantes noires.

Le meilleur tricot d'un point de vue gestion de l'humidité est le tricot *LCF*, or ce tricot a une capacité de séchage la plus faible. D'autre part, le tricot ayant la plus petite valeur de la capacité de gestion de l'humidité globale est le tricot *FFF*, qui a le temps de séchage le plus faible. Donc, la capacité de gestion de l'humidité globale ne peut pas traduire le comportement de séchage de la matière textile tricotée.

3.4.Perméabilité à la vapeur d'eau

Les résultats de la perméabilité à la vapeur d'eau des tricots finis dans les deux coloris sont présentés dans le Tableau 27.

Les tricots dans les deux couleurs des structures *L* et *P* ont des valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau les plus faibles. Le tricot le moins perméable à la vapeur d'eau est le tricot *LFF* avec une valeur de 79.4 %. Le tricot *LFF* est parmi les tricots les plus épais avec une épaisseur de 0.56 mm. L'épaisseur des structures tricotés s'est avérée fortement et négativement corrélée avec la perméabilité à la vapeur d'eau relative, avec un coefficient de Pearson égal à -0,866. Le tricot le plus épais est *PCF*, avec une épaisseur de 0.57 mm, a une valeur de perméabilité proche à celle de *LFF*. De plus, le tricot *PCF* est le moins perméable à l'air. Le coefficient de corrélation trouvé entre la perméabilité à la vapeur d'eau relative et la perméabilité à l'air vaut 0,720. Par conséquent, la perméabilité à l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau sont fortement corrélées. Il est à signaler que Banu ÖZGEN et Sevda ALTAŞ [138] ont constaté que les faibles

valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau relative sont observées dans les tricots ayants une grande épaisseur. Et ils ont ajouté que le tricot le plus perméable à l'air a une valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau relative la plus élevée. Dans notre étude, nous remarquons que le tricot ayant une perméabilité à la vapeur d'eau la plus importante est le tricot *JCF*, qui a la meilleure valeur de perméabilité à l'air.

Tableau 27: Perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>
<i>JCF</i>	88	<i>PFF</i>	83.1
σ	0.9	σ	0.9
<i>JFF</i>	85.8	<i>CCF</i>	86.3
σ	0.6	σ	1.7
<i>FCF</i>	87.4	<i>CFF</i>	84.8
σ	0.7	σ	1.4
<i>FFF</i>	85.4	<i>LCF</i>	84.3
σ	1	σ	0.7
<i>PCF</i>	80.2	<i>LFF</i>	79.4
σ	0.5	σ	0.6

Comme l'air, la vapeur d'eau peut traverser, à un grand débit, la couche textile à travers les ouvertures entre les fils, qui constituent également les macro-pores. Différemment au flux d'air passant perpendiculairement à travers le textile, la vapeur d'eau peut diffuser aussi d'une face à l'autre au moyen des micro-canaux entre les fibres. La relation entre la capacité d'une structure textile à permettre le passage de l'air avec son aptitude à transférer de la vapeur d'eau est bien étudié dans la littérature. M. Manshahia et A. Das [174] ont conclu que la perméabilité à l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau relative sont significativement corrélées.

L'ajout des charges à une structure tricoté en jersey simple contribue à l'augmentation de sa résistance au passage de la vapeur d'eau perpendiculairement à travers son épaisseur. Cela peut être dû à la présence des zones, précédemment nommées « des zones de détention », qui empêchent le passage fluant des molécules d'eau et provoque le freinage du processus global du transfert de masse. Les flottées n'ont pas aucun effet significatif sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

Tableau 28: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative</i>	Valeur de F	40.77	16.41	12.27
	Valeur de p	0.000*	0.001*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Les résultats de l'analyse ANOVA présentés dans le Tableau 28 montrent que l'interaction entre la structure et le cycle de teinture est significative. Alors, la couleur de teinture a une influence significative selon le type de liage.

La comparaison multiple a montré que les différences significatives entre les couleurs existent dans les structures *P* et *L*. La structure exerce une influence significative sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Selon le test post hoc de Tukey, l'ajout des flottés n'a aucun effet sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Mais d'un autre côté, l'ajout des mailles chargées influence négativement et significativement la perméabilité à la vapeur d'eau relative. En fait, les cinq structures ont été classées en deux groupes dont la différence entre les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative est significative. Le groupe A contient les structures *J*, *F* et *C* et le groupe B contient les structures *P* et *L*.

En comparant la valeur de la perméabilité à la vapeur d'eau relative entre les deux couleurs de chaque structure, nous trouvons que les tricots en couleurs noirs ont des valeurs moins importantes que les tricots jaunes. L'épaisseur de la structure textile joue un rôle important dans le processus de transfert de masse sous forme gazeuse.

Les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis dans les deux couleurs ne suivent pas la même évolution des valeurs du temps de séchage. La capacité de transmission de la vapeur d'eau a une influence plus importante sur le temps de séchage des structures épaisses que sur le temps de séchage des structures minces. Ceci peut être expliqué par le recul du front d'évaporation profondément à l'intérieur de la structure textile lors du séchage. La capacité de l'étoffe à diffuser de l'eau évaporé de l'intérieur de la structure à l'environnement extérieur est cruciale dans la détermination de la cinétique d'évaporation. Plus le chemin d'échappement de l'eau vaporisé à l'intérieur de la structure est facile, plus le temps global de séchage est court. Myron J. Coplan [111] a conclu que les étoffes textiles épaisses peuvent montrer une diminution dans le taux de séchage, car le taux global de migration de la vapeur d'eau vers les limites périphériques reflète finalement la grande distance de déplacement du centre vers l'extérieur de la structure. Selon le test de corrélation de Pearson, le temps de séchage est modérément corrélé à la perméabilité relative à la vapeur d'eau avec un coefficient égal à -0,636.

3.5. Propriétés thermiques

3.5.1. Conductivité thermique

Les valeurs de la conductivité thermique des tricots finis dans les deux couleurs sont présentées dans le Tableau 29.

Tableau 29 : Conductivité, absorptivité et résistivité thermique des tricots.

<i>Réf</i>	<i>Conductivité thermique</i> ($mW.m^{-1}.K^{-1}$)	<i>Absorptivité thermique</i> ($W.m^{-2}.s^{1/2}.K^{-1}$)	<i>Résistivité thermique</i> ($mK.W^{-1}.m^{-2}$)
<i>JCF</i>	55.56	102.76	8.08
σ	1.7	6.39	0.4
<i>JFF</i>	52.92	103.3	8.26
σ	1.76	6.5	0.33
<i>FCF</i>	51	105.56	8.54
σ	1.36	7.17	0.4
<i>FFF</i>	50.53	106.86	8.43
σ	1.59	8.2	0.32
<i>PCF</i>	49.48	93.7	11.56
σ	0.75	5.93	0.3
<i>PFF</i>	48.28	95.23	11.1
σ	0.31	5.9	0.37
<i>CCF</i>	48.32	103.96	10.48
σ	0.83	6.52	0.3
<i>CFE</i>	40.96	105.26	10.24
σ	0.78	6.3	0.35
<i>LCF</i>	49.72	95.5	10.82
σ	1.14	3.11	0.4
<i>LFF</i>	48.1	98.65	11.4
σ	1.06	6	0.54

Nous remarquons que l'ajout des mailles flottées et des charges réduit la conductivité thermique des tricots jersey simple dans les deux couleurs. Pour les tricots ayant des mailles chargées, l'augmentation de l'épaisseur est la raison principale de la diminution de la conductivité thermique. L'augmentation de l'épaisseur de la matière textile permet d'emprisonner plus d'air et empêche le passage de la chaleur de la couche interne vers la couche externe du tricot. Ce résultat est confirmé par les résultats trouvés pour les tricots jersey qui ont la meilleure conductivité thermique. Encore, dans la structure jersey, les fils de tricotage sont liés ensemble par plusieurs points de contacts, comparé aux autres structures. En effet, Ali Afzal et al. [182] ont conclu qu'une augmentation de la matière fibreuse dans un volume, ayant une conductivité thermique supérieure à celle de l'air, augmente leurs points de contact les uns avec les autres et influence le flux de chaleur traversant la couche textile. L'influence de la structure sur la conductivité thermique est aussi prouvée statistiquement, d'après l'analyse de la variance indiquée dans le Tableau 30, nous constatons que la structure est le paramètre le plus influent pour la conductivité thermique.

Tableau 30: Résultats de l'analyse ANOVA de la conductivité thermique.

<i>Facteur</i>	<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Conductivité thermique</i>	Valeur de F	38.42	9.23
	Valeur de p	0.000*	0.004*
			2.57
			0.053

*: Statistiquement significatif.

L'analyse post hoc a montré que la différence entre la conductivité thermique de la structure jersey et les autres structures est significative. Le Tableau 31 présente la comparaison par paires effectuée entre la structure **J** et les autres structures.

Les tricots noirs, dans toutes les structures, présentent des valeurs de conductivité thermique moins importantes que les tricots jaunes. Cette variation peut être en liaison avec la différence dans le pouvoir d'absorbance et de réflexion des ondes électromagnétiques par les molécules chromatiques dans la fibre. Ces ondes exercent une influence sur le comportement thermique de la structure textile. Comme il est indiqué dans le Tableau 30, l'effet de la couleur sur la conductivité thermique est significatif, alors que, l'effet de l'interaction de la structure et de la couleur sur la conductivité thermique est faible.

Tableau 31: Comparaison par paires de la conductivité thermique par rapport à la structure **J**.

	<i>Valeur de p ajustée</i>			
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>L</i>
J	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

3.5.2. Absorptivité thermique

Les valeurs de l'absorptivité thermique sont présentées dans le Tableau 29. Nous observons que l'ajout des flottées engendre une augmentation de l'absorptivité thermique du tricot jersey simple. Tandis que, l'ajout des charges exerce une influence négative sur l'absorptivité thermique. Ce phénomène peut être justifié par la présence des reliefs qui produisent moins de points de contact de la surface textile et par la suite la création d'une interface de contact minimale par laquelle le transfert de chaleur transitoire par conduction s'effectue, ce résultat est confirmé par Marie José Pac et al. [155]. Ils ont lié l'absorptivité thermique des tricots avec la rugosité de la surface. Ils ont montré qu'une étoffe textile plus rugueuse a une surface de contact plus petite ce qui entraîne une diminution dans l'absorptivité thermique et finalement l'étoffe textile semble plus chaude au premier contact. D'autre part, les flottées offrent plus de surface de contact qu'une maille simple et plus qu'une maille chargée aussi, ce qui confère finalement au tricot une bonne absorptivité thermique. Les tricots en jersey piqué (**PCF** et **PPF**) ont les valeurs d'absorptivité thermique les plus faibles et les tricots avec flottées (**FCF** et **FFF**) ont les valeurs d'absorptivité thermique les plus importantes. L'analyse statistique ANOVA a révélé que la structure exerce une influence significative sur l'absorptivité thermique. Le Tableau 32 présente les résultats de cette analyse.

La couleur a un effet significatif sur l'absorptivité thermique. Les tricots noirs ont des valeurs supérieures à celles des variantes jaunes. L'interaction de la structure avec la couleur a aussi un effet significatif sur l'absorptivité thermique. De ce fait, on trouve que la différence entre les deux variantes est plus importante dans les structures *C*, *P* et *L*.

Tableau 32: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Absorptivité thermique</i>	Valeur de F	33.51	52.57	25.73
	Valeur de p	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

3.5.3. Résistivité thermique

Les valeurs de la résistivité thermique mesurées sont indiquées dans le Tableau 29. Les tricots *CFE*, *CCF*, *LCF*, *LFF*, *PFF* et *PCF* ont des valeurs de résistivité thermique les plus importantes. Ces tricots sont les tricots les plus épais et ayant les plus grandes valeurs de LFA. Parmi les tricots mentionnés, nous remarquons que la valeur minimale de résistivité existe dans le tricot *CFE*, qui est le moins épais. D'autre part, la valeur maximale est obtenue pour le tricot *PCF*, qui le plus épais. Selon l'analyse de corrélation, la résistivité thermique est trouvée fortement liée à l'épaisseur, avec un coefficient égal à 0.915. De plus, la résistivité thermique est liée à la LFA, avec un coefficient égal à 0.692.

Des travaux de recherches précédents ont montré aussi ces relations. N. YOON et A. BUCKLEY [51] ont constaté que l'épaisseur de la structure textile est le paramètre déterminant de la résistivité thermique. Y. Jhanji et al. [31] ont montré que la résistivité thermique est affectée par la conductivité thermique des fibres constitutives et de l'épaisseur de la structure. Étant donné que le volume d'air enfermé est beaucoup plus élevé que le volume de fibres, l'isolation dépend davantage de l'épaisseur du matériau que du type de la fibre. Les structures textiles avec des grandes LFA ont plus d'espaces dans les interstices emprisonnant l'air donc une résistance thermique accrue en raison d'une résistance thermique importante de l'air. Ali Afzal et al. [182] ont démontré également que la LFA est directement proportionnelle à la résistivité thermique.

Nous pouvons conclure que l'ajout des flottées et des charges à une structure textile tricotée en jersey simple affecte positivement son isolation thermique. Cette conclusion est justifiée aussi par les résultats de l'analyse statistique indiqués dans le Tableau 33, qui suggère que la structure a une influence significative sur la résistivité thermique. L'interaction entre la structure et la couleur exerce une influence significative sur la résistivité. Les mêmes

interprétations sont trouvées par E. Öner et A. Okur [183] qui ont constaté que la résistivité thermique des tricots ayant des flottées est inférieure à celle des tricots ayant des charges.

Tableau 33: Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Couleur</i>	<i>Structure*Couleur</i>
<i>Résistivité thermique</i>	Valeur de F	141.39	0.01	2.70
	Valeur de p	0.000*	0.922	0.044*

*: Statistiquement significatif.

3.6.Synthèse

3.6.1. Temps de séchage

- ✓ L'ajout des charges à l'étoffe textile tricotée provoque une augmentation du temps de séchage et l'ajout des mailles flottées n'a pas d'influence significative sur le pouvoir de séchage.
- ✓ Les variantes noires possèdent des temps de séchage significativement plus courts que les variantes jaunes.

3.6.2. Perméabilité à l'air

- ✓ Les tricots les moins perméables à l'air sont les tricots ayant des mailles chargées.
- ✓ La structure a un effet significatif sur la perméabilité à l'air. Tandis que, la couleur n'a pas d'influence significative.

3.6.3. Propriétés de gestion de l'humidité

- ✓ Ajouter des charges dans les tricots provoque un ralentissement de la vitesse de mouillage.
- ✓ La structure exerce une influence significative sur le temps de mouillage et le taux d'absorption. La maille chargée exerce une influence significative sur le temps de mouillage tandis que, la maille flottée n'a pas d'effet.
- ✓ Les tricots noirs ont des temps de mouillage plus courts que les tricots jaunes.
- ✓ La couleur a un effet significatif sur le taux d'absorption selon le type du liage.
- ✓ Le temps de séchage est fortement corrélé avec le temps de mouillage.
- ✓ Les structures ayant des mailles chargées ont des vitesses de propagation les plus faibles.
- ✓ La structure exerce une influence considérable sur la vitesse de propagation.
- ✓ Les variantes jaunes ont des vitesses de propagation moins importantes que les variantes noires.
- ✓ L'analyse de la variance indique que la couleur a une influence significative sur la vitesse de propagation. De plus, il y a une interaction significative entre la structure et la couleur.
- ✓ Il existe une forte corrélation négative entre le temps de séchage et la vitesse de propagation.

- ✓ Les structures incorporées par des mailles chargées présentent des valeurs du AOWT plus importantes que les autres structures.
- ✓ La structure exerce une influence significative sur l'indice de transport unidirectionnel cumulé.
- ✓ L'AOWT des variantes jaunes est supérieur à celle des variantes noires.
- ✓ Dans la majorité des structures, la variante jaune a une valeur de la capacité de gestion de l'humidité globale plus importante que la variante noire.

3.6.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

- ✓ L'ajout des charges contribue à l'augmentation de la résistance au passage de la vapeur d'eau.
- ✓ L'épaisseur des tricots est négativement corrélée avec la perméabilité à la vapeur d'eau relative.
- ✓ La perméabilité à l'air et la perméabilité à la vapeur d'eau sont fortement corrélées.
- ✓ Les charges influent d'une manière significative la perméabilité à la vapeur d'eau relative.
- ✓ Les tricots noirs ont une perméabilité à la vapeur d'eau relative la moins importante.
- ✓ La capacité de transmission de la vapeur d'eau exerce une influence plus importante sur le temps de séchage des structures épaisses que sur le temps de séchage des structures minces.

3.6.5. Propriétés thermiques

- ✓ L'ajout des mailles flottées et des charges réduit la conductivité thermique des tricots jersey.
- ✓ Les tricots noirs présentent des valeurs de conductivité thermique les moins importantes.
- ✓ L'effet de la couleur sur la conductivité thermique est significatif, alors que, l'effet de l'interaction de la structure et de la couleur sur la conductivité thermique est faible.
- ✓ L'ajout des flottées engendre une augmentation de l'absorptivité thermique du tricot jersey simple. Tandis que l'ajout des charges l'affecte négativement.
- ✓ Les tricots noirs ont une absorptivité thermique supérieure à celle des variantes jaunes.
- ✓ La résistivité thermique est liée à l'épaisseur et à la LFA.
- ✓ L'ajout des flottées et des charges affecte positivement l'isolation thermique des tricots.
- ✓ La structure exerce une influence significative sur la résistivité thermique.

4. Influence des procédés de finissage sur les paramètres du confort vestimentaire

Dans cette partie de l'étude, nous envisageons d'étudier l'influence des procédés de finissage sur les paramètres du confort vestimentaire. Dans ce contexte, nous avons utilisé le procédé de finissage par épuisement et nous souhaitons comparer les résultats obtenus avec ce procédé avec ceux obtenus par le procédé de finissage par foulardage.

4.1. Temps de séchage

Les valeurs du temps de séchage des tricots sont représentées dans le Tableau 34.

Tableau 34: Temps de séchage des tricots finis par les deux méthodes.

<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>	<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>
<i>JCF</i>	36	<i>JCE</i>	32
σ	0	σ	0
<i>JFF</i>	35	<i>JFE</i>	38
σ	1.41	σ	0
<i>FCF</i>	38	<i>FCE</i>	34
σ	0	σ	0
<i>FFF</i>	34	<i>FFE</i>	40
σ	0	σ	0
<i>PCF</i>	48	<i>PCE</i>	42
σ	0	σ	0
<i>PPF</i>	45	<i>PFE</i>	56
σ	0	σ	0

Le temps de séchage des variantes jaunes finis par épuisement est légèrement inférieur au temps de séchage des variantes jaunes finis par foulardage. Cependant, pour les variantes noires, une tendance opposée est observée. La différence la plus significative se trouve entre les tricots *PPF* et *PFE*, qui est égale à 11 minutes. Dans chacune des structures étudiées, le tricot jaune fini par épuisement a un temps de séchage le plus court parmi les autres variantes. Par exemple, le tricot *JCE* a un temps de séchage le plus court parmi les tricots de la structure jersey **J**, tel que *JCF*, *JFE* et *JFF*.

L'écart entre le temps de séchage des tricots finis par les deux méthodes est plus accentué pour les tricots noirs que les tricots jaunes. Le tricot *JC* fini par épuisement possède le meilleur pouvoir de séchage. L'analyse de la variance a montré que l'interaction entre la couleur et le type de finissage est statistiquement significative. Donc, le type de finissage affecte significativement le temps de séchage suivant la nuance de couleur. Le Tableau 35 présente les résultats de l'analyse ANOVA.

Tableau 35 : Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.

<i>Facteur</i>	<i>Type de finissage</i>	<i>Couleur</i>	<i>Type de finissage*Couleur</i>
<i>Temps de séchage</i>	Valeur de F	0.15	1.32
	Valeur de p	0.706	0.264
			0.042*

*: Statistiquement significatif.

La différence dans les valeurs du temps de séchage peut être dû à la différence dans l'hydrophilie des supports à la suite de la modification de la technique d'application de l'agent

hydrophile. Cette hypothèse va être évaluée par l'interprétation des résultats obtenu par le « Moisture Management Tester ».

4.2.Perméabilité à l'air

Les valeurs de la perméabilité à l'air des tricots finis sont présentées dans le Tableau 36.

Tableau 36: Perméabilité à l'air des tricots finis.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>
<i>JCF</i>	2371	<i>JCE</i>	2273
<i>σ</i>	83.3	<i>σ</i>	81.8
<i>JFF</i>	2316	<i>JFE</i>	2447
<i>σ</i>	107	<i>σ</i>	81.1
<i>FCF</i>	2127	<i>FCE</i>	2067
<i>σ</i>	51.7	<i>σ</i>	49.5
<i>FFF</i>	2101	<i>FFE</i>	2354
<i>σ</i>	46.3	<i>σ</i>	72.9
<i>PCF</i>	1622	<i>PCE</i>	1552
<i>σ</i>	62.3	<i>σ</i>	34.9
<i>PFF</i>	1869	<i>PFE</i>	1890
<i>σ</i>	93	<i>σ</i>	49

Les valeurs de la perméabilité à l'air des tricots finis par épuisement sont supérieures aux valeurs des tricots finis par foulardage dans les variantes noires. Le type de finissage exerce une influence statistiquement significative sur la perméabilité à l'air selon la nuance du couleur. L'interaction entre la couleur et le type de finissage est statistiquement significative. Le Tableau 37 présente les résultats de l'analyse ANOVA à deux facteurs.

Tableau 37: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.

<i>Facteur</i>	<i>Type de finissage</i>	<i>Couleur</i>	<i>Type de finissage*Couleur</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	<i>Valeur de F</i>	0.34	10.03
	<i>Valeur de p</i>	0.562	0.002*

*: Statistiquement significatif.

L'écart entre la perméabilité à l'air des tricots par les deux méthodes de finissage est variable et il peut être expliqué par les diverses altérations dans les propriétés structurales, principalement la LFA, l'épaisseur et la densité des mailles. Dans le cas de la structure **J**, nous trouvons que *JFE* est plus perméable que *JFF* à cause d'une augmentation de la valeur de la LFA avec des densités de mailles égales. Asta Bivainytė et Daiva Mikučionienė [184] ont montré que la LFA est l'une des propriétés structurales qui détermine la taille des macro-pores à travers lesquels l'air traverse la structure textile tricotée, alors une augmentation de la LFA entraîne une augmentation de la perméabilité à l'air.

En comparant les tricots *JCE* et *JFE*, nous remarquons que la LFA du tricot *JCE* (25.6 cm) est plus importante que la LFA du tricot *JFE* (23 cm) mais il est moins perméable à l'air avec un écart égale à 175 mm/s. Ce résultat est expliqué par l'augmentation de la LFA accompagné par une augmentation de la densité des mailles. La courbure du fil de tricotage, avec une valeur de LFA bien déterminée, forme la maille en créant une zone centrale vide. L'augmentation de la LFA, à un certain seuil, avec une densité des mailles constante entraîne la formation d'une zone centrale plus grande à travers laquelle le flux d'air passant perpendiculairement est plus important. Dans le cas où la LFA augmente simultanément avec une augmentation de la densité des mailles, la portion du fil de tricotage présente dans une unité de surface sera plus importante comparée par la quantité du fil de tricotage présente à une densité de maille inférieure. Cet excès du fil provoque un blocage supplémentaire dans les ouvertures formées par la géométrie de la maille et engendre la diminution dans la perméabilité à l'air. Des résultats similaires ont été trouvés par R. Tugrul Ogulata et Serin Mavruz [185], ils ont conclu qu'une augmentation de la densité des mailles, de la LFA et du diamètre du fil provoquent une réduction dans la taille des macro-pores et par conséquent une diminution dans la perméabilité à l'air.

L'augmentation simultanée de la densité des mailles et de la LFA peut être traduite par une augmentation de la masse surfacique du tricot. De ce fait, l'augmentation de la masse surfacique augmente le pourcentage de la masse fibreuse par unité de surface. Cette augmentation génère une régression dans la perméabilité à l'air de la structure textile. La masse surfacique est négativement et fortement associée à la perméabilité à l'air, avec un coefficient de Pearson égal à -0.923.

4.3. Propriétés de gestion de l'humidité

4.3.1. Propriétés du mouillage

Les propriétés liées au mouillage des tricots jaunes et noirs finis, tel que le temps de mouillage et le taux d'absorption de la face supérieure et de la face inférieure, sont présentées dans le Tableau 38.

Le temps de mouillage des tricots finis par les deux méthodes est presque identique dans les deux couleurs et sur les deux faces de tricot. Les tricots finis par foulardage ont montré un taux d'absorption plus important que les autres tricots. Cette constatation est expliquée par le fait que les tricots finis par épuisement sont légèrement plus compacts que les tricots finis par foulardage.

Tableau 38: Propriétés de mouillage des tricotés finis dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Temps de mouillage du haut (s)</i>	<i>Temps de mouillage du bas (s)</i>	<i>Taux d'absorption du haut (%/s)</i>	<i>Taux d'absorption du bas (%/s)</i>
<i>JCF</i>	2.06	2.04	67.20	82
<i>σ</i>	0.11	0.09	3.33	1.42
<i>JCE</i>	2	2	62.95	77.4
<i>σ</i>	0.08	0.08	3.12	1.08
<i>JFF</i>	1.98	2.00	68.90	82.4
<i>σ</i>	0.07	0.08	3.17	1.4
<i>JFE</i>	2.04	2.04	65.32	79.4
<i>σ</i>	0.07	0.07	4.43	1.25
<i>FCF</i>	2.04	2.09	71.18	81.17
<i>σ</i>	0.12	0.08	3.03	1.56
<i>FCE</i>	2	1.94	67.92	77.6
<i>σ</i>	0.08	0.08	3.14	1.52
<i>FFF</i>	1.94	1.98	75.60	82.7
<i>σ</i>	0.04	0.04	1.85	0.7
<i>FFE</i>	1.96	1.96	71.72	80.84
<i>σ</i>	0.06	0.06	2.59	3.04
<i>PCF</i>	2.24	2.24	64.12	72.13
<i>σ</i>	0.11	0.14	3.18	4.09
<i>PCE</i>	2.2	2.32	62.99	71.6
<i>σ</i>	0.07	0.07	2.51	1.77
<i>PFF</i>	2.19	2.20	65.03	73.94
<i>σ</i>	0.06	0.06	3.66	2.8
<i>PFE</i>	2.2	2.26	63.47	70.45
<i>σ</i>	0.1	0.1	1.64	1.74

Plus la structure est compacte plus son taux d'absorption est faible. La diminution des espaces entre les fils provoque une réduction dans le pouvoir d'absorption du tricot. Les tricotés finis par foulardage ont une densité des mailles inférieure à celle des tricotés finis par époussetage. Alors, il existe plus d'espace vide dans lesquels le liquide peut être stocké. Le type de finissage admet une influence significative sur le taux d'absorption. Les résultats de l'analyse ANOVA sont donnés dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Résultats de l'analyse ANOVA du taux d'absorption du haut et du bas.

<i>Facteurs</i>	<i>Type de finissage</i>	<i>Couleur</i>	<i>Type de finissage*Couleur</i>
<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	6.4	2.21
	<i>Valeur de p</i>	0.014*	0.143
<i>Taux d'absorption du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	4.91	0.47
	<i>Valeur de p</i>	0.031*	0.494

*: Statistiquement significatif.

Les propriétés de mouillage ont généralement une forte relation avec le temps de séchage. Dans cette étude, le temps de mouillage du haut et du bas et le taux d'absorption du bas sont trouvés statistiquement corrélés avec le temps de séchage.

Le Tableau 40 indique les coefficients de Pearson entre les propriétés de mouillage et le temps de séchage.

Tableau 40: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.

	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	0.802	0.78	-0.44	-0.759

4.3.2. Propriétés de propagation

Les propriétés de gestion de l'humidité liée à la propagation sont le rayon maximal de propagation et la vitesse de propagation. Ces propriétés sont présentées dans le Tableau 41.

Tableau 41: Propriétés de propagation des tricots finis dans les deux couleurs.

<i>Réf</i>	<i>Rayon de propagation maximal du haut (mm)</i>	<i>Rayon de propagation maximal du bas (mm)</i>	<i>Vitesse de propagation du haut (mm/s)</i>	<i>Vitesse de propagation du bas (mm/s)</i>
<i>JCF</i>	30	30	9.02	8.83
σ	0	0	0.32	0.32
<i>JCE</i>	30	30	8.99	8.77
σ	0	0	0.3	0.12
<i>JFF</i>	30	30	9.56	9.34
σ	0	0	0.3	0.24
<i>JFE</i>	30	30	9.07	8.87
σ	0	0	0.4	0.4
<i>FCF</i>	30	30	9.1	9.01
σ	0	0	0.26	0.16
<i>FCE</i>	30	30	9.07	8.98
σ	0	0	0.1	0.11
<i>FFF</i>	30	30	9.3	9.02
σ	0	0	0.26	0.18
<i>FFE</i>	30	30	9.11	8.94
σ	0	0	0.18	0.16
<i>PCF</i>	28.6	29	6.84	6.73
σ	2	2	0.5	0.5
<i>PCE</i>	30	30	6.54	6.41
σ	0	0	0.3	0.22
<i>PFF</i>	30	30	6.87	6.88
σ	0	0	0.31	0.27
<i>PFE</i>	30	30	6.2	6.32
σ	0	0	0.21	0.25

Le rayon de propagation de tous les tricots est identique et nous observons que les tricots finis par épuisement ont des vitesses de propagation légèrement inférieures à celles des tricots finis par foulardage. Le tricot *PCE* montre une vitesse de propagation inférieure à celle du tricot *PCF* et il a présenté un rayon de propagation maximal inférieur.

La faible différence observée dans le pouvoir de propagation peut être expliquée par l'hydrophilie supérieure des tricots finis par épuisement par rapport aux tricots finis par foulardage. Yang Yang et al. [123] ont constaté que la présence d'un nombre important de groupes absorbants à la surface de la fibre, ayant une grande affinité à l'eau, freine le transfert de l'eau liquide le long des canaux capillaires formés par les fibres. Apurba Das et al. [186] ont trouvé que l'augmentation du nombre de groupes hydrophiles influe sur le comportement de transmission de l'humidité liquide du matériau. Ceci a été expliqué par le pouvoir absorbant supérieur de la fibre de Viscose qui forme des liaisons avec l'eau lorsqu'il atteint le capillaire, ce qui inhibe la propagation capillaire dans tous les sens. Tandis que pour la fibre de Polyester, qui est moins hydrophile que la fibre de viscose, elle n'a pas la capacité de former de nombreuses liaisons avec les molécules d'eau et en raison de son aptitude au mouillage, le liquide est entraîné très facilement dans les micros-canaux, ce qui offre une forte capacité de propagation capillaire.

Dans notre cas, la petite différence dans l'hydrophilie des tricots est générée par la différence dans la méthode d'application de l'agent hydrophile ce qui engendre un faible écart dans la capacité de propagation capillaire. L'analyse de corrélations entre le temps de séchage et les propriétés de propagation, notamment la vitesse de propagation, a montré qu'il existe une forte relation négative entre les deux. Donc, avec une vitesse de propagation élevée, le liquide peut s'étaler sur plus de surface par unité du temps. Une grande surface mouillée entraîne un échange de masse important qui donne à un séchage rapide. Les coefficients de Pearson sont indiqués dans le Tableau 42.

Tableau 42: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.

	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	-0.865	-0.849

4.3.3. AOWT et OMMC

Les résultats de l'indice de transport unidirectionnel cumulé (AOWT) et la capacité de gestion de l'humidité globale (OMMC) des tricots sont présentés dans le Tableau 43.

L'indice de transport unidirectionnel cumulé des tricots évolue de la même manière dans chaque structure sauf dans la structure *F*. Dans la structure *J*, les tricots *JCE* et *JFE* ont des indices supérieurs respectivement à ceux de *JCF* et *JFF*. Dans la structure *P*, les tricots *PCE* et *PEF* ont des indices inférieurs respectivement à ceux de *PCF* et *PEF*. En revanche, dans la structure *F*, Le tricot *FCE* montre un indice inférieur à celui de *FCF* tandis que *FCE* montre un indice supérieur à celui de *FFF*. Ce résultat peut être dû à la grande différence dans la densité

des mailles. L'existence d'un nombre élevé des mailles favorise la propagation horizontale par rapport à la propagation transversale ce qui empêche le passage facile de la sueur de la face supérieure à la face inférieure. La densité des mailles de *FCE* est plus grande que la densité des mailles de *FCF* tandis que le tricot *FFE* est moins dense que le tricot *FFF*. La densité des mailles affecte négativement l'indice de transport unidirectionnel cumulé. Une forte corrélation négative est trouvée entre ces deux paramètres, avec un coefficient de Pearson égal à -0.730.

Tableau 43: AOWT et OMMC des tricots finis jaunes et noirs.

<i>Réf</i>	<i>AOWT</i> (%)	<i>OMMC</i>	<i>Réf</i>	<i>AOWT</i> (%)	<i>OMMC</i>
<i>JCF</i>	97.87	0.61	<i>JCE</i>	101.57	0.62
σ	2.59	0.06	σ	1.87	0.02
<i>JFF</i>	91.08	0.61	<i>JFE</i>	111.09	0.63
σ	3.44	0.02	σ	8.11	0.02
<i>FCF</i>	99.93	0.63	<i>FCE</i>	81.24	0.59
σ	4.25	0.02	σ	5.48	0.02
<i>FFF</i>	63.02	0.56	<i>FFE</i>	72.52	0.59
σ	3.17	0.01	σ	5.46	0.03
<i>PCF</i>	113.54	0.61	<i>PCE</i>	110.52	0.61
σ	6.2	0.02	σ	3.84	0.01
<i>PPF</i>	110.35	0.59	<i>PFE</i>	106.76	0.57
σ	6.54	0.03	σ	8.19	0.02

L'indice de transport unidirectionnel cumulé des tricots évolue de la même manière dans chaque structure sauf dans la structure *F*. Dans la structure *J*, les tricots *JCE* et *JFE* ont des indices supérieurs respectivement à ceux de *JCF* et *JFF*. Dans la structure *P*, les tricots *PCE* et *PPF* ont des indices inférieurs respectivement à ceux de *PCF* et *PPF*. En revanche, dans la structure *F*, Le tricot *FCE* montre un indice inférieur à celui de *FCF* tandis que *FFE* montre un indice supérieur à celui de *FFF*. Ce résultat peut être dû à la grande différence dans la densité des mailles. L'existence d'un nombre élevé des mailles favorise la propagation horizontale par rapport à la propagation transversale ce qui empêche le passage facile de la sueur de la face supérieure à la face inférieure. La densité des mailles de *FCE* est plus grande que la densité des mailles de *FCF* tandis que le tricot *FFE* est moins dense que le tricot *FFF*. La densité des mailles affecte négativement l'indice de transport unidirectionnel cumulé. Une forte corrélation négative est trouvée entre ces deux paramètres, avec un coefficient de Pearson égal à -0.730.

La capacité globale de gestion de l'humidité évolue de la même façon que l'indice de propagation unidirectionnel cumulé, avec des valeurs très rapprochées ou égales.

4.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots fabriqués et finis par les deux procédés est donnée dans le Tableau 44.

Tableau 44: Perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>
<i>JCF</i>	88	<i>JCE</i>	84
<i>σ</i>	0.9	<i>σ</i>	0.4
<i>JFF</i>	85.8	<i>JFE</i>	81
<i>σ</i>	0.6	<i>σ</i>	0.4
<i>FCF</i>	87.4	<i>FCE</i>	85.6
<i>σ</i>	0.7	<i>σ</i>	0.4
<i>FFF</i>	85.4	<i>FFE</i>	82.5
<i>σ</i>	1	<i>σ</i>	0.6
<i>PCF</i>	80.2	<i>PCE</i>	78.6
<i>σ</i>	0.5	<i>σ</i>	0.9
<i>PFF</i>	83.1	<i>PFE</i>	80.2
<i>σ</i>	0.9	<i>σ</i>	0.5

La perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis par épuisement est inférieure à la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis par foulardage. Ce résultat est confirmé par l'analyse de la variance qui a révélé que le type de finissage a une influence significative sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Les résultats de l'analyse ANOVA sont présentés dans le Tableau 45.

Tableau 45: Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

<i>Facteur</i>		<i>Type de finissage</i>	<i>Couleur</i>	<i>Type de finissage*Couleur</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	<i>Valeur de F</i>	11.6	1.11	0.35
	<i>Valeur de p</i>	0.002*	0.299	0.559

*: Statistiquement significatif.

La diminution de la perméabilité relative à la vapeur d'eau des tricots finis par épuisement peut être attribué à l'existence élevée des groupements fonctionnels, comparé aux tricots finis par foulardage. La présence d'un grand nombre de sites de liaisons chimiques à la suite d'un traitement hydrophile par épuisement est dû au temps alloué à l'agent hydrophile pour se fixer sur la matière textile et son aptitude à pénétrer dans les zones inter-fibres, couvrant ainsi la totalité de la surface de la fibre. D'une part, le temps réactionnel dans le procédé de finissage par épuisement est nettement supérieur à celui du procédé de finissage par foulardage.

D'autre part, et contrairement au traitement de finissage par épuisement et durant le finissage par foulardage, le tricot passe dans le bain à une vitesse moyenne de 20 m/min pour

fixer l'agent hydrophile, puis l'exprimage est effectué pour forcer la solution à pénétrer dans la structure textile fibreuse et pour éliminer l'excès de liquide. La création des sites de liaison dans ce cas est effectuée sur le contour des fils de tricotage et non pas à l'intérieur de la structure enchevêtrées du fil. La présence d'un nombre relativement important de groupements provoque la production excessive du phénomène de sorption-désorption lors du passage des molécules d'eau à travers la matière textile ce qui engendre un ralentissement dans le processus global de transfert de masse qui se déroule principalement par diffusion. Encore, à travers ces liaisons, le textile conserve une portion d'eau dans sa structure liée aux groupements fonctionnels. Finalement, la quantité de vapeur d'eau qui traverse la couche textile dans un intervalle de temps est restreinte et la perméabilité à la vapeur d'eau est réduite.

Mounir Hassan et al. [11] ont trouvé que l'échantillons en 100% Polyester est plus perméable à la vapeur d'eau car il ne retient pas d'eau lors du passage de la vapeur, étant donné que le polyester est hydrophobe. Asta Bivainytė et Daiva Mikučionienė [184] ont trouvé que les étoffes textiles fabriqués avec des fibres synthétiques sont généralement caractérisées par une perméabilité à la vapeur d'eau plus importante que les étoffes fabriquées avec des fibres hydrophiles. Ils ont justifié leurs résultats par le fait qu'une quantité considérable d'humidité traverse la structure à travers les pores et le reste est absorbé par les fibres hydrophiles et il sera progressivement évaporé. Yoo and Hu [187] ont conclu que la capacité du vêtement à transporter la vapeur d'eau de la surface de la peau à l'environnement est plus élevée pour les fibres de Polyester que pour les fibres de coton. Ils ont attribué cette différence au fait que les fibres hydrophiles renaient les molécules d'eau et pouvaient même gonfler ce qui réduit la porosité de la structure. S. Cimilli et al. [122] ont montré que le taux de transfert de la vapeur d'eau est principalement affecté par la perméabilité à l'air et le taux de reprise de la fibre textile.

L'analyse des propriétés structurales met en évidence la relation entre la perméabilité à la vapeur d'eau et le compactage de la matière textile tricotée, en termes de densité des mailles et de LFA. L'augmentation simultanée de la densité des mailles et de la LFA engendre un encombrement additionnel du fil de tricotage ce qui bloque les canaux de diffusion transversale de la vapeur d'eau. Cette tendance est observée dans la majorité des tricots, entre *JCF* et *JCE*, entre *FCE* et *FCF*, entre *PCF* et *PCE* et entre *PFF* et *PFE*. De plus, la capacité d'une étoffe textile à transmettre la vapeur d'eau perpendiculairement à sa surface dépend généralement de la distance parcourue de la face inférieure à la face supérieure. L'épaisseur de l'étoffe textile joue un rôle crucial dans la détermination de sa perméabilité à la vapeur d'eau. Dans notre étude, une forte corrélation négative est trouvée entre l'épaisseur et la perméabilité à la vapeur

d'eau relative, avec un coefficient de Pearson égal à -0.786. Donc, une augmentation de l'épaisseur entraîne une diminution de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

4.5. Propriétés thermiques

4.5.1. Conductivité thermique

Les valeurs de la conductivité thermique des tricots sont présentées dans le Tableau 46.

Tableau 46 : Conductivité, l'absorptivité et la résistivité thermique des tricots finis.

<i>Réf</i>	<i>Conductivité thermique</i> ($mW.m^{-1}.k^{-1}$)	<i>Absorptivité thermique</i> ($W.m^{-2}.s^{1/2}.K^{-1}$)	<i>Résistivité thermique</i> ($mK.W^{-1}.m^{-2}$)
<i>JCF</i>	55.56	102.76	8.08
<i>σ</i>	1.7	6.39	0.4
<i>JCE</i>	54.74	132.76	8.56
<i>σ</i>	1.71	4.35	0.33
<i>JFF</i>	52.92	103.3	8.26
<i>σ</i>	1.76	6.5	0.33
<i>JFE</i>	52.8	144	8.66
<i>σ</i>	1.1	1.6	0.32
<i>FCF</i>	51	105.56	8.54
<i>σ</i>	1.36	7.17	0.4
<i>FCE</i>	50.66	98	9.02
<i>σ</i>	0.59	5.85	0.23
<i>FFF</i>	50.53	106.86	8.43
<i>σ</i>	1.59	8.2	0.32
<i>FFE</i>	50.08	132.73	8.48
<i>σ</i>	0.9	2.7	0.16
<i>PCF</i>	49.48	93.7	11.56
<i>σ</i>	0.75	5.93	0.3
<i>PCE</i>	47.78	101.7	12.5
<i>σ</i>	0.63	5.71	0.25
<i>PFF</i>	48.28	95.23	11.1
<i>σ</i>	0.31	5.9	0.37
<i>PFE</i>	47.56	92.24	11.82
<i>σ</i>	1.4	4.6	0.43

Les valeurs de la conductivité thermique trouvées sont fortement liées aux valeurs du temps de séchage, avec un coefficient de Pearson égal à -0.721. Avec une valeur de conductivité thermique du support textile élevée, le flux de chaleur de l'atmosphère vers le textile augmente et l'échauffement relatif de la zone mouillée au sein de la structure textile se déroule d'une façon plus efficace. Donc, l'augmentation accélérée de la température provoque une évaporation rapide du liquide et par la suite un temps de séchage réduit.

4.5.2. Absorptivité thermique

Les valeurs de l'absorptivité thermique des tricots sont présentées dans le Tableau 46. Il existe des différences significatives entre les valeurs de l'absorptivité thermique. L'application

d'un traitement de finissage par épuisement des tricots jersey *J* engendre une augmentation considérable dans l'absorptivité thermique par rapport l'application d'un traitement de finissage par foulardage. Dans le cas de la structure *F*, l'absorptivité thermique des tricots finis par épuisement est inférieure à celle des tricots finis par foulardage que dans le cas des tricots jaunes. Une évolution opposée est observée dans les tricots piqué *P*, l'absorptivité thermique du tricot *PCE* est supérieure à celle du tricot *PCF* et le contraire est observé entre les tricots de la couleur noire. D'après l'analyse statistique, le type de finissage affecte significativement l'absorptivité thermique selon le type de liage. Les résultats de l'analyse statistique ANOVA sont indiqués dans le Tableau 47.

Tableau 47: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique.

<i>Facteur</i>		<i>Type de finissage</i>	<i>Structure</i>	<i>Type de finissage*Structure</i>
<i>Absorptivité thermique</i>	Valeur de F	16.91	42.92	5.3
	Valeur de p	0.000*	0.000*	0.008*

*: Statistiquement significatif.

4.5.3. Résistivité thermique

Les valeurs de la résistivité thermique des tricots sont présentées dans le Tableau 46. La différence entre la résistivité thermique des tricots finis par les deux méthodes n'est pas significative. Mais, nous trouvons que la résistivité thermique dépend toujours de l'épaisseur de l'étoffe. Une forte corrélation est détectée entre l'épaisseur et la résistivité thermique, avec un coefficient de Pearson égal à 0.937.

La résistivité thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique. Un support qui résiste mieux au flux de chaleur, conduit une petite quantité de chaleur. De ce fait, une résistivité thermique importante provoque une diminution dans le taux d'échange de la chaleur entre le textile et l'extérieur, ce qui engendre un ralentissement dans l'augmentation de la température au niveau du front d'évaporation. Et par conséquence, une diminution dans le taux d'évaporation. Une augmentation dans la résistivité thermique du support textile génère une augmentation dans le temps de séchage. Le coefficient de corrélation trouvé est égal à 0.796.

4.6.Synthèse

4.6.1. Temps de séchage

- ✓ Le temps de séchage des variantes jaunes finis par épuisement est légèrement inférieur au temps de séchage des variantes jaunes finis par foulardage.

- ✓ Le temps de séchage des variantes noires finis par épuisement est supérieur au temps de séchage des variantes noires finis par foulardage.
- ✓ L'écart entre le temps de séchage des tricots finis par les deux méthodes est plus accentué dans les tricots noirs.

4.6.2. Perméabilité à l'air

- ✓ Les valeurs de la perméabilité à l'air des tricots finis par épuisement sont supérieures aux valeurs des tricots finis par foulardage dans les tricots noirs.

4.6.3. Propriétés de gestion de l'humidité

- ✓ Le temps de mouillage des tricots finis par les deux méthodes est sensiblement le même dans les deux couleurs.
- ✓ Les tricots finis par foulardage ont montré un taux d'absorption le plus important.
- ✓ Les tricots finis par épuisement ont des vitesses de propagation légèrement inférieures à celles des tricots finis par foulardage.
- ✓ Il existe une forte relation entre les propriétés de propagation et le temps de séchage.

4.6.4. Perméabilité à la vapeur d'eau

- ✓ La perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis par épuisement est inférieure à la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis par foulardage pour les deux couleurs.

4.6.5. Propriétés thermiques

- ✓ Le procédé de finissage n'a pas d'effet significative sur la conductivité thermique.
- ✓ Le type de finissage affecte significativement l'absorptivité thermique selon le type de liage.

5. Influence des cycles de lavage domestique sur les propriétés du confort vestimentaire

Dans les paragraphes précédents, nous nous sommes intéressés aux propriétés de confort vestimentaire des structures étudiées après les procédés du finissage et de thermo-fixation. Cependant, une vérification des propriétés trouvées s'avère intéressante et utile à la suite de cycles de lavage domestique.

Cette partie de l'étude s'intéresse aux paramètres de confort vestimentaire après cinq (5) cycles de lavage-séchage domestique pour évaluer l'influence de cette action.

5.1. Temps de séchage

Les temps de séchage des tricots lavés ainsi que leurs taux d'augmentation sont présentés dans le Tableau 48.

Tableau 48: Taux d'augmentation du temps de séchage après les cycles de lavage.

<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>	<i>Taux d'augmentation (%)</i>	<i>Réf</i>	<i>Temps de séchage (min)</i>	<i>Taux d'augmentation (%)</i>
<i>JCF</i> σ	62 0	72.22	<i>JCE</i> σ	60 0	87.5
<i>JFF</i> σ	49 1.41	40	<i>JFE</i> σ	54 0	42.1
<i>FCF</i> σ	70 0	84.21	<i>FCE</i> σ	60 0	76.47
<i>FFF</i> σ	55 1.41	58.82	<i>FFE</i> σ	58 1.41	45
<i>PCF</i> σ	93 1.41	93.75	<i>PCE</i> σ	74 0	76.19
<i>PFF</i> σ	63 1.41	40	<i>PFE</i> σ	69 1.41	23.21
<i>CCF</i> σ	60 0	66.66	<i>CCF</i> σ	52 0	52.94
<i>LCF</i> σ	84 0	55.55	<i>LFF</i> σ	65 1.41	41.30

L'augmentation du temps de séchage après les cycles de lavage domestique est observée dans tous les tricots. L'augmentation du temps de séchage des tricots jaunes est plus importante que celle des tricots noirs suivant les deux méthodes de finissage. Le taux d'augmentation le plus important est trouvé dans le tricot *PCF*, avec une valeur égale à 93.75 %. Cependant, le moins important est dans le tricot *PFE*, avec une valeur égale à 23.21 %.

La variation du taux d'augmentation du temps de séchage après les cycles de lavage entre les deux couleurs met en évidence l'étendu de fixation ou de durabilité de l'agent hydrophile de finissage. Les tricots en coloris noir permettent une fixation plus forte de l'agent hydrophile de finissage que les tricots jaunes ce qui leur confère une meilleure durabilité d'utilisation. Les résultats du t-tests démontrent que le processus de lavage domestique a un effet significatif sur le temps de séchage des étoffes tricotés.

Nous pouvons justifier l'augmentation des temps de séchage par l'augmentation de la masse surfacique et de l'épaisseur des tricots. L'analyse de Pearson a démontré une bonne corrélation entre le temps de séchage et la masse surfacique et l'épaisseur, avec des coefficients de Pearson respectivement égales à 0,721 et 0,643.

Les travaux de Levent ÖNAL et al. [58], Canan Saricam et Fatma Kalaoglu [111], Suganthi T and Senthilkumar P [178,188], Elena Onofrei et al. [69], Rita M. Crow et Randall J. Oszcewski [46], Qing Chen et al. [189], et Meltem Yanilmaz and Fatma Kalaoglu [176] confirment l'existence d'une corrélation entre la masse surfacique et l'épaisseur d'une part et le temps de séchage d'autre part. Même si la quantité d'eau appliquée dans les expériences de séchage des travaux mentionnés est différente, l'influence de l'épaisseur sur le temps de séchage est évidente. Si la quantité d'eau est importante, les tricots épais retiennent plus d'eau dans les espaces inter fils et inter fibres que les tricots minces et par conséquent ils sèchent plus lentement. Si la quantité d'eau appliquée est la même, alors le front d'évaporation dans les tricots épais s'étendra plus profondément dans la structure textile et la surface exposée à l'atmosphère sera plus étroite, ce qui diminue le taux d'échange de la masse par rapport aux structures minces.

En outre, l'augmentation de la densité des mailles après les cycles de lavage domestique contribue à l'augmentation des temps de séchage. Y. Jhanji et al. [31] ont montré que les tricots serrés avec une densité de maille élevée prennent plus de temps dans le processus d'évaporation de l'eau comparés aux tricots lâches. Levent ÖNAL et al. [58] ont constaté que les tricots épais ont besoin de plus de temps pour que l'eau sèche complètement. Ils ont également conclu que l'épaisseur des étoffes et le facteur de serrage ont une forte relation avec le taux de séchage des structures tricotées.

A l'exception de la structure *J*, le taux d'augmentation du temps de séchage des tricots finis par épuisement est inférieur à celui des tricots finis par foulardage. Cette constatation peut nous renseigner sur l'efficacité de fixation de l'agent hydrophile sur les tricots après lavage. Le traitement de finissage par épuisement offre une meilleure durabilité du traitement hydrophile.

5.2.Perméabilité à l'air

Les valeurs de la perméabilité à l'air des tricots après les cycles de lavage domestique ainsi leurs taux de diminution sont représentés dans le Tableau 49. L'augmentation de la densité des mailles après les cycles de lavage domestique est la raison principale de la diminution de la perméabilité à l'air des tricots. Selon le t-test, la variation des valeurs de la perméabilité à l'air est trouvée statistiquement significative. Les taux de diminution des tricots finis par épuisement sont similaires à ceux des tricots finis par foulardage dans les deux couleurs.

Le taux de diminution de la perméabilité à l'air après les cycles de lavage domestiques des tricots jaunes est plus élevé que le taux des tricots noires. D'un autre côté, le taux de diminution des valeurs est moins important dans les tricots ayant des boucles chargées, les

structures *P* et *L*. La charge exerce sur la maille ancienne une force supplémentaire qui empêche sa déformation accentuée à la suite des sollicitations mécaniques extérieurs effectuées lors des cycles de lavage domestique. En revanche, la maille flottées est en quelque sorte un segment du fil libre qui peut se déformer par des faibles contraintes mécaniques ou thermiques. Ceci est justifié par le degré de fluctuation des propriétés structurales entre l'état fini et lavé.

Tableau 49: Taux de diminution de la perméabilité à l'air après les cycles de lavage.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>	<i>Taux de diminution (%)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à l'air (mm/s)</i>	<i>Taux de diminution (%)</i>
<i>JCF</i> σ	1582 47.32	33.27	<i>JCE</i> σ	1489 42.5	34.49
<i>JFF</i> σ	1680 61.46	27.58	<i>JFE</i> σ	1621 40.4	33.75
<i>FCF</i> σ	1214 39.21	42.92	<i>FCE</i> σ	1186 31.3	42.62
<i>FFF</i> σ	1367 36.83	34.93	<i>FFE</i> σ	1519 64.5	35.47
<i>PCF</i> σ	1229 23.3	24.22	<i>PCE</i> σ	1239 28.5	20.16
<i>PPF</i> σ	1492 32.93	20.17	<i>PFE</i> σ	1515 43.3	19.84
<i>CCF</i> σ	1400 45.7	36.90	<i>CCF</i> σ	1392 54.32	32.26
<i>LCF</i> σ	1634 38.33	22.11	<i>LCF</i> σ	1711 65.05	17.85

La pénétration de l'air s'effectue principalement par les macro-pores formés par les mailles entrelacées, l'augmentation du nombre de mailles dans une surface bien déterminée, avec une valeur de LFA quasiment constante, signifie l'agrandissement de la surface couverte par le fil de tricotage et par conséquent la réduction de la surface des macro-pores, qui représente l'espace par lequel le flux d'air traverse l'épaisseur du tricot. Cette conclusion est trouvée également dans les travaux de Hüseyin Gazi TÜRKSOY et al. [190], ils ont conclu que l'augmentation de la densité des mailles de la même structure engendre une fermeture supplémentaire des espaces entre les fils et par la suite une diminution du flux d'air traversant perpendiculairement la surface du tricot. De plus, Salome Kyatuheire et al. [173] ont trouvé que la perméabilité à l'air diminue après le lavage et ils ont expliqué cette chute par le rétrécissement de la matière textile tricotée après les traitements humides ce qui réduit la porosité du tricot.

5.3.Perméabilité à la vapeur d'eau

Les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots lavés sont données dans le Tableau 50. Nous observons une diminution des valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative dans la majorité des tricots. L'augmentation de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la densité des mailles est expliquée par l'augmentation de la proportion du fil et de l'air immobile dans une surface donnée ce qui introduit des obstacles supplémentaires aux molécules d'eau pour traverser la couche textile. De ce fait, nous constatons une chute dans la quantité de vapeur d'eau qui peut passer à travers l'assemblage fibreux de la matière textile tricotée.

Tableau 50: Perméabilité à la vapeur d'eau relative après les cycles de lavage.

<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>	<i>Taux de variation (%)</i>	<i>Réf</i>	<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)</i>	<i>Taux de variation (%)</i>
<i>JCF</i>	83.8	-4.77	<i>JCE</i>	83.7	-0.35
<i>σ</i>	0.4		<i>σ</i>	1.2	
<i>JFF</i>	83.5	-2.68	<i>JFE</i>	84.9	4.81
<i>σ</i>	0.6		<i>σ</i>	0.9	
<i>FCF</i>	83	-5.03	<i>FCE</i>	84	-1.86
<i>σ</i>	0.6		<i>σ</i>	0.2	
<i>FFF</i>	85.6	0.23	<i>FFE</i>	84.8	2.78
<i>σ</i>	0.4		<i>σ</i>	0.7	
<i>PCF</i>	83.4	3.99	<i>PCE</i>	78.5	-0.12
<i>σ</i>	0.8		<i>σ</i>	0.6	
<i>PFF</i>	83.2	0.12	<i>PFE</i>	82.4	2.74
<i>σ</i>	1.2		<i>σ</i>	1.1	
<i>CCF</i>	84.2	-2.43	<i>CFE</i>	82.9	-2.24
<i>σ</i>	0.7		<i>σ</i>	0.7	
<i>LCF</i>	82	-2.72	<i>LFE</i>	84.5	6.42
<i>σ</i>	0		<i>σ</i>	0.1	

Taux de variation positive : Augmentation.

Taux de variation négative : Diminution.

Les tricots jaunes finis par épousage ont conservé leur capacité à transmettre la vapeur d'eau d'une face à l'autre malgré l'augmentation de leur masse surfacique et de leur épaisseur. L'augmentation de la masse surfacique et de l'épaisseur entraîne une diminution la perméabilité à la vapeur d'eau. Dans le cas des tricots finis par épousage cette diminution est compensée par une augmentation provoquée par la disparition partielle de l'agent hydrophile à la suite des cycles de lavage domestique.

Dans le cas des tricots finis par foulardage, nous observons des diminutions variables dans les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relatives après les cycles de lavage. De

même, cette augmentation est due aux changements dans la géométrie de ces tricots qui devienne de plus en plus compacte et entrave la transmission de la vapeur d'eau.

5.4.Synthèse

5.4.1. Temps de séchage

- ✓ Le processus de lavage domestique a un effet significatif sur le temps de séchage.
- ✓ La différence entre le temps de séchage avant et après lavage est plus importante dans les tricots jaunes que dans les tricots noirs avec les deux méthodes de finissage.

5.4.2. Perméabilité à l'air

- ✓ L'augmentation de la densité des mailles après les cycles de lavage domestique est la raison principale de la diminution de la perméabilité à l'air des tricots.
- ✓ Le taux de diminution de la perméabilité à l'air après les cycles de lavage domestiques des tricots jaunes est le plus important.
- ✓ Les taux de diminution de la perméabilité à l'air des tricots finis par épuisement sont similaires à ceux des tricots finis par foulardage dans les deux couleurs.

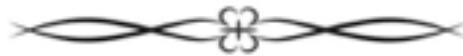
5.4.3. Perméabilité à la vapeur d'eau

- ✓ La perméabilité à la vapeur d'eau relative a diminué dans la majorité des tricots.

6. Conclusion

Les tricots sont largement utilisés dans les vêtements de sport à cause de leurs caractéristiques structurales qui offrent plus de confort. L'amélioration de ces performances peut être atteinte par la modification dans les paramètres de fabrication comme le liage, la teinture et le finissage. De plus, l'utilisation de fibres et de fils fonctionnels peut améliorer cette sensation de confort. Cette étude porte sur l'effet de la conception, du processus de teinture et du procédé de finissage sur les propriétés du confort vestimentaire. Pour donner suite aux résultats obtenus dans cette étude, l'approche d'amélioration du confort vestimentaire que nous pouvons considérer est la réduction des mailles chargée avec l'incorporation de quelques flottés dans les liages. La technique de finissage dépend de la nuance du tricot. Pour les couleurs claires, il est préférable d'appliquer l'agent hydrophile par épuisement. Cependant, pour les couleurs foncées, le finissage par foulardage est plus avantageux. Encore, le contrôle des paramètres de la structures comme la masse surfacique et la LFA contribue d'une manière significative à l'amélioration du confort vestimentaire dans les tricots. Après les cycles de

lavage domestique, le niveau de confort de tous les tricots a diminué significativement. Cette régression est plus accentuée dans les tricots jaunes. La présence des mailles chargée permet d'avoir une bonne stabilité dimensionnelle. De ce fait, les tricots en mailles chargés ont subi des changements moins importants de leurs propriétés de confort vestimentaire.



Chapitre IV : Effets de l'utilisation d'un fil Polyester fonctionnel et biodégradable



1. Introduction

Combiner l'impact environnemental et la bonne performance d'un produit représentent un argument pertinent de promotion et de vente des articles textiles. L'étiquetage avec une mention de biodégradabilité du produit est devenu un axe qui se développe de plus en plus. Bien qu'appelés labels environnementaux, ils ne représentent pas nécessairement des critères strictement environnementaux. Ils peuvent être considérés comme une réponse à la multitude d'exigences et d'attentes des gouvernements, des organisations non gouvernementales et des consommateurs dans un environnement concurrentiel [191]. Cette partie de l'étude est développée pour étudier les performances du confort vestimentaire des articles de sport déjà étudiés auxquels nous avons ajouté des fils en polyester fonctionnels et biodégradables.

2. Présentation du fil fonctionnel biodégradable

Bien qu'il possède des propriétés du confort vestimentaire intéressantes, le polyester a un impact environnemental négatif [192]. Après utilisation, les vêtements se retrouvent dans les décharges et restent dans l'écosystème pendant des siècles car les polymères synthétiques ne se dégradent pas très facilement [193]. La capacité des fibres polymères à rester dans l'environnement est encore plus préoccupante car ces polymères sont non dégradables et non renouvelables, ce qui peut augmenter les problèmes écologiques et environnementaux déjà existants dans la gestion de déchets. Le volume d'élimination et d'enfouissement des déchets vestimentaire est très élevé et il est en croissance continue [193].

Pour surmonter cet inconvénient, les équipes de recherches dans le domaine textile ont fait preuve d'une extrême inventivité pour trouver des solutions aux problèmes environnementaux. Parmi les solutions trouvées, nous pouvons citer l'utilisation des matériaux émergents comme les fibres recyclables et biodégradables. Ces fibres innovantes ouvrent la voie à une mode durable et à une production textile verte [192]. Le terme durabilité signifie satisfaire les besoins actuels sans compromettre les besoins des générations futures [191,194]. Une fibre donnée peut être considérée comme durable si elle est recyclable ou biodégradable [195]. Un matériau biodégradable est défini comme un matériau ayant la capacité à se décomposer naturellement en substances plus simples. Le matériau est ingéré par des organismes vivants (bactéries ou champignons). Il ne doit pas être nocif lors de sa décomposition et cette opération doit s'effectuer en un temps relativement court [193,196].

La conscience écologique des consommateurs a joué un rôle important en détournant l'intention des marques de mode et des fabricants vers des pratiques plus respectueuses de

l'environnement. En fait, les enquêtes montrent que la compatibilité environnementale devient de plus en plus un argument de vente. Les enquêtes actuelles signalent que les consommateurs attachent encore une importance aux performances des produits et souhaitent qu'ils soient respectueux de l'environnement [195,197]. Avec la prise de conscience croissante des consommateurs concernant les aspects écologiques, l'industrie textile s'efforce de fabriquer des produits respectueux de l'environnement et durables qui doivent être aussi approuvés de point de vue performance.

Avoir de la performance et de la durabilité est le dilemme vestimentaire du XXI^e siècle. Des efforts ont été effectués pour inventer de nouvelles fibres fonctionnelles sans nuire à l'environnement. Le COCONA[®] est un fil de polyester largement utilisé dans les vêtements de sport, compte tenu de sa capacité à maintenir la température centrale dans une plage optimale. Le programme durable lancé par ce producteur de fil visait à ajouter un caractère biodégradable à ses produits tout en préservant les fonctionnalités d'origine.

La plupart des marques de vêtement de sport suivent une politique écologique. Alors pour être à la hauteur de son marché, COCONA[®] a ajouté un additif biodégradable à toutes les fibres discontinues et les filaments de polyester et de polyamide incorporant la technologie 37.5[®].

Des tests tiers utilisant la norme de l'industrie pour la biodégradation, ASTM D-5511[198], ont révélé que cette nouvelle fibre se dégrade beaucoup plus rapidement que la fibre de polyester non traitée. Les produits de la technologie 37.5[®] contenant le nouvel additif de biodégradation se décomposent de 54 % en 341 jours, se réduisant en méthane et en dioxyde de carbone et finalement en une biomasse en environ 3,35 ans s'ils sont éliminés dans une décharge qui simule les conditions trouvées dans le test standardisé [199,200]. Tous les matériaux 37.5 incluent désormais une technologie de biodégradation améliorée pour accélérer la décomposition naturelle des fibres et réduire le problème de la pollution plastique, créant ainsi des produits synthétiques véritablement durables.

3. Étude sur les performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable

3.1.Présentation des échantillons

Pour étudier l'impact de l'utilisation d'un nouveau fil en polyester COCONA[®] et biodégradable, nous avons fabriqué trois nouvelles structures tricotées. Le tricotage a été réalisé dans une première phase avec le fil polyester COCONA[®] régulier et dans une deuxième phase avec le fil polyester COCONA[®] biodégradable tout en conservant les mêmes paramètres de la machine de tricotage. Les détails des tricots fabriqués sont donnés dans le Tableau 51. « **J** »

signifie une structure en jersey. « **1, 2, 3** » représente le numéro de la structure. « **R** » signifie que la structure est tricotée avec le fil COCONA® régulier. « **B** » signifie que la structure est tricotée avec le fil COCONA® biodégradable. Les prétraitements et le blanchiment des tricots ont été effectués dans le même bain. Le finissage par foulardage des tricots étaient consécutifs sur la même machine. Les cycles de lavage domestique ont été effectués simultanément.

Tableau 51 : Détails des tricots fabriqués.

<i>Réf</i>	<i>Liage</i>	<i>Type de fil</i>	<i>Pourcentage du mélange</i>
<i>J1R</i>	Jersey crêpe	Polyester COCONA®	50 %
<i>J2R</i>			50 %
<i>J3R</i>			Jersey mesh
<i>J1B</i>	Jersey crêpe	Polyester COCONA® Biodégradable	50 %
<i>J2B</i>			50 %
<i>J3B</i>			Jersey mesh
<i>J1B67</i>	Jersey crêpe	Polyester	33 %
		COCONA® Biodégradable	67 %
<i>J1B100</i>		COCONA® Biodégradable	100 %

3.2. Propriétés structurales

Les caractéristiques des fils de tricotage sont indiquées dans le Tableau 52.

Tableau 52: Caractéristiques du fil COCONA® biodégradable.

<i>Fil</i>	<i>Titre (dtex)</i>	<i>Nombre des filaments</i>	<i>Diamètre de la fibre (µm)</i>	<i>Diamètre du fil (µm)</i>	<i>Porosité (%)</i>
<i>Polyester COCONA® biodégradable</i>	83	42	13.27	260	87.5
<i>CV (%)</i>			6.97	4.34	
<i>σ</i>			0.93	11.12	

Les deux versions du fil COCONA® ont le même diamètre de fibre et presque le même diamètre de fil. Cependant, ils ont des valeurs de porosité différentes. Le fil biodégradable, ayant un diamètre supérieur, a montré une meilleure porosité que le fil régulier.

Les propriétés structurales des tricots *J1R, J1B, J2R, J2B, J3R, J3B, J1B67* et *J1B100* sont indiquées dans le Tableau 53,. Ces propriétés sont indiquées à l'état écru, fini et lavé.

Tableau 53: Propriétés structurales à l'état écreu, fini et lavé des tricots *J1R, J1B, J2R, J2B, J3R, J3B, J1B67* et *J1B100*.

État	Masse surfacique (g/m ²)		Épaisseur (mm)		Colonnes (C/cm)		Rangée (R/cm)		Maille (M/cm ²)		LFA de 100 AG (cm)	
	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>	<i>J1R</i>	<i>J1B</i>
<i>Ecreu</i>	65.54	52.06	0.94	0.65	13	14.4	13.6	13.4	176.8	192.8	26.91	27.9
<i>CV (%)</i>	1.7	3.57	4.16	3.69	0	3.8	4.03	4.09			1.26	0.87
<i>Fini</i>	76.6	65.56	0.61	0.46	15.1	15	15.8	15.6	238.6	233.8	26.98	25.89
<i>CV (%)</i>	1.95	1.59	2.19	1.96	1.48	4.71	2.83	3.51			1.35	3.06
<i>Lavé</i>	80.4	69.54	0.67	0.51	15.5	15.6	16.2	15.4	251	240.2	26.93	25.2
<i>CV (%)</i>	2.12	1.37	1.69	2.16	3.23	3.51	2.76	3.56			1.32	2.32
	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>	<i>J2R</i>	<i>J2B</i>
<i>Ecreu</i>	80.8	86.06	0.5	0.65	13	13	24.2	28	314.6	364	19.18	20.05
<i>CV (%)</i>	2.3	1.87	3.01	2.08	0	0	3.46	0			1.46	1.9
<i>Fini</i>	108.56	100.98	0.48	0.45	17.5	17.6	24	25.2	420	443.6	18	18.6
<i>CV (%)</i>	2.88	0.69	1.88	1.97	2.86	3.11	4.17	3.32			1.65	1.49
<i>Lavé</i>	111.66	106.14	0.5	0.48	18	18.4	23	24.6	414	452.8	18.3	18.9
<i>CV (%)</i>	0.74	1.37	0.9	1.13	0	2.98	0	3.64			2.45	1.61
	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>	<i>J3R</i>	<i>J3B</i>
<i>Ecreu</i>	77.88	78.92	0.66	0.68	13.8	13.4	21.6	24.8	298	332	18.75	20.32
<i>CV (%)</i>	1.89	2.68	1.69	3.91	3.24	4.09	2.54	4.24			1.21	2.06
<i>Fini</i>	96.76	98.38	0.49	0.53	16.7	18	24.2	23.6	404.3	424.8	18.75	18.51
<i>CV (%)</i>	0.83	0.99	2.24	1.03	2.68	0	3.46	2.32			0.72	0.9
<i>Lavé</i>	100.22	104.36	0.53	0.56	16.6	17.6	26	25.2	431.6	443.6	18.45	18.84
<i>CV (%)</i>	0.37	2.01	1.33	2.97	3.3	3.11	2.72	4.35			1.09	1.14

<i>État</i>	<i>Masse surfacique (g/m²)</i>		<i>Épaisseur (mm)</i>		<i>Colonnes (C/cm)</i>		<i>Rangée (R/cm)</i>		<i>Maille (M/cm²)</i>		<i>LFA de 100 AG (cm)</i>	
	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>	<i>J1B67</i>	<i>J1B100</i>
<i>Ecrû</i>	61.62	55.24	0.84	0.72	13.5	14	13.4	14.4	180	201.6	27.21	27.52
<i>CV (%)</i>	2.48	2.66	1.06	2.31	3.64	2.14	4.09	3.8			1.38	1.64
<i>Fini</i>	72.66	71.88	0.62	0.62	14.9	14.5	16.2	16.5	241	240	25.74	27.16
<i>CV (%)</i>	1.17	1.32	1.43	0.72	1.5	2.44	2.76	3.03			0.84	1.27
<i>Lavé</i>	76.22	75.6	0.66	0.63	15.3	15.2	15.4	16.6	236	268	25.38	25.7
<i>CV (%)</i>	1.02	1.34	1.35	1.41	1.79	1.8	3.56	3.11			1.32	1.19

Dans les trois états, il existe une grande différence dans les valeurs de masse surfacique et d'épaisseur entre *JIR* et *JIB*, ce qui n'est pas le cas dans les deux autres structures. Avec presque la même densité de mailles et la même LFA, on peut dire que le fil COCONA® régulier confère plus de volume à la structure *J1*. Avec un réglage de LFA élevé, le fil a plus d'espace pour qu'il augmente en taille et gagne du volume dans le sens transversal, par conséquent le tricot est plus épais et sa masse surfacique augmente. Les résultats ont montré que les densités des rangées des tricots *J2R* et *J3R* sont inférieures à celles des tricots *J2B* et *J3B* respectivement ce qui provoque une légère augmentation de la masse surfacique et de l'épaisseur. Les fluctuations des caractéristiques structurelles de tous les tricots entre les trois états sont les mêmes avec des étendues similaires quel que soit le fil utilisé.

Nous remarquons que les tricots *JIB67* et *JIB100* ont des propriétés structurales similaires, et présentent à la fois une grande différence par rapport à *JIB* dans les valeurs de la masse surfacique et de l'épaisseur. Ceci est dû au volume important du fil COCONA® biodégradable comparé au fil polyester classique, donc augmenté la portion du fil biodégradable entraîne une augmentation de la masse surfacique et de l'épaisseur. Les densités des mailles des trois tricots aux états écru et fini sont voisines, mais le *JIB100* montre une densité des mailles supérieure à celle de *JIB* et *JIB67* après les cycles de lavage domestique.

La diminution de La LFA après les prétraitements et le blanchiment suit l'augmentation du pourcentage du fil biodégradable. Nous trouvons un écart égal à 3 cm dans le tricot *JIB*, 1.5 cm dans le tricot *JIB67* et 0.4 cm dans le tricot *JIB100*. Après lavage les trois valeurs de la LFA diminuent à des valeurs similaires, la diminution la plus importante est trouvée dans le tricot *JIB100*, qui est égale à 1.5 cm. Les trois tricots présentent une variation similaire dans les propriétés structurales lors du passage d'un état de finition à l'autre.

3.3. Performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable

Le comportement du séchage des étoffes textiles destinées pour fabrication des vêtements de sport est une propriété cruciale dans le but d'assurer un haut niveau de confort. Par conséquent, pour approuver la performance de confort du nouveau fil fonctionnel biodégradable, il doit préserver ou améliorer les performances de confort. Les Performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable des échantillons sont présentées dans le Tableau 54.

Tableau 54: Performances liées au confort vestimentaire d'un nouveau fil fonctionnel et biodégradable des échantillons (*J1R*, *J1B*, *J2R*, *J2B*, *J3R* et *J3B*)

Réf	<i>J1R</i> (σ)	<i>J1B</i> (σ)	<i>J2R</i> (σ)	<i>J2B</i> (σ)	<i>J3R</i> (σ)	<i>J3B</i> (σ)
Temps de séchage (min)	40 (0)	33 (1.41)	36 (0)	34 (0)	38 (1.41)	36 (0)
Perméabilité à l'air (mm/s)	2474 (52.53)	3104 (36.27)	1950 (43.46)	1829 (36.27)	1946 (48.35)	1715 (36.89)
Temps de mouillage du haut (s)	2.22 (0.08)	1.94 (0.1)	2.07 (0.04)	2.17 (0.04)	2.18 (0.05)	2.2 (0.08)
Temps de mouillage du bas (s)	2.31 (0.08)	1.94 (0.1)	2.11 (0.05)	2.19 (0.05)	2.18 (0.05)	2.22 (0.07)
Taux d'absorption du haut (%/s)	61.43 (2.38)	75.4 (1.74)	63.43 (2.56)	65.02 (1.32)	63.26 (1.68)	67.17 (1.92)
Taux d'absorption du bas (%/s)	76.97 (1.26)	84.75 (0.93)	76.01 (2.29)	77.08 (1.02)	76.4 (0.47)	77.89 (1.45)
Rayon de propagation maximal du haut (mm)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)
Rayon de propagation maximal du bas (mm)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)	30 (0)
Vitesse de propagation du haut (mm/s)	6.86 (0.17)	8.99 (0.19)	8.22 (0.11)	7.36 (0.25)	7.61 (0.11)	6.96 (0.25)
Vitesse de propagation du bas (mm/s)	6.7 (0.13)	8.86 (0.18)	8.13 (0.12)	7.27 (0.28)	7.54 (0.13)	6.87 (0.2)
AOWT (%)	150.14 (9.6)	128.09 (4)	131.79 (7.38)	161.79 (6.01)	106.12 (6.83)	89.15 (0.1)
OMMC	0.65 (0.01)	0.64 (0.03)	0.63 (0.02)	0.65 (0.02)	0.6 (0.01)	0.57 (0.02)
Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)	82.4 (0.6)	84 (0.2)	82.3 (1.3)	86.1 (0.7)	80.9 (0.4)	82.8 (0.5)
Conductivité thermique ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	48.92 (0.8)	47.7 (1.05)	58.38 (0.73)	58.44 (1.22)	53.16 (1.57)	54.42 (0.5)
Absorptivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{K}^{-1}$)	104.52 (1.72)	110.5 (2.56)	137.98 (5.18)	158.9 (7.21)	102 (5.8)	98.63 (3.93)
Résistivité thermique ($\text{mK}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)	11.38 (0.39)	9.6 (0.34)	8.16 (0.23)	8.08 (0.17)	9.04 (0.45)	9.64 (0.27)

Les temps de séchage des tricots finis fabriqués avec le fil polyester COCONA® biodégradable sont inférieurs à ceux des tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® régulier. L'écart entre *J1R* et *J1B* est plus important que les autres tricots, 7 minutes entre *J1R* et *J1B*, 2 minutes entre *J2R* et *J2B* et de même entre *J3R* et *J3B*. Cela peut être expliquée par la structure lâche du liage *J1*. La distance entre les fils est grande dans les structures lâches et il existe moins de points de contact entre les fils, comparées avec les structures serrées. La propagation capillaire de l'eau se produit principalement dans les pores d'un fil distinct, par conséquent, la capacité d'absorption et de propagation capillaire du fil utilisé peuvent déterminer d'une manière significative le pouvoir de séchage global du tricot résultant. Le fil biodégradable est plus poreux que le fil régulier d'où une propagation capillaire plus efficace et un front d'évaporation plus exposé à l'environnement. Par conséquent, le temps de séchage du tricot fabriqué avec ce fil est plus rapide que celui d'un tricot fabriqué par un fil plus compact. Cette interprétation est confirmée par les résultats trouvés par Hyun Ah Kim et Seung Jin Kim [125]. Ils ont constaté que s'il existe plus de vide dans la structure du fil, alors la transmission d'eau sous forme liquide ou vapeur est plus rapide. Ils ajoutent qu'avec cette transmission rapide, le temps nécessaire de séchage est réduit. Plus encore, J. Srinivasan et al. [201] ont conclu que le taux de séchage élevé de tricots fabriqués avec des fibres micro-deniers est attribué à la grande surface inter fibres exposée, ce qui facilite le processus d'évaporation du liquide retenu. De ce fait, nous pouvons conclure que le changement du fil polyester COCONA® régulier par le fil polyester COCONA® biodégradable améliore le temps de séchage des structures tricotés et surtout les structures lâches. L'analyse statistique a révélé qu'il existe une interaction significative entre la structure et le type de fil sur le temps de séchage. Alors, l'effet du fil polyester COCONA® sur le temps de séchage change suivant la structure. L'effet du type de fil est trouvé significatif sur le temps de séchage. Le Tableau 55 présente les résultats de cette analyse statistique.

Tableau 55: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Temps de séchage</i>	<i>Valeur de F</i>	4.33	40.33	8.33
	<i>Valeur de p</i>	0.068	0.001*	0.019*

*: Statistiquement significatif.

L'épaisseur de la matière textile joue un rôle crucial dans le processus de séchage. La sueur absorbée par la face intérieure du tricot doit traverser l'épaisseur de la structure textile jusqu'à la face extérieure par des forces capillaires, pour qu'un échange de masse soit effectué avec l'atmosphère. Puis, avec le recul du front d'évaporation, la vapeur d'eau doit aussi

traverser l'assemblage fibreux jusqu'à l'extérieur. L'analyse statistique de corrélation suggère que le temps de séchage de la matière textile est fortement affecté par son épaisseur, le coefficient de corrélation trouvé est de 0.839. Raechel M. Laing et al. [44] ont aussi trouvé que le temps de séchage est corrélé positivement avec l'épaisseur. S. Cimilli et al. [122] ont remarqué que les structures fines sèchent plus rapidement que les structures épaisses.

Le mouvement d'un flux d'air à travers la surface d'une étoffe textile est contrôlé principalement par la géométrie et la conception de la structure textile surfacique. L'effet du type et de la nature de la fibre est généralement négligé. Néanmoins, dans certains cas, avec des formes de la section transversale et des topographies de surface différentes, la fibre peut provoquer des obstacles qui entraînent une diminution du débit d'air passant perpendiculairement à travers la structure textile. De plus la porosité et l'arrangement des fibres dans le fil offre des espaces vides par lesquels l'air peut pénétrer [202,203].

Les propriétés structurelles justifient l'excellente perméabilité à l'air des deux variantes de la structure *J1*, *J1R* et *J1B*. Elles sont les plus légères, elles ont les valeurs de la LFA les plus élevées et les densités de mailles les plus faibles. Les similitudes dans les paramètres structurales des supports *J2* et *J3* justifient aussi le rapprochement dans les valeurs de la perméabilité à l'air.

Suivant l'analyse statistique, il existe une interaction significative entre la structure et le type de fil sur la perméabilité à l'air. Alors, l'effet du type de fil COCONA® sur la perméabilité à l'air dépend de la structure. Les résultats de l'analyse ANOVA sont présentés dans le Tableau 56. Le type de fil et la structure ont été trouvés aussi comme des effets principaux significatifs. La comparaison multiple par le test post hoc de Tukey présentée dans le Tableau 57, montre que toutes les différences entre les groupes étaient significatives sauf entre *J2R* et *J3R*.

Tableau 56 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	<i>Valeur de F</i>	3204.14	71.52	609.54
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 57: Comparaison par paires de la perméabilité à l'air.

	<i>Valeur de p ajustée</i>				
	<i>J1R</i>	<i>J2R</i>	<i>J3R</i>	<i>J1B</i>	<i>J2B</i>
<i>J2R</i>	0.000*	-	1.000	0.000*	0.000*
<i>J3R</i>	0.000*	1.000	-	0.000*	0.000*
<i>J1B</i>	0.000*	0.000*	0.000*	-	0.000*
<i>J2B</i>	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	-
<i>J3B</i>	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Esra Karaca et al. [204] ont trouvé que le passage de l'air à travers une structure textile est fortement influencé par les ouvertures existantes entre les fils. Bien que les pores enfermés dans le fil contribuent à la porosité globale de l'étoffe, mais la quantité d'air passante n'est pas largement affecté par ces ouvertures. Par conséquent, la porosité du fil n'exerce pas une influence significative sur la perméabilité à l'air. D'autre part, A. Das et al [203] ont conclu que plus l'espace entre les fibres dans un fil est élevé, plus la résistance à la traînée à l'air est importante, ce qui entraîne finalement une faible perméabilité à l'air.

D'après nos résultats, Le type du fil a un effet négatif sur les structures **J2** et **J3**, mais l'effet est trouvé positif pour la structure **J1**. En effet, les tailles des macro-pores dans les structures **J2** et **J3** sont largement plus étroites que dans la structure **J1**. Le compactage et le diamètre du fil exercent une influence importante sur la résistance au passage de l'air car le fil la plus compacte offre plus d'espace entre les fils, dans notre cas le fil COCONA® régulier est le fil le plus compact. La structure **J1** possède des larges macro-pores, d'où le niveau de compactage du fil n'a pas exercé une influence négative sur la perméabilité à l'air.

L'analyse de corrélation entre les paramètres structurales et la perméabilité à l'air révèle que la perméabilité à l'air est fortement liée à la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA, comme il est montré dans le Tableau 58. Ces corrélations ont été mentionnés dans la littérature, M. Manshahia et A. Das [202] ont constaté qu'il y a eu une augmentation significative de la perméabilité à l'air avec une augmentation de la LFA. Ils ont déclaré que l'augmentation de la LFA crée plus d'espace libre disponible pour le passage de l'air à travers la structure, ce qui entraîne une plus grande perméabilité à l'air. Aussi, Deepti Gupta et al. [205] ont trouvé que la perméabilité à l'air diminue avec une augmentation de la masse surfacique et de la densité des mailles.

Tableau 58 : Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Densité des mailles</i>	<i>LFA</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	-0.962	-0.920	0.872

Il est reporté dans la littérature que la pénétration de l'air dans la matière textile favorise le processus d'évaporation de l'eau. Le flux d'air passant à travers l'assemblage fibreux contribue à l'amincissement du film d'air stagnant à la surface de la fibre, ce qui stimule l'échange de masse avec l'atmosphère. Encore, le flux d'air provoque un remplacement de l'air humide par l'air sec, ce qui engendre une augmentation du gradient de pression de la vapeur d'eau entre la surface de la fibre et l'atmosphère et par conséquent, l'augmentation du taux

d'échange de masse. Y. Jhanji et al. [31] ont trouvé que plus le tricot est perméable à l'air plus son taux d'évaporation est élevé. Dans cette étude, aucune corrélation n'a été trouvée entre la perméabilité à l'air et le temps de séchage. Ceci peut être expliqué par le contrôle de la vitesse d'air qui passe parallèlement à la surface du textile durant le test de séchage. Le flux d'air laminaire encours d'essai ne pénètre pas perpendiculairement à travers l'épaisseur de la structure textile, donc la différence dans la perméabilité à l'air des tricots ne peut pas affecter leurs temps de séchage.

Les temps de mouillage du haut et du bas de tous les tricots sont approximativement égaux. La différence entre le haut et le bas est non significative. La diversité dans le temps de mouillage entre les tricots biodégradables et les tricots ordinaires est visible entre les tricots *J1R* et *J1B*, le temps de *J1B* est inférieur de 0.28 secondes à celui de *J1R*. Les résultats de l'analyse statistique, présentés dans le Tableau 59, ont montré que l'impact du fil polyester COCONA® biodégradable sur le temps de mouillage dépend de la structure.

Cet impact est examiné en détails par la comparaison par paire entre les groupes, les résultats de cette comparaison sont donnés dans le Tableau 60.

Tableau 59: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de mouillage.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	4.74	3.30	16.19
	<i>Valeur de p</i>	0.020*	0.084	0.000*
<i>Temps de mouillage du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	2.09	8.16	24.57
	<i>Valeur de p</i>	0.149	0.009*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

L'analyse statistique a révélé que l'effet du fil biodégradable est significatif dans la structure *J1* et il n'a aucun effet sur les structures *J2* et *J3*.

Tableau 60: Comparaison par paires du temps de mouillage.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>
<i>J1R – J1B</i>	0.000*	0.000*
<i>J2R – J2B</i>	0.367	0.618
<i>J3R – J3B</i>	0.997	0.965

*: Statistiquement significatif.

Le taux d'absorption du bas est supérieur à celui du haut avec une différence statistiquement significative. Ceci est expliqué par le fait que l'application de la goutte d'eau est effectuée sur la face supérieure de l'échantillon à partir d'un orifice à petit diamètre, en revanche le mouillage de la face supérieure est effectué par la propagation transversale de l'eau à travers l'épaisseur de l'échantillon. Simultanément à la propagation transversale, l'eau se

propage aussi parallèlement à la surface du tricot (horizontalement) ce qui provoque un élargissement de la source de mouillage de la face inférieure. La détection de l'eau se fait par des sondes qui forment des cercles concentriques, alors agrandir la surface de mouillage initial augmente le rayon de détection du liquide, ce qui engendre une augmentation du taux d'absorption.

Tableau 61: Résultats de l'analyse ANOVA du taux d'absorption.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	11.10	69.42	24.09
	<i>Valeur de p</i>	0.001*	0.000*	0.000*
<i>Taux d'absorption du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	24.46	38.25	15.58
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Les taux d'absorption de tous les tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® biodégradable sont supérieures à ceux des tricots fabriqués avec le fil COCONA® régulier. L'écart entre *JIR* et *JIB* est le plus important parmi les trois structures, il est égal à 13.9 %/s et 7.8 %/s respectivement pour le haut et le bas. L'analyse ANOVA a montré que l'interaction du type du fil avec la structure est significative, les résultats sont présentés dans le Tableau 61.

La comparaison par paire a démontré que le fil COCONA® biodégradable a un effet positivement significatif que sur le taux d'absorption du haut et du bas des tricots *J1* et *J3*. De plus, la structure n'a pas un effet significatif sur le taux d'absorption que pour le fil COCONA® biodégradable. Les résultats de la comparaison multiple sont présentés dans le Tableau 62.

Tableau 62: Comparaison par paires du temps de mouillage.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
<i>J1R – J1B</i>	0.000*	0.000*
<i>J2B – J1B</i>	0.000*	0.000*
<i>J3B – J1B</i>	0.000*	0.000*
<i>J2R – J1R</i>	0.440	0.687
<i>J3R – J1R</i>	0.580	0.899
<i>J2R – J2B</i>	0.264	0.384
<i>J3B – J2B</i>	0.150	0.530
<i>J3R – J2R</i>	0.994	0.948
<i>J3R – J3B</i>	0.039*	0.008*

*: Statistiquement significatif.

Le pouvoir de mouillage et d'absorbance est généralement lié à l'hydrophilie de la fibre et à la porosité du textile. Dans notre cas l'hydrophilie des deux versions du fil COCONA® est similaire. Alors, la différence entre les propriétés de mouillage est due à la différence dans la porosité des deux fils. Augmenter la porosité du fil entraîne l'existence de plus d'espace vacant

dans la structure du fil, par lesquels l'eau liquide pénètre lors du mouillage et il y'a un remplacement de l'interface fibre-air par l'interface fibre-liquide.

Les valeurs des propriétés de mouillage suivent la même évolution que les valeurs du temps de séchage. Le tricot ayant le temps de séchage le plus court (**JIB**) a le temps de mouillage le plus petit et le taux d'absorption le plus rapide. Encore, Le tricot ayant le temps de séchage le plus long (**JIR**) a le temps de mouillage le plus grand et le taux d'absorption le plus lent dans les deux faces.

L'analyse de corrélation a montré qu'il existe une forte relation entre le temps de séchage et les propriétés de mouillage, le Tableau 63 indique les coefficients de corrélation trouvés. Dans ce contexte, Qing Chen et al. [206] ont montré que le taux de séchage est significativement et négativement corrélé avec le temps d'absorption d'eau. Ceci implique qu'un temps d'absorption plus court est associé à une vitesse d'évaporation plus élevée. De plus, les résultats obtenus confirment qu'un temps de mouillage court et une absorption rapide contribuent significativement dans l'accélération du processus d'élimination de la sueur à la surface de la peau et son évaporation à partir du vêtement.

Tableau 63: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de mouillage.

	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	0.696	0.774	-0.778	-0.617

Les propriétés de propagation des tricots étudiés sont représentées dans le Tableau 54. Toutes les valeurs du rayon de propagation maximal sont égales à 30 mm, ce qui représente le rayon maximal détectable par l'appareil « Moisture Management Tester ». Donc l'analyse des propriétés de propagation des tricots à l'état finis ne sera effectuée que sur la vitesse de propagation.

Les vitesses de propagation de la face supérieure ne sont pas statistiquement différentes à celles de la face inférieure. La structure **J1** est la seule qui a une vitesse de propagation, du haut et du bas, plus importante que la version régulière. De plus, La différence entre **JIB** et **JIR** est la plus importante. La sueur liquide se propage dans **JIB** de 2.1 mm/s plus vite que **JIR**, à la face supérieure, et de 2.2 mm/s à la face inférieure. Tandis que dans **J2R** et **J3R**, la sueur se propage, en haut et en bas, moins de 0.9 mm/s et de 0.7 mm/s que **J2B** et **J3B**. Le COCONA® biodégradable agit différemment sur les différentes structures, l'interaction entre le type de fil est la structure est trouvée statistiquement significative. Le Tableau 64 présente les résultats de

l'analyse de la variance. La propagation capillaire du liquide à travers les micropores a une influence positivement significative sur les structures lâches. Dans les structures lâches, le mécanisme de propagation capillaire est gouverné par la capacité du fil à transporter le liquide à l'intérieur de sa structure. A un certain seuil, l'augmentation de la porosité du fil provoque un accroissement dans la pression capillaire lors du déplacement du liquide ce qui génère finalement une vitesse de propagation plus rapide.

Tableau 64: Résultats de l'analyse ANOVA de la vitesse de propagation.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	22.25	6.93	153.59
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.016*	0.000*
<i>Vitesse de propagation du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	20.73	7.63	170.65
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.012*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

La comparaison par paire a montré aussi que toutes les différences entre les groupes sont statistiquement significatives. De ce fait, la structure et le type de fil exercent une influence significative sur la vitesse de propagation du haut et du bas.

Le temps de séchage est trouvé en forte relation avec la vitesse de propagation du haut et du bas. Les résultats de l'analyse de corrélation sont présentés dans le Tableau 65.

Tableau 65: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec la vitesse de propagation.

	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	-0.680	-0.643

Les tricots **J1R** et **J3R** montrent un pouvoir de transport unidirectionnel supérieur à celui de **J1B** et **J3B**. Cependant le **J2B** a un indice de transport unidirectionnel cumulé plus important que **J2R**. L'analyse statistique montre que l'interaction entre la structure et le type de fil est trouvée significative. Alors, la différence entre les tricots réguliers et les tricots biodégradable est statistiquement significative. Le Tableau 66 présente les résultats de cette analyse statistique.

Tableau 66: Résultats de l'analyse ANOVA du AOWT et OMMC.

<i>Facteurs</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>AWOT</i>	<i>Valeur de F</i>	203.73	2.10	69.01
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.162	0.000*
<i>OMMC</i>	<i>Valeur de F</i>	13.55	2.14	2.70
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.158	0.090

*: Statistiquement significatif.

La même évolution est observée dans les valeurs de la capacité de gestion de l'humidité globale. L'équation suivant laquelle la valeur de la capacité de gestion de l'humidité globale est calculée justifie sa forte corrélation avec l'indice de transport unidirectionnel cumulé.

L'indice de transport unidirectionnel cumulé indique le pouvoir de propagation capillaire transversale de la structure textile. C'est-à-dire, c'est le paramètre déterminant de la capacité de l'étoffe à transmettre la sueur liquide absorbée de la face intérieure à la face extérieure. Malgré l'importance de cette propriété dans le processus de séchage, nous ne trouvons aucune corrélation avec le temps de séchage. Même résultat de corrélation est trouvé entre le temps de séchage et la capacité de gestion de l'humidité global.

Les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA[®] biodégradable sont légèrement supérieures à ceux des tricots fabriqués avec le fil COCONA[®] régulier. Cela peut être expliqué par l'effet de la variation de la taille et la distribution des micropores situés entre les fibres. La macroporosité, qui dépend principalement de la conception et du type du liage du tricot, est similaire dans les tricots biodégradables et les tricots réguliers. La porosité du fil biodégradable, correspond à la microporosité du tricot. Elle est plus importante que celle du fil COCONA[®] ordinaire. Par conséquent, le taux de diffusion des molécules d'eau à travers ces micropores est plus important. Cette différence de microporosité peut être l'origine de la différence en termes de la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Cette explication est prouvée par Esra Karaca et al. [204]. Ils ont trouvé que la diminution de la taille des espaces entre les fibres ainsi que l'augmentation de l'épaisseur de la structure provoquent une chute dans la perméabilité à la vapeur d'eau. Ils ont constaté que le flux de la vapeur d'eau à travers une couche textile épaisse et serrée est plus difficile que le cas inverse. La diffusion de la vapeur d'eau à travers un assemblage fibreux est limitée à cause de la faible diffusivité de la vapeur d'eau du matériau textile. En revanche, la diffusion de la vapeur d'eau à travers l'air est quasi instantanée.

L'interaction significative de la structure et du type de fil montre que la fil COCONA[®] biodégradable affecte la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots. Les résultats de l'ANOVA sont indiqués dans le Tableau 67.

Tableau 67 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative</i>	<i>Valeur de F</i>	19.26	65.98	4.23
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.031*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 68: Comparaison par paires de la perméabilité à la vapeur d'eau relative.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
<i>J1R – J1B</i>	0.069
<i>J2R – J2B</i>	0.000*
<i>J3R – J3B</i>	0.008*

*: Statistiquement significatif.

La comparaison par paire montre que l'effet du fil biodégradable est significatif que pour les structures **J2** et **J3**, comme il est présenté dans le Tableau 68.

Ce résultat prouve la domination des macro-pores sur les micro-pores dans la structure **J1**. L'effet de la porosité supérieure du fil biodégradable comparée au fil régulier est négligée par rapport aux grandes ouvertures du tricot **J1**.

Les valeurs de la conductivité thermique des tricots biodégradables et ordinaires sont presque égales. L'utilisation du fil polyester COCONA® biodégradable au lieu du fil polyester COCONA® régulier n'a pas d'effet sur la conductivité thermique.

Tableau 69 : Résultats de l'analyse ANOVA de la conductivité thermique des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Conductivité thermique</i>	<i>Valeur de F</i>	235.00	0.01	3.53
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.931	0.045*

*: Statistiquement significatif.

La différence significative existe qu'entre les structures. L'analyse de la variance indique que la différence entre la conductivité thermique des différentes structures est significative, mais elle dépend du type de fil. Les résultats sont présentés dans le Tableau 69.

L'analyse post hoc de Tukey montre que la différence entre tous les groupe est significative sauf la comparaison entre les deux variantes de chaque structure, comme il est indiqué dans le Tableau 70.

Tableau 70: Comparaison par paires de la conductivité thermique des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
<i>J1R – J1B</i>	0.455
<i>J2B – J1B</i>	0.000*
<i>J3B – J1B</i>	0.000*
<i>J2R – J1R</i>	0.000*
<i>J3R – J1R</i>	0.000*
<i>J2R – J2B</i>	1.000
<i>J3B – J2B</i>	0.000*
<i>J3R – J2R</i>	0.000*
<i>J3R – J3B</i>	0.420

*: Statistiquement significatif.

Dans cette étude la structure est le paramètre principal qui influe la conductivité thermique. L'analyse de corrélation a montré que la conductivité thermique est fortement associée aux paramètres structuraux, notamment la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA. Le Tableau 71 montre les coefficients de corrélation entre les paramètres structuraux et la conductivité thermique.

Tableau 71: Coefficients de corrélation de la conductivité thermique avec les paramètres structuraux des tricots finis.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Densité des mailles</i>	<i>LFA</i>
<i>Conductivité thermique</i>	0.944	0.919	-0.889

Pour que l'assemblage fibreux puisse conduire la chaleur d'une façon efficace, les fibres doivent être bien connecté entre elles et il faut minimiser les espaces vides qui contiennent de l'air stagnant. L'augmentation de la masse surfacique et de la densité des mailles traduisent l'augmentation de la masse fibreuse et la diminution de la portion d'air piégé par unité de surface. Comme la conductivité thermique de l'air emprisonné est inférieure à la conductivité thermique des fibres, nous observons une augmentation de la conductivité thermique dans les tricots lourds et denses. Dans ce contexte, Esra Taştan Özkan et al. [150] ont trouvé que la conductivité thermique la plus élevée est associée aux tricots les plus denses. Et ils ont trouvé que la structure a un effet statistiquement significatif sur la conductivité thermique.

L'influence de la LFA sur la conductivité thermique est trouvée négativement significative. L'accroissement de la LFA entrain un développement dans l'espace vide entre les fils ce qui provoque par la suite une diminution de la conductivité thermique. Deepti Gupta et al. [205] ont constaté que la conductivité thermique des tricots diminue d'une manière significative avec l'augmentation de la LFA. Encore, Abhijit Majumdar et al. [207] ont trouvé que la faible conductivité thermique des tricots est attribuée à leurs porosité élevée.

D'après les résultats affichés, le fil COCONA® biodégradable fournit une sensation plus fraîche lors du premier contact que le fil COCONA® ordinaire. Cet avantage offert par le fil biodégradable est observé que dans les structures **J1** et **J2**. Tandis que dans le cas de la structure **J3**, la valeur de l'absorptivité thermique de la variante biodégradable est légèrement inférieure à celle de la variante ordinaire.

Tableau 72: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
<i>Absorptivité thermique</i>	<i>Valeur de F</i>	420.83	28.81	23.43
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.000*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

L'analyse statistique, présentée dans le Tableau 72, a révélé que l'interaction entre le type de fil et la structure est significative. L'effet du fil biodégradable sur l'absorptivité thermique dépend de la structure. En outre, la comparaison multiple montre que seule la différence entre l'absorptivité thermique de **J2R** et **J2B** est significative. Les résultats de l'analyse post hoc de Tukey est indiqué dans le Tableau 73.

Tableau 73: Comparaison par paires de l'absorptivité thermique des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
J1R – J1B	0.210
J2B – J1B	0.000*
J3B – J1B	0.001*
J2R – J1R	0.000*
J3R – J1R	0.914
J2R – J2B	0.000*
J3B – J2B	0.000*
J3R – J2R	0.000*
J3R – J3B	0.766

*: Statistiquement significatif.

La résistivité thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique, le coefficient de corrélation est égal à -0.811.

Nous observons que la résistivité thermique des tricots fabriqués avec le fil COCONA® biodégradable est inférieure à celle des tricots fabriqués avec le fil COCONA® régulier dans les structures **J1** et **J2**, contrairement à la structure **J3**. L'analyse de la variance indique que le type de fil exerce une influence significative sur la résistivité suivant le type de la structure. Le Tableau 74 montre les résultats de l'analyse ANOVA.

Tableau 74: Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Structure</i>	<i>Type du fil</i>	<i>Structure*Type du fil</i>
Absorptivité thermique	<i>Valeur de F</i>	132.10	12.44	35.33
	<i>Valeur de p</i>	0.000*	0.002*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

La comparaison multiple a montré que seule la différence entre **J1R** et **J1B** est statistiquement significative, en comparant les deux variantes. Et en comparant suivant la structure, la seule différence non significative est celle trouvée entre **J1B** et **J3B**. Le Tableau 75 montre les résultats de la comparaison par paire effectuée entre les groupes.

Tableau 75: Comparaison par paires de la résistivité thermique des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes de structure*Type de fil</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
<i>J1R – J1B</i>	0.000*
<i>J2B – J1B</i>	0.000*
<i>J3B – J1B</i>	1.000
<i>J2R – J1R</i>	0.000*
<i>J3R – J1R</i>	0.000*
<i>J2R – J2B</i>	0.999
<i>J3B – J2B</i>	0.000*
<i>J3R – J2R</i>	0.003*
<i>J3R – J3B</i>	0.074

*: Statistiquement significatif.

L'influence de la structure sur la résistivité thermique est réellement centralisée sur l'effet de l'épaisseur. Une forte corrélation est trouvée entre l'épaisseur et la résistivité thermique, avec un coefficient de Pearson égal à 0.870. L'augmentation de l'épaisseur signifie l'augmentation de la quantité d'air stagnant à l'intérieur de la structure textile, le transfert de chaleur d'une face à l'autre diminue en conséquence. La relation entre la résistance thermique et l'épaisseur est largement discutée dans la littérature. Prakash Chidambaram et al. [208] ont déclaré que les structures textiles épaisses génèrent une résistance thermique plus importante que les structures fines. Pavla Tesinova et Desalegn Atalie [209] ont trouvé que la résistance thermique des étoffes textile est considérablement influencée par leurs épaisseurs. E. Öner et A. Okur [183] ont constaté que l'épaisseur est le paramètre le plus crucial dans la détermination de la résistance thermique des matériaux textiles.

L'analyse des différents tableaux ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Temps de séchage : Les tricots fabriqués avec le fil biodégradable ont les temps de séchage les plus courts.
- Perméabilité à l'air : Le fil COCONA® biodégradable améliore significativement la perméabilité à l'air des tricots lâches et il n'a aucun effet considérable sur les structures chargées.
- Propriétés de gestion de l'humidité : L'utilisation du fil biodégradable améliore les propriétés de mouillage. Il existe une forte relation entre le temps de séchage et les propriétés de mouillage. Les tricots biodégradables ont des vitesses de propagation les plus importantes. Les tricots ayant un temps de mouillage court, un taux d'absorption élevé, un rayon de propagation étendu et une vitesse de diffusion rapide ont un temps de séchage réduit.
- Perméabilité à la vapeur d'eau : L'emploi du fil biodégradable provoque une augmentation dans la perméabilité à la vapeur d'eau et par conséquent une amélioration dans le pouvoir de séchage.

- Propriétés thermiques : L'utilisation du fil biodégradable ne provoque pas de changement des propriétés thermiques.

On peut conclure donc que la fibre de polyester COCONA® biodégradable est une fibre écologique qui fournit un niveau de confort vestimentaire supérieur que la fibre COCONA® régulière. Donc, l'utilisation du fil COCONA® biodégradable dans les vêtements de sport est recommandée.

4. Optimisation des pourcentages du mélange avec le fil biodégradable

Dans la partie précédente, nous avons utilisé le fil de polyester biodégradable en pourcentage équivalent avec le fil de polyester COCONA régulier. Les résultats trouvés montrent que les caractéristiques globales du confort vestimentaires se sont améliorées. Dans la partie suivante, nous envisageons étudier l'influence de la variation du pourcentage d'utilisation du fil biodégradable. Dans cet objectif nous avons préparé des structures qui contiennent 67% polyester biodégradable avec 33% polyester ordinaire et 100% de fil biodégradable.

Les effets des pourcentages du mélange avec le fil biodégradable sur les paramètres de confort des tricots finis sont illustrés dans le Tableau 76.

Tableau 76: Effet des pourcentages du mélange avec le fil biodégradable sur les paramètres de confort des tricots finis (*JIB*, *JIB67* et *JIB100*)

<i>Référence</i>	<i>JIB</i> (σ)	<i>JIB67</i> (σ)	<i>JIB100</i> (σ)
Temps de séchage (min)	33 (1.41)	37 (1.41)	49 (1.41)
Perméabilité à l'air (mm/s)	3104 (36.27)	2668 (61.24)	2752 (28.2)
Perméabilité à la vapeur d'eau (%)	84 (0.2)	81 (1.1)	82 (0.3)
Temps de mouillage du haut (s)	1.94 (0.1)	2.23 (0.08)	2.26 (0.04)
Temps de mouillage du bas (s)	1.94 (0.1)	2.35 (0.07)	2.34 (0.06)
Taux d'absorption du haut (%/s)	75.4 (1.74)	61.57 (1.82)	68.1 (3.14)
Taux d'absorption du bas (%/s)	84.75 (0.93)	73.77 (1.45)	78.07 (0.62)
Rayon de propagation maximal du haut (mm)	30 (0)	30 (0)	30 (0)
Rayon de propagation maximal du bas (mm)	30 (0)	30 (0)	30 (0)
Vitesse de propagation du haut (mm/s)	8.99 (0.19)	6.9 (0.12)	6.1 (0.25)
Vitesse de propagation du bas (mm/s)	8.86 (0.18)	6.77 (0.14)	5.98 (0.21)
AOWT (%)	128.09 (4)	171.08 (11.02)	87.59 (5.26)
OMMC	0.63 (0.03)	0.68 (0.02)	0.60 (0.1)
Conductivité thermique ($mW.m^{-1}.K^{-1}$)	47.7 (1.06)	48.35 (0.68)	47.94 (0.71)
Absorptivité thermique ($W.m^{-2}.s^{1/2}.K^{-1}$)	110.5 (2.56)	100 (3.34)	93 (5.27)
Résistivité thermique ($mK.W^{-1}.m^{-2}$)	9.6 (0.34)	11.66 (0.2)	11.52 (0.61)

Nous constatons une augmentation du temps de séchage avec l'accroissement de la proportion du fil COCONA® biodégradable dans les tricots. La différence entre le tricot *JIB* et *JIB67* est de 4 min. Elle est moins importante que la différence entre *JIB67* et *JIB100* qui est égale à 12 min. L'analyse statistique a montré que le changement de la proportion du fil biodégradable a un effet significatif sur le temps de séchage comme indiqué dans le Tableau 77.

Tableau 77: Résultats de l'analyse ANOVA du temps de séchage des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>Temps de séchage</i>	<i>Valeur de F</i>	76.00
	<i>Valeur de p</i>	0.003*

*: Statistiquement significatif.

En outre, la comparaison entre les différents tricots a révélé que la différence entre *JIB* et *JIB67* n'est pas statistiquement significative. Le Tableau 78 indique les valeurs de p de la comparaison entre les groupes.

Tableau 78: Comparaison par paires du temps de séchage des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
<i>JIB67 – JIB</i>	0.439
<i>JIB100 – JIB</i>	0.003*
<i>JIB100 – JIB67</i>	0.005*

*: Statistiquement significatif.

L'élimination complète du fil polyester classique ou COCONA® provoque une diminution considérable dans le pouvoir de séchage de la structure *JI*. La différence non significative entre *JIB* et *JIB67* signifie qu'une légère diminution dans la portion du fil polyester classique n'a pas un effet significatif sur le temps de séchage. Cependant, les différences significatives entre *JIB* d'une part et *JIB67* et *JIB100* d'autre part suggère qu'une diminution considérable dans la quantité de fil polyester classique ou l'absence complète de ce fil exerce une influence significative sur le temps de séchage. Le compactage du fil de tricotage influence le nombre de filaments qui ressortent à la surface du fil à la suite des forces externes soumis par le fil durant les étapes de fabrication. Ces filaments confèrent au tricot un aspect pileux. En diminuant la proportion du fil le plus compact, qui est le Polyester classique, le tricot devient plus en plus pileux. Ce qui provoque une diminution dans la capacité de séchage. Cette pilosité exerce une influence sur le processus d'échange de chaleur et de masse de la matière textile avec son environnement. Une pilosité importante entraîne une diminution du pouvoir global de séchage de l'étoffe textile. Myron J. Coplan [111] a trouvé que les étoffes textiles

avec des surface pileuses ont des faibles taux de séchage et par la suite elles sèchent lentement. Selon l'étude de Lyman Fourt et al. [109], les poils libres ont un effet sur l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'air surfacique immobile qui couvre la surface du textile. Cette couche surfacique d'air stagnant affecte le gradient de pression ou de concentration de la vapeur d'eau, qui existe entre l'environnement et le textile, et donc affecte finalement le taux d'évaporation. Lorsque l'épaisseur de cette couche augmente, le gradient de pression de vapeur d'eau diminue et à partir de là, la vitesse de transmission de la vapeur d'eau du textile mouillé vers l'environnement diminue à son tour.

L'influence de la LFA sur le pouvoir de séchage des structures textiles varie selon le type de la fibre et d'autres paramètres structuraux. Il est reporté dans la littérature qu'une augmentation dans la LFA entraîne une diminution du temps de séchage. Y. Jhanji et al. [31] ont constaté que les structures lâches à grande LFA ont un pourcentage d'évaporation d'eau plus élevé. Meltem Yanilmaz et Fatma Kalaoglu [176] ont conclu que le taux d'évaporation des structures lâches est plus élevé par rapport à leurs formes serrées. Sena Cimilli Duru et Cevza Candan [210] ont trouvé que l'interaction du type de fibre avec la LFA est statistiquement significative. Pour la fibre de viscose, le taux de séchage diminue avec l'augmentation de la LFA. Par contre pour la fibre de coton, une tendance opposée est observée. Dans une autre étude, Sena Cimilli Duru et Cevza Candan [52] ont conduit leur expérience en utilisant la fibre de polyamide. Ils ont trouvé qu'il n'existe pas une différence significative entre le temps de séchage des structures lâches et serrées. Les résultats, que nous avons trouvé, montrent que le temps de séchage est fortement lié à la LFA, avec un coefficient de Pearson égal à 0.991. De ce fait, une augmentation de la LFA provoque une augmentation du temps de séchage. La relation entre le temps de séchage et la LFA se traduit par sa relation avec la surface d'exposition du liquide absorbé et la facilité du passage de la vapeur d'eau. Une grande LFA joue un rôle positif dans le processus d'évaporation si l'augmentation de la surface d'exposition est dédiée à l'augmentation de surface d'échange de l'humidité. L'augmentation de la LFA pour des fils pileux entraîne une augmentation de la surface d'exposition des fibres emprisonnant l'air, par la suite il y aura une diminution dans le taux d'échange et finalement une augmentation du temps de séchage.

Concernant la perméabilité à l'air, nous observons que le tricot **JIB** est le tricot le plus perméable à l'air. En augmentant le pourcentage de mélange du fil COCONA[®] biodégradable, nous remarquons une diminution accentuée dans la perméabilité à l'air, entre **JIB** et **JIB67**, et puis une légère augmentation, entre **JIB67** et **JIB100**. La différence entre les valeurs de perméabilité à l'air est statistiquement significative entre les différents groupes. Les résultats

de l'analyse ANOVA et la comparaison par paires sont présentés respectivement dans le Tableau 79 et le Tableau 80.

Tableau 79 : Résultats de l'analyse ANOVA de la perméabilité à l'air des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	<i>Valeur de F</i>	273.83
	<i>Valeur de p</i>	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 80: Comparaison par paires de la perméabilité à l'air des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
<i>JIB67 – JIB</i>	0.000*
<i>JIB100 – JIB</i>	0.000*
<i>JIB100 – JIB67</i>	0.001*

*: Statistiquement significatif.

La fluctuation des paramètres structuraux est la raison de la variation des valeurs de la perméabilité à l'air. La perméabilité à l'air est inversement et fortement proportionnelle à la masse surfacique, à l'épaisseur, à la densité des mailles et à la LFA. Les coefficients de corrélation de Pearson sont présentés dans le Tableau 81.

Tableau 81: Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec les paramètres structuraux.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Épaisseur</i>	<i>Densité des mailles</i>	<i>LFA</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	-0.997	-0.987	-0.998	-0.660

En ce qui concerne la masse surfacique, l'épaisseur et la densité des mailles, des résultats similaires ont été reportés dans la littérature. S.S.Bhattacharya et J.R.Ajmeri [143] ont trouvé qu'une petite épaisseur et une masse surfacique réduite facilitent également le passage de l'air à travers la surface textile. Yetanawork Teyeme et al. [127] ont démontré que la perméabilité à l'air était négativement et significativement corrélée avec l'épaisseurs des étoffes textiles.

En ce qui concerne la LFA, la dépendance de la perméabilité à l'air des structures textiles tricotées à la LFA est prouvée par plusieurs chercheurs. D. Mikučionienė et al. [211] ont conclu que la perméabilité à l'aire augmente en augmentant la LFA et qu'ils ont une relation linéaire avec un coefficient de détermination « R² » égale à 0.996. Ebru Çoruh [212] a indiqué que la résistance au flux d'air diminue avec l'augmentation de la LFA. Cependant, dans notre étude nous avons trouvé qu'une augmentation de la LFA provoque une diminution de la perméabilité à l'air. Cette relation inhabituelle est expliquée par la différence dans l'épaisseur et la densité des mailles. En comparant les tricots *JIB* et *JIB67*, nous observons que la LFA de *JIB* est

inférieure à celle de **JIB67**, alors que **JIB** est plus perméable à l'air. Dans ce cas, l'effet de la LFA est négligé par rapport à l'effet de l'épaisseur et de la densité des mailles. L'épaisseur et la densité des mailles du tricot **JIB67** sont plus importantes que le tricots **JIB**. L'épaisseur détermine la longueur du chemin traversé par le flux d'air, alors plus ce chemin est long moins la structure est perméable à l'air. La densité des mailles traduit le nombre et la distribution des grandes ouvertures sur la surface de l'étoffe, plus la densité des mailles est faible plus l'ouverture créée par la maille est grande et finalement plus la quantité d'air traversant la structure textile augmente. En comparant **JIB67** et **JIB100**, nous remarquons qu'ils ont des épaisseurs et des densités des mailles similaires. Donc, l'augmentation de la LFA a créé une augmentation dans les ouvertures des mailles, ce qui a entraîné une augmentation significative de la perméabilité à l'air.

Les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative sont présentées dans le Tableau 76. La corrélation entre la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau est forte à l'état fini, avec un coefficient de Pearson égal à 0.989. La capacité d'une étoffe textile à transmettre la vapeur d'eau dépend de la microporosité et macroporosité de la structure et de l'hydrophilie de la structure textile. Cependant, le passage de l'air à travers le textile n'est influencé que par les macropores, les micropores et l'hydrophilie de la fibre n'a aucun effet sur la perméabilité à l'air des étoffes textiles.

Le tricot **JIB**, ayant un pourcentage de mélange 50/50, est le plus perméable à la vapeur d'eau. L'augmentation de la proportion du fil biodégradable n'a pas d'effet significatif sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Les paramètres de la structure qui varient entre les trois tricots exercent une influence majeure sur la perméabilité à la vapeur d'eau relative. Les coefficients de corrélation sont présentés dans le Tableau 82.

Tableau 82: Coefficients de corrélation de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots finis avec les paramètres structuraux.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Épaisseur</i>	<i>Densité des mailles</i>
<i>Perméabilité à la vapeur d'eau relative</i>	-0.973	-0.951	-0.996

MB Sampath et al. [181] ont trouvé que les structures ayants une transmission rapide de la vapeur d'eau sont les structures ayants une faible densité et une épaisseur fine. C. PRAHSARN et al. [126] ont conclu que la transmission de la vapeur d'eau est fortement corrélée à l'épaisseur des étoffes textile et, dans une moindre mesure, à la densité des mailles. Donc, l'augmentation de la matière fibreuse dans une unité de surface diminue la quantité de vapeur d'eau qui peut traverser l'assemblage fibreux [213].

Tableau 83: Résultats de l'analyse ANOVA des propriétés de mouillage des tricots finis.

<i>Facteurs</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	29.86
	<i>Valeur de p</i>	0.000*
<i>Temps de mouillage du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	38.81
	<i>Valeur de p</i>	0.000*
<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	46.58
	<i>Valeur de p</i>	0.000*
<i>Taux d'absorption du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	135.67
	<i>Valeur de p</i>	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Une augmentation du pourcentage du mélange du fil COCONA® biodégradable provoque une légère augmentation du temps de mouillage. La différence entre les temps de mouillages des tricots est trouvée statistiquement significative, comme il est montré dans le Tableau 83. La comparaison entre les différents groupes a montré que les changements de la proportion du fil biodégradable de 50% à 67% et de 50% à 100% sont significatifs. Cependant, le changement de la proportion du fil biodégradable de 67% à 100% n'est pas significatif. Les résultats de la comparaison multiple sont présentés dans le Tableau 84.

Tableau 84: Comparaison par paires du temps de mouillage du haut et du bas.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>
<i>JIB67 – JIB</i>	0.000*	0.000*
<i>JIB100 – JIB</i>	0.000*	0.000*
<i>JIB100 – JIB67</i>	0.746	0.932

*: Statistiquement significatif.

Tableau 85: Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec les paramètres structuraux.

	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>
<i>Masse surfacique</i>	0.983	0.997
<i>Épaisseur</i>	0.994	1.000
<i>Densité des mailles</i>	0.948	0.976

Le changement considérable dans les propriétés structurales entre les tricots *JIB* et *JIB67* sont à l'origine de la différence significative dans les temps de mouillage du haut et du bas. D'autre part, il existe une différence mineure dans les paramètres structuraux entre les tricots *JIB67* et *JIB100*, d'où la similarité dans les temps de mouillage de ces deux tricots. Le temps de mouillage a une forte association avec la masse surfacique, l'épaisseur et la densité des mailles. Les coefficients de corrélation sont indiqués dans le Tableau 85.

La diminution du temps de mouillage contribue à la réduction du temps de séchage. Le mouillage et la première étape de séchage. Le textile doit obtenir un excès d'humidité pour qu'il crée un gradient de pression de vapeur d'eau avec l'atmosphère, avec lequel l'échange des particules d'eau se déclenche et le processus de séchage commence. Le temps nécessaire de mouillage gouverne l'instant durant lequel le séchage commence. Le fait d'obtenir un mouillage rapide aide à avoir un séchage rapide. Une forte corrélation est trouvée entre les temps de mouillage et le temps de séchage. Les coefficients sont présentés dans le Tableau 86.

Suivant le Tableau 76, le taux d'absorption du haut est significativement inférieur à celui du bas. Nous observons que le taux d'absorption du haut le plus élevé est trouvé dans le tricot **JIB**, qui a le pourcentage le plus faible du fil COCONA® biodégradable. L'effet du pourcentage du fil COCONA® biodégradable sur le taux d'absorption est statistiquement significatif, comme il est indiqué dans le Tableau 83.

Tableau 86 : Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec le temps de séchage.

	<i>Temps de mouillage du haut</i>	<i>Temps de mouillage du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	0.752	0.678

L'augmentation de la proportion du fil biodégradable n'a pas accélérer la vitesse d'absorption des tricots finis, en revanche, nous avons observé une grande diminution puis une faible augmentation. Nous constatons une diminution entre les taux de **JIB** et **JIB67** et puis une augmentation entre **JIB67** et **JIB100**. Ces différences sont jugées significatives. Les résultats de la comparaison par paires sont présentés dans le Tableau 87.

Tableau 87 : Comparaison par paires du taux d'absorption du haut et du bas des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
JIB67 – JIB	0.000*	0.000*
JIB100 – JIB	0.001*	0.000*
JIB100 – JIB67	0.002*	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 88: Coefficients de corrélation du taux d'absorption avec les paramètres structuraux.

	<i>Taux d'absorption du haut</i>	<i>Taux d'absorption du bas</i>
<i>Masse surfacique</i>	-0.924	-0.956
<i>Épaisseur</i>	-0.891	-0.929
<i>Densité des mailles</i>	-0.968	-0.987

Le bon taux d'absorption du tricot **JIB** est dû à la présence d'un nombre important d'espaces vide qui favorisent la cinétique d'absorption du liquide. Cette explication est justifiée par les résultats des paramètres structuraux. **JIB** a la masse surfacique la plus faible, l'épaisseur

la plus petite et le nombre de mailles le plus réduit. Les paramètres structuraux exercent une influence significative sur le taux d'absorption du haut et du bas, des fortes corrélations négatives ont été trouvés entres ces paramètres et les taux d'absorption. Les coefficients de Pearson sont présentés dans Tableau 88 .

La vitesse de propagation du haut est similaire à la vitesse de propagation du bas, dans tous les tricots. En augmentant le pourcentage de mélange du fil COCONA® biodégradable la vitesse de propagation diminue. L'effet du pourcentage de mélange du fil biodégradable est trouvé statistiquement significatif. Les résultats de l'analyse ANOVA à un facteur sont présentés dans le Tableau 89.

Les dimensions, la distribution et la continuité des pores sont les facteurs clés qui régissent le comportement de propagation capillaire dans toutes les directions. Le mélange du fil COCONA® biodégradable avec un autre fil de polyester ayant des micropores de taille plus petit, le cas du fil polyester classique, peut-être à l'origine de la propagation capillaire supérieure des tricots *JIB* et *JIB67* comparée avec *JIB100*. La différence dans les tailles des pores peut accélérer le transport du liquide dans les canaux, car la vitesse de diffusion de l'eau dans les pores à petite taille est supérieure à celle dans les pores à grande tailles. Milada S. Novakovic et al. [214] ont trouvé qu'une réduction des micro-canaux entre les fibres du fil accélère la migration du liquide dans le sens radial et augmente ainsi la vitesse et le rayon de propagation du liquide.

Tableau 89: Résultats de l'analyse ANOVA de la vitesse de propagation des tricots finis.

<i>Facteurs</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Valeur de F</i>	171.92
	<i>Valeur de p</i>	0.000*
<i>Vitesse de propagation du bas</i>	<i>Valeur de F</i>	194.69
	<i>Valeur de p</i>	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 90: Comparaison par paires de la vitesse de propagation du haut et du bas.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>JIB67 – JIB</i>	0.000*	0.000*
<i>JIB100 – JIB</i>	0.000*	0.000*
<i>JIB100 – JIB67</i>	0.296	0.211

*: Statistiquement significatif.

Le test HSD de Tukey nous a indiqué que la différence significative existe entre les tricots *JIB* et *JIB67* et entre *JIB* et *JIB100*. Ces résultats sont similaires aux résultats trouvés dans les propriétés de mouillage. La différence significative entre *JIB* et *JIB67* est due à la

modification considérable dans les propriétés structurales. Tandis que, la différence entre les propriétés structurales de *JIB67* et *JIB100* n'est pas assez flagrante pour entraîner une différence significative dans la vitesse de propagation. La comparaison multiple est présentée dans le Tableau 90.

En analysant les relations entre la vitesse de propagation et les paramètres de la structure, nous avons trouvé une forte corrélation entre elles. Le Tableau 91 montre les coefficients de corrélation trouvés. L'augmentation de la masse surfacique indique une augmentation dans la masse fibreuse par unité de surface. Avec une augmentation de la LFA et la densité des mailles, la propagation capillaire diminue. L'augmentation de la portion fibreuse indique une diminution des espaces vides qui permettent au liquide de se propager à l'aide des forces capillaires. L'augmentation de l'épaisseur provoque un ralentissement dans la propagation horizontale du liquide. En appliquant une quantité d'eau sur un support textile posé horizontalement, deux types de propagation capillaire se déclenchent, une propagation transversale et une propagation horizontale. La quantité d'eau qui se propage sera distribuée dans plusieurs directions jusqu'à la diminution des forces capillaires ou la saturation des espaces vides. La vitesse de la propagation capillaire horizontale diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau propagé dans la direction transversale. Dans les structures fines, la propagation capillaire transversale, entraînée par des forces gravitationnelles et capillaires, s'achève plus vite que les structures épaisses. Ceci est dû à la présence d'un nombre réduit d'espaces vides et la courte distance parcourue par le liquide. De ce fait, la plupart de l'eau est propagée horizontalement, ce qui crée une force capillaire plus importante. Et par conséquence une vitesse de propagation supérieure.

Tableau 91: Coefficients de corrélation du temps de mouillage avec les paramètres structuraux.

	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Masse surfacique</i>	-0.932	-0.933
<i>Épaisseur</i>	-0.958	-0.958
<i>Densité des mailles</i>	-0.873	-0.874
<i>LFA</i>	-0.923	-0.921

La propagation rapide et l'augmentation de la surface d'étalement du liquide augmente la progression de l'évaporation. Ce résultat est justifié par Rita M. Crow [215] et Randall J. Oszcewski [46]. Ils ont comparé le taux d'évaporation des quantités équivalentes d'eau à partir d'une surface libre et à partir du textile. Ils ont conclu que l'eau dans le textile prend moins de temps à sécher. Ils ont expliqué ça par le fait qu'il y a une plus grande surface mouillée dans les

étoffes textiles à partir de laquelle l'eau peut s'évaporer. L'accroissement de la surface d'évaporation contribue à l'augmentation des taux d'échange de la chaleur et de la masse entre le textile et l'environnement, ce qui provoque une diminution significative dans le temps de séchage. Kam-Hong Chau et al. [124,216] ont remarqué que les étoffes plus épais et plus lourds ont des taux de séchage plus lents, et que les étoffes avec une plus grande surface mouillée ont un taux de séchage plus élevé. M. Manshahia and A. Das [217] ont indiqué que les étoffes, ayants un grand rayon mouillé et une bonne vitesse de propagation, peuvent avoir une capacité de séchage très efficace.

Tableau 92: Coefficient de corrélation de la vitesse de propagation avec le temps de séchage.

	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	-0.861	-0.860

L'indice de transport unidirectionnel cumulé et la capacité de gestion de l'humidité globale suivent la même évolution en augmentant le pourcentage du mélange du fil biodégradable. Nous observons une augmentation avec l'évolution du pourcentage du fil biodégradable entre 50% et 67%. Cependant, cette tendance s'inverse dans la structure 100% biodégradable.

Tableau 93: Résultats de l'analyse ANOVA du AOWT et OMMC des tricots finis.

<i>Facteurs</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>AOWT</i>	<i>Valeur de F</i>	217.85
	<i>Valeur de p</i>	0.000*
<i>OMMC</i>	<i>Valeur de F</i>	13.36
	<i>Valeur de p</i>	0.001*

*: Statistiquement significatif.

Tableau 94: Comparaison par paires du AOWT et OMMC des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>	
	<i>AOWT</i>	<i>OMMC</i>
<i>JIB67 – JIB</i>	0.000*	0.044*
<i>JIB100 – JIB</i>	0.000*	0.075
<i>JIB100 – JIB67</i>	0.000*	0.001*

*: Statistiquement significatif.

En augmentant la proportion du fil biodégradable dans le mélange, la différence entre les tricots dans l'indice de transport unidirectionnel et dans la capacité de gestion de l'humidité est statistiquement significative, dans le cas de l'augmentation et dans le cas de la diminution. Les résultats de l'analyse ANOVA et de la comparaison multiple des deux paramètres sont présentés respectivement dans le Tableau 93 et Tableau 94.

Les propriétés de gestion de l'humidité qui exercent une influence sur le comportement de séchage sont le temps de mouillage, le taux d'absorption, le rayon maximal de propagation et la vitesse de propagation. Le tricot **JIB**, qui représente une fraction de mélange du fil COCONA® biodégradable égale à 50 %, a les meilleures propriétés de gestion de l'humidité et par conséquent il montre un pouvoir de séchage supérieur.

D'après les résultats trouvés, nous constatons qu'il n'y a pas de changement significatif entre la conductivité thermique des tricots **JIB**, **JIB67** et **JIB100**. L'analyse de la variance confirme que la différence entre les moyennes de la conductivité thermique des tricots n'est pas significative.

Les valeurs de l'absorptivité thermique des tricots diminuent avec l'augmentation de la proportion du fil COCONA® biodégradable. L'effet du pourcentage du fil biodégradable sur l'absorptivité thermique est statistiquement significatif, les résultats de l'analyse ANOVA à un facteur sont présentés dans le Tableau 95. Ces résultats indiquent que l'absorptivité thermique du fil polyester classique est plus importante que le fil COCONA® biodégradable. Le fil polyester classique est moins pileux que le fil COCONA® biodégradable alors en diminuant la proportion de ce fil la pilosité du tricot augmente.

Tableau 95: Résultats de l'analyse ANOVA de l'absorptivité thermique des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
<i>Absorptivité thermique</i>	<i>Valeur de F</i>	19.85
	<i>Valeur de p</i>	0.000*

*: Statistiquement significatif.

Les poils encapsulent l'air entre les fibres émergentes et la surface de l'étoffe, de sorte que lorsque le textile entre en contact avec la peau, l'interface est couverte par une couche fine d'air. Ainsi, le transfert de chaleur par conduction est réduit par la résistance thermique de l'air immobile et par la suite le textile est plus chaud au toucher initial. De plus, la couche d'air stagnant ne peut pas transférer la chaleur par convection et le mécanisme de transfert de chaleur dominant est la conduction. Cette constatation est en accord avec les travaux de Marie José Pac et al. [155], qui ont conclu que les étoffes textiles plus pileuse encapsulent plus d'air à leurs surfaces et sont plus chaud au premier contact. De plus, Arzu Marmarali et al. [218] ont constaté qu'avec l'augmentation de la pilosité de l'étoffe textile, l'absorptivité thermique diminue également.

Les valeurs de résistivité thermique des tricots **JIB67** et **JIB100** sont supérieures à celle du tricot **JIB**. Le pourcentage du fil exerce une influence significative sur la résistivité thermique. Le Tableau 96 présente les résultats de l'analyse statistique ANOVA.

Tableau 96 : Résultats de l'analyse ANOVA de la résistivité thermique des tricots finis.

<i>Facteur</i>		<i>Pourcentage de mélange</i>
Résistivité thermique	<i>Valeur de F</i>	36.47
	<i>Valeur de p</i>	0.000*

*: Statistiquement significatif.

La comparaison multiple, indiquée dans le Tableau 97, montre qu'une différence significative existe qu'entre la structure **JIB** et les autres structures. Cette différence est due à la variation considérable entre l'épaisseur du tricot **JIB** et les deux autres tricots. Encore, la similarité dans la résistivité thermique des tricots **JIB67** et **JIB100** est due aussi à la ressemblance de leur épaisseur. En considérant la même structure, les tricots ayant une épaisseur élevée, résistent plus au flux de chaleur passant à travers la couche textile. Le coefficient de corrélation de la résistivité thermique avec l'épaisseur est égal à 0.999.

Tableau 97: Comparaison par paires de la résistivité thermique des tricots finis.

<i>Différence entre les groupes</i>	<i>Valeur de p ajustée</i>
JIB67 – JIB	0.000*
JIB100 – JIB	0.000*
JIB100 – JIB67	0.863

*: Statistiquement significatif.

L'analyse des différents tableaux ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- **Temps de séchage et respirabilité** : Une augmentation du temps de séchage est observée avec l'augmentation de la proportion du fil COCONA® biodégradable dans les tricots. L'élimination complète du fil polyester classique provoque une diminution considérable dans le pouvoir de séchage de la structure **JIB**. La fluctuation des paramètres structurales engendre une variation dans la perméabilité à l'air. Le tricot **JIB**, ayant un pourcentage de mélange 50/50, est le plus perméable à la vapeur d'eau.
- **Propriétés de gestion de l'humidité** : Une augmentation du pourcentage du mélange du fil COCONA® biodégradable provoque une légère augmentation du temps de mouillage. Le taux d'absorption le plus élevé est trouvé pour le tricot **JIB**. L'effet de la variation du pourcentage de mélange du fil biodégradable sur le taux d'absorption est statistiquement significatif. Le tricot **JIB** a les meilleures propriétés de gestion de l'humidité et par conséquent il montre un pouvoir de séchage supérieur.
- **Propriétés thermiques** : Les valeurs de l'absorptivité thermique des tricots diminuent avec l'augmentation de la proportion du fil COCONA® biodégradable. La résistivité thermique des tricots **JIB67** et **JIB100** est supérieure à celle du tricot **JIB**.

On peut conclure donc que le pourcentage de mélange du fil COCONA® biodégradable avec le fil polyester ordinaire qui offre le meilleur temps de séchage et le meilleur niveau de confort vestimentaire est le pourcentage 50/50.

5. Influence des cycles de lavage domestique sur les propriétés du confort vestimentaire

Les valeurs du temps de séchage des tricots lavés et leurs taux d'augmentation sont présentés dans le Tableau 76. Nous observons qu'il y a une augmentation considérable dans les temps de séchage de tous les tricots. Les cycles de lavage domestique peuvent modifier le comportement de séchage des étoffes textiles tricotées, ce qui est prouvé dans les travaux de Sena Cimilli Duru et Cevza Candan [52], ils ont constaté qu'après le processus de lavage, les taux de séchage des tricots diminuent, ce qui est le résultat d'altérations de la taille et du volume des pores inter-fils et inter-fibres ainsi que leurs tortuosités. Ils ajoutent que les processus de lavage répétés affectent les caractéristiques des fibres et des tricots à des degrés différents, ce qui entraîne une modification des capacités de transfert de liquide des tricots [210].

Tableau 98: Effet des cycles de lavage sur les paramètres de confort des tricots finis (*J1R, J1B, J2R, J2B, J3R, J3B, J1B67 et J1B100*)

<i>Réf</i>	<i>J1R (σ)</i>	<i>J1B (σ)</i>	<i>J2R (σ)</i>	<i>J2B (σ)</i>	<i>J3R (σ)</i>	<i>J3B (σ)</i>	<i>J1B67 (σ)</i>	<i>J1B100 (σ)</i>
Temps de séchage (min)	59 (1.41)	41 (1.41)	43 (2.3)	37 (1.41)	68 (0.7)	49 (2.12)	81 (1.41)	91 (1.41)
Taux d'augmentation (%)	47.5	24.24	19.44	8.82	78.94	36.11	118.91	85.71
Perméabilité à l'air (mm/s)	1957 (36.5)	2539 (74.9)	1509 (59.52)	1416 (48.8)	1544 (40.6)	1302 (35.52)	2060 (47.75)	2114 (35.96)
Taux de diminution (%)	20.89	18.2	22.61	22.58	20.65	24.08	22.78	23.18
Temps de mouillage du haut (s)	2.83 (0.14)	2.64 (0.19)	3.77 (0.16)	2.59 (0.15)	2.58 (0.12)	2.58 (0.1)	3.21 (0.21)	5.19 (0.36)
Taux d'augmentation (%)	27.47	36.08	82.12	19.35	18.34	17.27	43.94	129.64
Temps de mouillage du bas (s)	2.8 (0.13)	2.66 (0.17)	3.78 (0.21)	2.52 (0.13)	2.61 (0.2)	2.65 (0.14)	3.27 (0.21)	5.17 (0.3)
Taux d'augmentation (%)	21.21	37.11	79.14	15.06	19.72	47.29	39.14	120.94
Taux d'absorption du haut (%/s)	64.24 (3.42)	71.96 (1.23)	57.96 (3.66)	58.03 (1.78)	15.31 (0.29)	58.26 (1.18)	70.88 (1.35)	61.79 (4.16)
Taux de variation (%)	4.57	-4.56	-8.62	-10.75	-75.79	-13.26	15.12	-9.26
Taux d'absorption du bas (%/s)	75.12 (2.25)	78.71 (1.71)	74.1 (5.13)	73.65 (0.66)	28.27 (1.88)	71.93 (1.16)	76.12 (2.94)	92.08 (1.84)
Taux de variation (%)	-2.4	-7.12	-2.51	-4.44	-62.99	-7.65	3.18	17.94
Rayon de propagation maximal du haut (mm)	20.8 (1.09)	27.8 (1.64)	26 (2.5)	28.8 (1.78)	20.5 (1)	25.7 (1.15)	20.6 (1.34)	20 (0)
Taux de diminution (%)	30.66	7.33	13.33	4	31.66	14.33	31.33	33.33
Rayon de propagation maximal du bas (mm)	20.4 (1.09)	27 (1.78)	26.25 (2.5)	27.6 (2.19)	20.75 (1.5)	25 (0)	20 (0)	20 (0)
Taux de diminution (%)	32	10	12.5	8	30.83	16.66	33.33	33.33
Vitesse de propagation du haut (mm/s)	4.23 (0.14)	6.21 (0.25)	4.83 (0.23)	5.95 (0.36)	3.38 (0.18)	5.77 (0.15)	4.38 (0.13)	3.24 (0.19)
Taux de diminution (%)	38.33	30.92	41.42	19.15	55.58	17.09	36.52	46.88
Vitesse de propagation du bas (mm/s)	4.06 (0.22)	6.27 (0.45)	4.54 (0.3)	5.87 (0.36)	2.6 (0.16)	5.64 (0.24)	3.57 (0.06)	3.15 (0.08)
Taux de diminution (%)	39.4	29.23	31.85	19.25	65.51	17.9	47.26	47.32
AOWT (%)	124.17 (11.6)	113.29 (7.7)	323.87 (20.6)	222.34 (11.98)	355.89(20.06)	173.33 (11.54)	145.3 (2.54)	146.35 (12.29)

Taux de variation (%)	-17.29	-11.55	145.74	37.42	235.36	94.42	-15.06	67.08
OMMC	0.63 (0.03)	0.61 (0.03)	0.83 (0.04)	0.73 (0.03)	0.65 (0.02)	0.69 (0.03)	0.55 (0.02)	0.61 (0.03)
Taux de variation (%)	-3.07	-4.68	31.74	12.3	8.33	21.05	-19.11	1.66
Perméabilité à la vapeur d'eau relative (%)	84.1 (0.4)	85.1 (0.3)	83.9 (1.2)	84.5 (0.5)	83.2 (0.3)	83.5 (0.5)	80.5 (0.7)	81 (0.6)
Taux de variation (%)	2.06	1.3	1.94	-1.85	2.84	0.84	-0.61	-1.21
Conductivité thermique (mW.m⁻¹.K⁻¹)	51.48 (2.03)	47.24 (1.04)	57.68 (0.13)	59.18 (1.98)	56.64 (1.25)	54.8 (0.91)	48.7 (0.29)	48.66 (0.55)
Taux de variation (%)	5.23	-0.96	-1.19	1.26	6.54	0.69	0.72	1.5
Absorptivité thermique (W.m⁻².s^{1/2}.K⁻¹)	137.43 (4.03)	105.3 (3.41)	144.86 (7.9)	171.23(0.03)	144.53 (4.9)	126.46 (4.84)	98.75 (5.31)	81.06 (4.1)
Taux de variation (%)	31.48	-4.7	4.98	7.75	41.69	28.21	-1.25	-12.83
Résistivité thermique (mK.W⁻¹.m⁻²)	11.42 (0.46)	10.4 (0.16)	8.56 (0.05)	8.36 (0.32)	8.5 (0.21)	10 (0.35)	11.46 (0.15)	11.4 (0.22)
Taux de variation (%)	0.35	8.33	4.9	3.46	-5.97	3.73	-1.71	-1.04

Taux de variation positive : Augmentation.

Taux de variation négative : Diminution.

La grande différence entre les temps de séchage des tricots finis et lavés existe dans les tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® régulier. Nous avons observé une différence de 19 minutes dans la structure **J1**, 7 minutes dans la structure **J2** et 30 minutes dans la structure **J3**. En revanche, une différence moins importante est détectée dans les tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® biodégradable, 7 minutes dans la structure **J1**, 3 minutes dans la structure **J2** et 13 minutes dans la structure **J3**. La différence entre les temps de séchage des tricots à l'état fini et à l'état lavé est trouvée statistiquement significative.

Les écarts trouvés entre l'état fini et l'état lavé, nous permettent de déduire que le fil biodégradable résiste mieux aux cycles de lavage domestiques que le fil COCONA® ordinaire et qu'il n'y a pas eu des altérations graves au niveau de la géométrie de ces pores. De plus, l'agent hydrophile appliqué dans le processus de finition est susceptible d'être éliminé ou détérioré par les cycles de lavage domestiques répétés, ce qui peut entraver la capacité de mouillage et de propagation capillaire des tricots et augmenter le temps de séchage. L'utilisation du fil polyester biodégradable permet d'obtenir une meilleure fixation de l'agent de finition et offre au consommateur un produit confortable qui dure plus du temps. Dans les trois structures et dans les deux états, les tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® biodégradable ont montré un meilleur pouvoir de séchage que les tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® régulier.

La présence du fil polyester classique joue un rôle considérable dans le maintien du pouvoir de séchage après les cycles de lavage domestique. Ce maintien peut être dû au pouvoir de fixation élevé de l'agent hydrophile, ce qui contribue à un meilleur séchage.

Après les cycles de lavage domestique, nous observons que toutes les valeurs de perméabilité à l'air sont diminuées. Cette diminution est trouvée statistiquement significative dans tous les tricots. L'augmentation de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la densité des mailles avec une diminution de la LFA a généré un blocage supplémentaire au sein de la structure fibreuse, ce qui engendre une diminution du pouvoir de la perméabilité à l'air de l'air perpendiculairement à la surface du textile.

Les tricots de la structure **J1** ont les valeurs de perméabilité à l'air les plus importantes après les cycles de lavage domestique. Les tricots **J1R** et **J1B** sont les tricots les plus légers, ils ont aussi les valeurs de LFA les plus élevées et les densités de mailles les plus faibles. La masse surfacique, la densité des mailles et la LFA sont statistiquement corrélés à la perméabilité à l'air comme indiqué dans le Tableau 99.

Tableau 99: Coefficients de corrélation de la perméabilité à l'air avec la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Densité des mailles</i>	<i>LFA</i>
<i>Perméabilité à l'air</i>	-0.943	-0.918	0.854

Les tricots fabriqués avec le fil COCONA® biodégradable ont des temps de mouillage inférieurs à ceux des tricots réguliers. Tous les tricots ont montré une augmentation statistiquement significative dans le temps de mouillage après les cycles de lavage domestique. Nous remarquons aussi que ce taux est quasiment proportionnel à la proportion du fil biodégradable.

Les tricots biodégradables présentent un taux d'absorption plus important que les tricots réguliers. Le taux d'absorption du bas reste toujours supérieur à celui du haut. Une diminution du taux d'absorption est observée dans la majorité des tricots après les cycles de lavage. Cette diminution est plus importante dans le tricot **J3R**, avec un taux de variation égal à 75.79 % sur la face supérieure et à 62.99 % sur la face inférieure.

Nous remarquons que le taux d'augmentation le plus élevé est trouvé avec le tricot **JIB100**, qui contient le pourcentage le plus élevé du fil COCONA® biodégradable. La nature hygroscopique de la fibre détermine le comportement de l'étoffe face à l'application de l'eau, de plus, l'arrangement des fibres à l'intérieur du fil et la disposition des fils à l'intérieur d'une structure ont une grande importance dans la détermination du comportement hydrique de l'étoffe textile. Avant lavage, une masse fibreuse élevée par unité de volume est l'origine d'une augmentation dans le temps de mouillage des tricots fabriqués. Mais après les cycles de lavage, la diminution de l'hydrophilie de la fibre est la cause principale de l'augmentation du temps de mouillage. L'application de l'agent hydrophile permet d'augmenter l'affinité de la fibre aux molécules d'eau, et donc améliorer l'hydrophilie. Après lavage, le taux de fixation de l'agent hydrophile diminue et on constate une augmentation du temps de mouillage. En diminuant le pourcentage du fil polyester régulier, le taux de fixation de l'agent hydrophile diminue. De ce fait, le fil polyester régulier assure une meilleure fixation de l'agent hydrophile que le fil COCONA® biodégradable.

Nous remarquons que les valeurs des propriétés de propagation ont diminué après les cycles de lavage. Cette diminution est trouvée statistiquement significative. Les rayons de propagation des tricots biodégradables sont plus élevés que les rayons des tricots réguliers. L'augmentation du pourcentage de mélange du fil COCONA® biodégradable provoque l'augmentation du taux de diminution des propriétés de propagation après les cycles de lavage domestique.

Les tricots biodégradables ont des vitesses de propagation supérieures à celles des tricots réguliers. La diminution dans les propriétés de propagation des tricots après le lavage est due principalement à la modification de l'arrangement et de la taille des pores, ce qui empêche le mouvement du liquide à l'intérieur de la structure textile. L'augmentation de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la densité des mailles justifient le changement intrinsèque de la structure fibreuse.

Le taux de diminution est plus accentué dans le cas des tricots fabriqués avec le fil COCONA® ordinaire. Ce qui peut être expliqué par la meilleure fixation de l'agent hydrophile. Le mouillage est le précurseur de la propagation capillaire. Donc, si le liquide ne mouille pas le textile, alors la propagation capillaire n'aura pas lieu. La diminution de l'hydrophilie à la suite des cycles de lavage, par l'élimination partielle de l'agent hydrophile a causé la diminution de la capacité de propagation capillaire de l'assemblage fibreux. Cette diminution est plus accentuée dans les tricots réguliers, car la fixation de l'agent hydrophile est plus efficace sur le fil COCONA® biodégradable que sur le fil régulier.

Le rayon maximal de propagation indique la surface à travers laquelle il existe un échange de masse. Plus la surface est grande plus le taux d'échange est important. En outre, la vitesse par laquelle le liquide atteint ce rayon est importante aussi afin d'avoir un comportement de séchage favorable. Une très forte corrélation négative est trouvée entre les propriétés de propagation et le temps de séchage à l'état lavé.

Tableau 100: Coefficients de corrélation du temps de séchage avec les propriétés de propagation après les cycles de lavage.

	<i>Rayon maximal de propagation du haut</i>	<i>Rayon maximal de propagation du bas</i>	<i>Vitesse de propagation du haut</i>	<i>Vitesse de propagation du bas</i>
<i>Temps de séchage</i>	-0.901	-0.906	-0.836	-0.826

L'indice de transport unidirectionnel cumulé augmente après le lavage dans les tricots **J2R**, **J2B**, **J3R**, **J3B** et **J1B100** cependant il diminue dans les tricots **J1R**, **J1B** et **J1B67**. Les versions biodégradables des trois structures possèdent des indices de transport unidirectionnel inférieurs à ceux des versions ordinaires. Nous observons une diminution significative dans l'indice de transport unidirectionnel cumulé dans les tricots **J1B** et **J1B67** et une augmentation significative dans le tricot **J1B100**. La présence du polyester régulier dans le mélange empêche la modification accentuée de la géométrie de la structure textile. L'augmentation de l'indice de

transport unidirectionnel signifie que le passage de l'eau de la face supérieure à la face inférieure par des forces gravitationnelles est plus grande.

Les valeurs de la capacité de gestion de l'humidité global des tricots lavés suivent la même évolution de l'indice de transport unidirectionnel. La diminution dans les propriétés de mouillage et de propagation après les cycles de lavage ne contribue pas à l'amélioration de la gestion de l'humidité des tricots.

Les valeurs de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des tricots fabriqués avec le fil polyester COCONA® biodégradable sont légèrement supérieures à celles des tricots fabriqués avec le fil régulier.

Nous avons remarqué qu'il existe une augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau relative après les cycles de lavage, sauf pour les tricots **J2B**, **J1B67** et **J1B100**. L'analyse par le t-test a montré que ces variations sont statistiquement significatives.

Les taux d'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des structures fabriquées avec le fil COCONA® ordinaire sont supérieurs à ceux des tricots biodégradables. Ces variations peuvent être dues à la diminution de l'hydrophilie des tricots ordinaires à la suite des cycles de lavage. La fixation de l'agent hydrophile sur le fil polyester COCONA® biodégradable semble plus efficace que celle sur le fil COCONA® ordinaire. Alors, après les sollicitations mécaniques et chimiques lors du lavage, la dégradation de l'agent hydrophile est plus importante dans les tricots ordinaires que dans les tricots biodégradables. La réduction dans les groupements fonctionnels sur lesquels les molécules d'eau peuvent se fixer entraîne une augmentation de la quantité de vapeur d'eau qui traverse la structure textile. En conséquence, la perméabilité à la vapeur d'eau relative est plus importante.

Bien que la variation de la conductivité thermique après les cycles de lavage domestique est non significative, sa corrélation avec la masse surfacique, la densité des mailles et la LFA reste forte. Le Tableau 101 montre les coefficients de corrélation de la conductivité thermique avec les paramètres structuraux.

Tableau 101: Coefficients de corrélation de la conductivité thermique avec les paramètres structuraux après les cycles de lavage.

	<i>Masse surfacique</i>	<i>Epaisseur</i>	<i>Densité des mailles</i>	<i>LFA</i>
<i>Conductivité thermique</i>	0.961	- 0.620	0.930	-0.891

Après les cycles de lavage domestique, les valeurs de l'absorptivité thermique de tous les tricots augmentent, sauf dans le cas des tricots **J1B**, **J1B67** et **J1B100**. L'augmentation des

valeurs est trouvée statistiquement significative. Donc, le lavage et séchage domestique peuvent modifier le comportement thermique de l'étoffe textile.

Après lavage la pilosité des tricots augmente ce qui provoque une diminution dans l'absorptivité thermique. La pilosité de ce fil reste quasiment constante après les cycles de lavage domestique. La pilosité globale des tricots contenant le fil polyester classique change légèrement après lavage.

Après les cycles de lavage domestique, la variation de la résistivité thermique des tricots est trouvée statistiquement significative. Une augmentation est observée dans la majorité des tricots, cela est dû principalement à l'augmentation de l'épaisseur après lavage. Comme il est montré à l'état fini, la résistivité thermique est fortement liée à l'épaisseur, avec un coefficient de Pearson égal à 0.884.

L'analyse des différents tableaux ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- **Temps de séchage :** L'augmentation du temps de séchage est plus importante dans les tricots fabriqués avec le fil COCONA[®] régulier que celui des tricots fabriqués avec le fil biodégradable. La fixation de l'agent hydrophile est plus efficace sur les fils COCONA[®] biodégradables.
- **Perméabilité à l'air :** Il existe une diminution significative dans la perméabilité à l'air dans tous les tricots.
- **Propriétés de gestion de l'humidité :** Les propriétés de mouillage ont régressé significativement après les cycles de lavage. Le taux d'augmentation du temps de mouillage, après lavage, augmente avec l'augmentation de la proportion du fil COCONA[®] biodégradable. Les tricots biodégradables présentent un taux d'absorption le plus important. Les valeurs de rayon maximal de propagation ont diminué après les cycles de lavage. La réduction des rayons de propagation des tricots fabriqués avec le fil COCONA[®] biodégradables est moins importante que pour les tricots fabriqués avec le fil COCONA[®] régulier.
- **Perméabilité à la vapeur d'eau :** Le taux d'augmentation de la perméabilité à la vapeur d'eau relative des structures fabriquées avec le fil COCONA[®] ordinaire sont supérieurs à ceux des tricots biodégradables.
- **Propriétés thermiques :** Après les cycles de lavage domestique, les valeurs de l'absorptivité thermique diminuent. La variation de la résistivité thermique des tricots est trouvée statistiquement significative.

6. Indice général de confort d'un vêtement de sport

Le confort d'un vêtement de sport est une combinaison multicritère d'un ensemble des propriétés et de caractéristiques demandées par le porteur et/ou fournies par le fabricant. Les exigences et le domaine d'utilisation (loisir, compétitif, professionnel) peuvent varier. Ainsi, certaines propriétés de confort peuvent être préférées et plus exigées par rapport à d'autres. La proposition d'un indice de confort permet de regrouper et de trier l'ensemble des paramètres de confort selon les exigences des clients et des utilisations du vêtement de sport.

6.1.Définition

L'indice général de confort est un indice numérique qui représente la valeur générale du produit en termes de confort. Il s'agit d'un moyen multicritère d'évaluer l'efficacité, la performance ou la qualité d'un produit. D'une manière générale, les indices généraux de confort caractérisent la qualité des matériaux ou des objets du point de vue caractéristiques et propriétés [219]. Dans le domaine du confort vestimentaire, l'indice général de confort est utilisé pour évaluer le niveau de confort global des étoffes. Cet indice sert comme un outil compréhensif permettant de garantir que les étoffes répondent aux normes de performance et de confort souhaitées pour les applications prévues. L'indice général de confort est défini par la formule suivante [219,220].

$$IGC = \sum_{i=1}^N r_i \quad (44)$$

Avec :

- IGC : Indice Général de confort.
- i : le rang du $i^{\text{ème}}$ paramètre pris en considération.
- N : le nombre de paramètres pris en considération.

Les rangs des paramètres particuliers ont été établis de telle manière qu'une plage plus élevée correspond à une meilleure performance, ou l'inverse, une plage plus élevée correspond à une valeur plus faible du paramètre. Cela dépend du paramètre et de son influence sur le confort physiologique [219].

Par exemple, dans le cas de la perméabilité à l'air, la valeur la plus élevée signifie une meilleure respirabilité du corps de l'utilisateur au cours d'une activité physique. De ce fait, tous les tricots ont été classés par ordre de la valeur de perméabilité à l'air la plus faible à la valeur de perméabilité à l'air la plus élevée. Ensuite, chaque échantillon a été classé de 1 (le rang le plus bas) à 24 (le rang le plus élevé).

L'indice de confort général est un outil polyvalent et puissant dans le domaine de l'évaluation des étoffes textiles, permettant aux fabricants et aux marques de garantir que leurs produits répondent aux normes de confort et de performance les plus élevées.

- 1) **Développement de produits** : les concepteurs et les fabricants utilisent le IGC pour sélectionner des étoffes qui répondent à des critères de performance spécifiques pour les nouveaux produits. Par exemple, lors du développement d'une nouvelle gamme de vêtements de sport, les tricots présentant des scores IGC élevés en termes de respirabilité, de gestion de l'humidité et de séchage sont prioritaires.
- 2) **Contrôle qualité** : le IGC permet de surveiller la régularité de la qualité du tissu pendant la production. Les tissus qui ne répondent pas au seuil IGC souhaité peuvent être rejetés ou nécessiter un traitement supplémentaire.
- 3) **Comparaison des fournisseurs** : les détaillants et les marques peuvent utiliser IGC pour comparer les tissus de différents fournisseurs, s'assurant ainsi de choisir les matériaux de la plus haute qualité pour leurs produits.
- 4) **Communication aux consommateurs** : le IGC peut être communiqué aux consommateurs via des étiquettes ou des descriptions de produits, les aidant à prendre des décisions éclairées en fonction de la qualité du tissu.

6.2.Sélection des critères de confort

Afin de calculer les valeurs de l'indice général de confort, nous avons sélectionné les propriétés les plus pertinentes du confort vestimentaire. Le mouillage, l'absorption, la propagation, le séchage et la respirabilité. Les propriétés prises en considération sont ; La perméabilité relative à la vapeur d'eau, la perméabilité à l'air, le temps de séchage, la moyenne entre le temps de mouillage du bas et du haut, la moyenne entre le taux d'absorption du bas et du haut et la moyenne entre la vitesse de propagation du bas et du haut.

Il est supposé que les propriétés considérées soient d'importance égale. La valeur de l'indice général de confort est calculée selon la formule suivante :

$$IGC=r_A+r_V+r_T+r_M+r_{AR}+r_P \quad (45)$$

Avec :

- r_A : Rang selon la perméabilité à l'air.
- r_V : Rang selon la perméabilité relative à la vapeur d'eau.
- r_T : Rang selon le temps de séchage.
- r_M : Rang selon le temps de mouillage.
- r_{AR} : Rang selon le taux d'absorption.
- r_P : Rang selon la vitesse de propagation.

Le nombre de propriétés considérées est 6 et le nombre d'échantillons évalués est 24 font que la valeur maximale du IGC peut être de 144. La valeur minimale peut être de 6.

6.3.Indice général de confort relative et étendu

Les valeurs absolues de l'indice général de confort peuvent être comprises entre 6 et 144. Pour différents nombres de matériaux évalués et de propriétés considérées, les valeurs peuvent être très différentes. Il est difficile d'interpréter les résultats présentés sous cette forme. Il est beaucoup plus pratique de présenter la valeur de l'indice général de confort comme une valeur relative comprise entre 0 et 1.

La valeur relative de l'indice général de confort est définie par la formule suivante :

$$IGC_{rel} = \frac{IGC}{N \times Nb} \quad (46)$$

Avec :

- IGC_{rel} : la valeur relative de l'indice général de confort.
- Nb : nombre d'échantillons évalués.
- N : nombre de paramètres pris en considération.

Une valeur relative plus élevée de l'indice de confort générale signifie une meilleure qualité. IGC_{rel} égal à 1 signifie une qualité parfaite.

Cependant, dans certains cas, l'importance des propriétés considérées n'est pas égale. Dans une telle situation, à chaque paramètre est attribué un poids ou une pondération en

fonction de son importance pour l'utilisation prévue du produit. Par exemple, dans les vêtements d'été, la respirabilité et la protection UV peuvent être fortement pondérées, tandis que dans les vêtements d'hiver, les propriétés thermiques peuvent avoir plus de poids.

Les pondérations ont été exprimées en décimales de telle sorte que la somme des pondérations soit égale à 1. La valeur de l'indice général de confort relatif étendu (IGC_{et}) est calculée selon la formule suivante.

$$IGC_{et} = \frac{0.1 \times r_A + 0.1 \times r_V + 0.25 \times r_T + 0.2 \times r_M + 0.15 \times r_{AR} + 0.3 \times r_P}{24} \quad (47)$$

La formule généralisée de l'indice général de confort étendu est la suivante :

$$IGC_{et} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i \times r_i}{Nb} \quad (48)$$

Avec :

t_i : degré d'importance de la i ème propriété exprimé sous forme décimale.

Les concepteurs et les fabricants utilisent le IGC pour sélectionner des tissus qui répondent à des critères de performance spécifiques pour les nouveaux produits. Par exemple, lors du développement d'une nouvelle gamme de vêtements de sport, les tissus présentant des scores IGC élevés en termes de respirabilité, de gestion de l'humidité et d'élasticité sont prioritaires.

6.4. Résultats et discussions

Le Tableau 102 présente les résultats des indices généraux de confort calculés.

La valeur la plus élevée de l'indice général de confort étendu est celle du tricot **JIB**, il est égal à 0.93. Ce tricot est le plus confortable parmi le groupe des échantillons testé. Il est le plus perméable à l'air et il a le temps de mouillage le plus faible. Il a également une excellente capacité de séchage. Durant une sudation intense, le port de ce tricot permet l'élimination rapide de la sueur à partir de la peau humaine et le dégagement efficace de cette sueur à l'environnement sous forme de vapeur d'eau. Cependant, le tricot **PCE** est le moins confortable avec un indice général de confort étendu égal à 0.15. Ce tricot est le moins respirant avec des valeurs de perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau les plus faibles. Il présente des capacités d'absorption et de propagation limitées.

Tableau 102: Indices généraux de confort.

<i>Code</i>	<i>IGC</i>	<i>IGC_{rel}</i>	<i>IGC_{et}</i>
<i>JIB</i>	126	0,88	0,93
<i>JFF</i>	118	0,82	0,80
<i>FFF</i>	120	0,83	0,80
<i>FFE</i>	108	0,75	0,78
<i>JCF</i>	110	0,76	0,75
<i>FCE</i>	106	0,74	0,70
<i>JCE</i>	97	0,67	0,70
<i>FCF</i>	105	0,73	0,68
<i>JFE</i>	87	0,60	0,68
<i>CCF</i>	97	0,67	0,65
<i>CFF</i>	95	0,66	0,61
<i>J2B</i>	76	0,53	0,45
<i>J2R</i>	65	0,45	0,45
<i>LFF</i>	64	0,44	0,44
<i>JIB67</i>	55	0,38	0,44
<i>JIR</i>	53	0,37	0,43
<i>JIB100</i>	53	0,37	0,43
<i>J3R</i>	52	0,36	0,37
<i>J3B</i>	58	0,40	0,33
<i>PFF</i>	46	0,32	0,31
<i>LCF</i>	42	0,29	0,28
<i>PFE</i>	22	0,15	0,20
<i>PCF</i>	24	0,17	0,16
<i>PCE</i>	21	0,15	0,15

Nous remarquons que les tricots les moins confortables, selon l'indice général de confort étendu, sont les tricots en liage piqué, *PFF*, *PFE*, *PCF* et *PCE*. Tandis que, les 10 plus confortables tricots sont les jerseys ou les tricots contenant des flottés. Nous pouvons constater aussi que les tricots fabriqués avec le fil fonctionnel biodégradable ont des indices plus forts que ceux fabriqués avec le fil fonctionnel régulier et il est important de mettre en évidence que le tricot le plus confortable, parmi les 24 tricots fabriqués dans ces études, est fabriqué par un fil fonctionnel écologique. Ce résultat pourrait inciter les producteurs des vêtements de sport à utiliser des matières premières écologiques et d'adopter des processus de fabrication durables le long de la chaîne logistique.

L'indice général de confort est une méthode utile pour regrouper plusieurs paramètres en un seul chiffre facilement interprétable. Les avantages d'utilisation de cet indice sont :

- Fournir une mesure quantitative et impartiale de la qualité des étoffes textiles.
- Assurer une qualité uniforme sur différents lots de production.
- Faciliter la comparaison de différentes étoffes, aidant ainsi à la prise de décision.

- Aider les marques à mettre en valeur la qualité supérieure de leurs produits.
- Simplifier le processus de sélection des tissus en consolidant plusieurs mesures de confort dans un seul index.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué dans un premier lieu, une comparaison entre les propriétés du confort vestimentaire du fil fonctionnel régulier et sa version biodégradable. Nous avons trouvé que le COCONA® biodégradable offre un niveau de confort vestimentaire supérieur à celui offert par le fil régulier. De plus, nous avons observé une amélioration dans le temps de séchage en utilisant le fil biodégradable. L'utilisation de fil COCONA® biodégradable dans la fabrication des tricots, permet d'avoir une meilleure sensation de confort vestimentaire pour les articles de sport.

L'augmentation du pourcentage du fil polyester fonctionnel et biodégradable de 50% à 67% et à 100% n'a pas donné une importante amélioration des caractéristiques du confort vestimentaire. Le meilleur pourcentage en terme du rapport qualité/prix est un mélange 50/50.

Dans un deuxième lieu, nous avons défini un indice général de confort (IGC). Cet indice a permis de comparer efficacement les tricots en fonction de leurs performances globales de confort vestimentaire. Les résultats obtenus peuvent aider à orienter les choix de fabrication vers des textiles à haute valeur ajoutée pour le confort quotidien et les activités physiques. L'analyse a révélé que les textiles avec une perméabilité élevée à la vapeur d'eau et un temps de séchage rapide, combinés à une bonne absorption, obtiennent les meilleurs scores dans l'IGC. En particulier, les tricots fabriqués à partir de fils biodégradables ont obtenu des scores plus élevés, soulignant leur potentiel en matière de confort et de durabilité.



Conclusion Générale



Conclusion générale

Cette thèse a permis de mener une étude approfondie sur le confort vestimentaire qui vise à apporter des solutions concrètes pour le développement et la conception des vêtements de sport offrant un confort optimal, tout en tenant compte des différents paramètres influençant cette performance. Grâce à une série d'expériences et d'analyses approfondies, il a été possible d'identifier les principaux facteurs qui déterminent le confort vestimentaire dans des conditions d'activité physique intense, et d'apporter des améliorations significatives aux matériaux et procédés de fabrication utilisée. L'approbation des performances de confort vestimentaire du nouveau fil fonctionnel et biodégradable a prouvé qu'il est possible de combiner la durabilité et la performance.

Le **premier chapitre** a présenté un état de l'art global sur le confort vestimentaire, en soulignant la complexité de ce concept, qui englobe plusieurs aspects : physiologique, tactile, ergonomique et thermo-psychologique. L'interaction du corps humain avec son environnement a été défini et exploré, mettant en lumière les mécanismes d'échange thermique et hydrique avec l'extérieur à travers le vêtement. Il a été démontré que les échanges thermiques et la gestion de l'humidité sont deux éléments clés pour garantir un confort physiologique. Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension des problématiques abordées dans les chapitres suivants.

Dans le **deuxième chapitre**, les matériels et méthodes utilisés pour caractériser les propriétés des textiles ont été détaillés. Ce chapitre a permis de définir les outils d'évaluation nécessaires à la mesure des paramètres structuraux des vêtements de sport, comme le temps de séchage, la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau, ainsi que les propriétés de gestion de l'humidité et de transfert thermique. Des méthodes statistiques, comme l'ANOVA et les tests de corrélation, ont été utilisées pour analyser les données recueillies et identifier les paramètres les plus influents sur le confort vestimentaire. Ce chapitre a mis en avant l'importance de disposer d'une méthodologie rigoureuse et d'instruments de mesure précis pour évaluer objectivement les performances des textiles. Un modèle numérique est développé et un protocole expérimental est introduit afin de déterminer les performances de séchage et d'étudier d'une manière plus fiable la cinétique d'évaporation de l'eau à partir du textile.

Nous avons exploré dans le **troisième chapitre** l'influence des paramètres de fabrication, tels que le tricotage, la teinture et le finissage, sur les propriétés de confort des vêtements de

sport. Les expériences menées ont montré que ces procédés de fabrication jouent un rôle déterminant dans la capacité des textiles à gérer la chaleur et l'humidité. Le temps de séchage des tricots est significativement influencé par l'ajout de charges dans le textile. Ces charges augmentent le temps de séchage, tandis que les mailles flottées n'ont pas eu d'impact notable. De plus, la perméabilité à l'air a diminué avec l'augmentation de la densité des mailles. Concernant la gestion de l'humidité, l'ajout de charges ralentit la vitesse de mouillage et augmente le taux d'absorption. Les tricots colorés en noir ont montré de meilleures performances globales en matière de gestion de l'humidité par rapport aux tricots jaunes. Nous avons constaté que toutes les propriétés du confort vestimentaire ont régressé après les cycles de lavage domestique.

Dans le **quatrième chapitre** nous avons examiné les performances liées au confort des tricots fabriqués avec du fil fonctionnel et biodégradable. Les résultats ont révélé que les tricots utilisant ce fil présentaient un meilleur temps de séchage et une meilleure gestion de l'humidité, ce qui est bénéfique pour les athlètes cherchant un confort thermique lors d'activités sportives intenses. Cependant, les tests ont aussi démontré que les tricots biodégradables sont légèrement moins perméables à la vapeur d'eau par rapport aux tricots en fil polyester régulier. L'effet des cycles de lavage domestique sont plus accentués dans les tricots réguliers que les tricots biodégradables. La fibre de polyester COCONA[®] biodégradable est une fibre écologique qui fournit un niveau de confort vestimentaire supérieur que la fibre COCONA[®] régulière. Alors, l'utilisation du fil COCONA[®] biodégradable dans les vêtements de sport d'été est recommandé. De plus, le pourcentage de mélange du fil COCONA[®] biodégradable avec le fil polyester ordinaire optimal est le pourcentage 50/50.

Nous avons achevé ce chapitre par le calcul de l'indice général de confort (IGC). Il a été proposé pour comparer les différentes structures textiles et classer les vêtements en fonction de leur performance globale. Cet indice prend en compte plusieurs critères de confort, notamment le temps de séchage, la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau et la gestion de l'humidité. Les résultats obtenus grâce à cet indice ont permis de classer objectivement les structures textiles, mettant en évidence que les tricots avec une proportion équilibrée de fil biodégradable offrent les meilleures performances globales en termes de confort. L'IGC s'est révélé être un outil précieux pour orienter les choix des fabricants et des concepteurs de textiles vers des produits plus performants et plus adaptés aux besoins des utilisateurs.

En résumé, cette thèse apporte une contribution significative à l'amélioration du confort vestimentaire dans les vêtements de sport, en optimisant à la fois le choix des matériaux et des

procédés de fabrication. L'introduction de fils biodégradables comme le polyester fonctionnel et biodégradable offre non seulement un confort supérieur mais contribue également à la réduction de l'impact environnemental des vêtements en polyester non biodégradable. Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'industrie textile, en mettant l'accent sur la combinaison du confort, de la fonctionnalité et de la durabilité dans la conception des vêtements sportifs. La méthodologie utilisée, basée sur des outils de mesure précis et des analyses statistiques rigoureuses, permet d'orienter efficacement les futurs développements dans le domaine du confort vestimentaire dans tous ces aspects.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] Agarwal G. Engineered Fibres & Fabrics for Active Sportswear. n.d.
- [2] Shishoo R. Textiles for Sportswear. 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16491-4>.
- [3] Shishoo R. Textiles in sport. 2005. <https://doi.org/10.1533/9781845690885>.
- [4] su CI, Fang JX, Chen XH, wu WY. Moisture Absorption and Release of Profiled Polyester and Cotton Composite Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* 2007;77. <https://doi.org/10.1177/0040517507080696>.
- [5] Uttam D, . R. Thermophysiological clothing comfort. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* 2021;7:98–103. <https://doi.org/10.15406/jteft.2021.07.00274>.
- [6] Alay S, Yilmaz D. An Investigation Of Knitted Fabric Performances Obtained From Different Natural And Regenerated Fibres. vol. 1. 2010.
- [7] Cay A, Gurlek G, Oglakcioglu N. Analysis and modeling of drying behavior of knitted textile materials. *Drying Technology* 2017;35. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1192190>.
- [8] Kyle CR. ATHLETIC CLOTHING. *Sci Am* 1986;254. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0386-104>.
- [9] Chau KH, Kan CW. Instrumental and Sensory Evaluations of Drying and Stickiness Properties of Fabrics. *Fibers and Polymers* 2019;20. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-8603-y>.
- [10] Reilly T. *Ergonomics in Sport and Physical Activity*. 2010. <https://doi.org/10.5040/9781492595458>.
- [11] Hassan M, Qashqary K, Hassan HA, Shady E, Alansary M. Influence of sportswear fabric properties on the health and performance of athletes. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2012;93.
- [12] Parsons K. *Human Thermal Comfort*. 2019. <https://doi.org/10.1201/9780429294983>.
- [13] McLoughlin J, Sabir T. High-performance apparel : Materials, development, and applications. 2017. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01391-0>.
- [14] Vol. *Drying: Principles and practice*. vol. 2. n.d.
- [15] Gurudatt K, Nadkarni VM, Khilar KC. A study on drying of textile substrates and a new concept for the enhancement of drying rate. *Journal of the Textile Institute* 2010;101. <https://doi.org/10.1080/00405000902732776>.
- [16] Das A, Alagirusamy R. *Science in clothing comfort*. 2010. <https://doi.org/10.1533/9780857092830>.
- [17] Song G. *Improving Comfort in Clothing*. 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857090645>.
- [18] Sinclair R. *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology*. 2014. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-17410-7>.
- [19] Au KF. *Advances in Knitting Technology*. 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857090621>.
- [20] Wardiningsih W. *Study of comfort properties of natural and synthetic knitted fabrics*. 2009.
- [21] Li Y. The science of clothing comfort. *Textile Progress* 2001;31. <https://doi.org/10.1080/00405160108688951>.
- [22] Parsons K. *Human thermal environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*, third edition. 2014. <https://doi.org/10.1201/b16750>.
- [23] Marty P. COURS DE TRANSFERTS THERMIQUES Conduction et rayonnement n.d.

- [24] Bhatia D, Malhotra U. Thermophysiological Wear Comfort of Clothing: An Overview. *J Text Sci Eng* 2016;06. <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000250>.
- [25] Wendt D, Van Loon LJC, Van Marken Lichtenbelt WD. Thermoregulation during exercise in the heat: Strategies for maintaining health and performance. *Sports Medicine* 2007;37. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737080-00002>.
- [26] Pan N, Gibson P. Thermal and moisture transport in fibrous materials. 2006. <https://doi.org/10.1533/9781845692261>.
- [27] Wilusz E. Military textiles. 2008. <https://doi.org/10.1533/9781845694517>.
- [28] Fanger PO. Thermal environment - Human requirements. *Environmentalist* 1986;6. <https://doi.org/10.1007/BF02238059>.
- [29] Gavin TP. Clothing and Thermoregulation during Exercise. *Sports Medicine* 2003;33. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333130-00001>.
- [30] Geraldles MJ, Lubos H, Araújo M, Belino NJR, Nunes MF. Engineering design of the thermal properties in smart and adaptive knitting structures. *Autex Research Journal* 2007;8.
- [31] Jhanji Y, Gupta D, Kothari VK. Effect of loop length and filament fineness on thermophysiological properties of polyester-cotton plated knit structures. *Journal of the Textile Institute* 2015;106. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.923594>.
- [32] Spencer DJ. *Knitting Technology* (second edition). 1996.
- [33] Gonzalez RR. Biophysics of Heat Exchange and Clothing: Applications to Sports Physiology. *Medicine, Exercise, Nutrition & Health* 1995;4.
- [34] Das B, Das A, Kothari VK, Fanguiero R, De Araújo M. Moisture Transmission Through Textiles Part I: Processes involved in Moisture Transmission and the Factors at Play. *AUTEX Research Journal* 2007;7.
- [35] Xu P, Sasmito AP, Mujumdar AS. Heat and mass transfer in drying of porous media. 2019. <https://doi.org/10.1201/9781351019224>.
- [36] Katopodes ND. *Free surface flows: Environmental Fluid Mechanics*. 2019.
- [37] Hayes SG, Venkatraman P. *Materials and Technology for Sportswear and Performance Apparel*. 2015. <https://doi.org/10.1201/b19359>.
- [38] Morton WE, Hearle JWS. *Physical Properties of Textile Fibres: Fourth Edition*. 2008. <https://doi.org/10.1533/9781845694425>.
- [39] Öztürk MK, Nergis B, Candan C. A study of wicking properties of cotton-acrylic yarns and knitted fabrics. *Textile Research Journal* 2011;81. <https://doi.org/10.1177/0040517510383611>.
- [40] Saricam C, Kalaoglu F. Investigation of the wicking and drying behaviour of polyester woven fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2014;105.
- [41] Pan N, Sun G. *Functional Textiles for Improved Performance, Protection and Health*. 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857092878>.
- [42] Patnaik A, Rengasamy RS, Kothari VK, Ghosh A. Wetting and wicking in fibrous materials. *Textile Progress* 2006;38. <https://doi.org/10.1533/jotp.2006.38.1.1>.
- [43] Hussain T, Nazir A, Masood R. Liquid Moisture Management in Knitted Textiles – A Review. *3rd International Conference on Value Addition & Innovation in Textiles (Covitex-2015)* 2015.
- [44] Laing RM, Wilson CA, Gore SE, Carr DJ, Niven BE. Determining the Drying Time of Apparel Fabrics. *Textile Research Journal* 2007;77. <https://doi.org/10.1177/0040517507078232>.
- [45] ISO 17617:2014. *Textiles — Determination of moisture drying rate*. n.d.
- [46] Crow RM, Oszczewski RJ. The Interaction of Water with Fabrics. *Textile Research Journal* 1998;68. <https://doi.org/10.1177/004051759806800406>.

- [47] Heinisch T, Bajzík V, Hes L. New methodology and instrument for determination of the isothermal drying rate of cotton and polypropylene fabrics at constant air velocity. *J Eng Fiber Fabr* 2019;14. <https://doi.org/10.1177/1558925019873482>.
- [48] Hagi AK. Moisture permeation of clothing: A factor governing thermal equilibrium and comfort. *J Therm Anal Calorim* 2004;76. <https://doi.org/10.1023/B:JTAN.0000032288.16502.d2>.
- [49] Fangueiro R, Filgueiras A, Soutinho F, Meidi X. Wicking Behavior and Drying Capability of Functional Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* 2010;80. <https://doi.org/10.1177/0040517510361796>.
- [50] Kim JO. Dynamic Moisture Vapor Transfer Through Textiles: Part III: Effect of Film Characteristics on Microclimate Moisture and Temperature Changes. *Textile Research Journal* 1999;69. <https://doi.org/10.1177/004051759906900306>.
- [51] Yoon HN, Buckley A. Improved Comfort Polyester: Part I: Transport Properties and Thermal Comfort of Polyester/Cotton Blend Fabrics. *Textile Research Journal* 1984;54. <https://doi.org/10.1177/004051758405400502>.
- [52] Cimilli Duru S, Candan C. Wicking and drying behaviors of knitted fabrics produced with different poliamide yarns. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2016;26.
- [53] Arai K. WEARING COMFORT OF WATER ABSORBENT ACRYLIC FIBERS. *Journal of the Textile Machinery Society of Japan* 1984;30. <https://doi.org/10.4188/jte1955.30.72>.
- [54] Chinta SK, Gujar PD. Significance of Moisture Management for High Performance Textile Fabrics. *Int J Innov Res Sci Eng Technol* 2013;2.
- [55] Candas V, Libert JP, Vogt JJ. Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1980;44. <https://doi.org/10.1007/BF00421090>.
- [56] Laing RM, Sleivert GG. CLOTHING, TEXTILES, AND HUMAN PERFORMANCE. *Textile Progress* 2002;32. <https://doi.org/10.1080/00405160208688955>.
- [57] Rengasamy RS. Wetting phenomena in fibrous materials. *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*, 2006. <https://doi.org/10.1533/9781845692261.1.156>.
- [58] Önal L, Arslan C, Paşayev N. Relation between structural parameters and drying properties of cotton knitted fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2013;23.
- [59] RV A. Moisture Management Properties of Textiles and Its Evaluation. *Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering* 2018;3. <https://doi.org/10.19080/ctfte.2018.03.555611>.
- [60] Chevront SN, Haymes EM. Thermoregulation and Marathon Running. *Sports Medicine* 2001;31. <https://doi.org/10.2165/00007256-200131100-00004>.
- [61] Yoo S, Barker RL. Moisture Management Properties of Heat-Resistant Workwear Fabrics— Effects of Hydrophilic Finishes and Hygroscopic Fiber Blends. *Textile Research Journal* 2004;74. <https://doi.org/10.1177/004051750407401110>.
- [62] Boughattas A, Benltoufa S, Hes L, Azeem M, Fayala F. Thermo-physiological properties of woven structures in wet state. *Industria Textila* 2018;69. <https://doi.org/10.35530/it.069.04.1452>.
- [63] Bogusławska-Baczek M, Hes L. Effective water vapour permeability of wet functional fabrics determined by a new method. *Fiber Society Spring 2011 Conference*, 2011.
- [64] Yu ZC, He HL, Lu YH, Lu X, Zhang JF, Lou CW, et al. Electromagnetic shielding, wicking, and drying characteristics of CSP/AN/SSW hybrid yarns-incorporated woven fabrics. *Journal of Industrial Textiles* 2016;46. <https://doi.org/10.1177/1528083715606117>.

- [65] Hes L, de Araujo M. Simulation of the Effect of Air Gaps between the Skin and a Wet Fabric on Resulting Cooling Flow. *Textile Research Journal* 2010;80. <https://doi.org/10.1177/0040517510361797>.
- [66] Wang F, Annaheim S, Morrissey M, Rossi RM. Real evaporative cooling efficiency of one-layer tight-fitting sportswear in a hot environment. *Scand J Med Sci Sports* 2014;24. <https://doi.org/10.1111/sms.12117>.
- [67] Rossi RM. High-performance sportswear. *High-Performance Apparel: Materials, Development, and Applications*, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100904-8.00017-1>.
- [68] Abrantes C, Sampaio J, Reis V, Sousa N, Duarte J. Physiological responses to treadmill and cycle exercise. *Int J Sports Med* 2012;33. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1285928>.
- [69] Onofrei E, Rocha AM, Catarino A. The influence of knitted fabrics' structure on the thermal and moisture management properties. *J Eng Fiber Fabr* 2011;6. <https://doi.org/10.1177/155892501100600403>.
- [70] Pandolf KB, Givoni B, Goldman RF. Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1977;43. <https://doi.org/10.1152/jappl.1977.43.4.577>.
- [71] Blacker SD, Fallowfield JL, Bilzon JLJ, Willems MET. Physiological Responses to Load Carriage During Level and Downhill Treadmill Walking. *Medicina Sportiva* 2009;13. <https://doi.org/10.2478/v10036-009-0018-1>.
- [72] Duru SC. Water-Related Comfort Properties of Silver-Modified Polyamide Fabrics Treated With Wicking and Antibacterial Finishes. *Clothing and Textiles Research Journal* 2020;38. <https://doi.org/10.1177/0887302X19871102>.
- [73] Pan YJ, Hsieh CT, Lou CW, Wang CC, Lin ZI, Chen YS, et al. Elastic knits with different structures composed by using wrapped yarns: Function and comfort evaluations. *Fibers and Polymers* 2017;18. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-1214-6>.
- [74] Çay A. Modelling of the drying behaviour of regenerated cellulosic fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2017;27.
- [75] Onofrei E. Identification of the most significant factors influencing thermal comfort using principal component analysis and selection of the fabric according to the apparel end-use. *Industria Textila* 2012;63.
- [76] Fukazawa T, Havenith G. Differences in comfort perception in relation to local and whole body skin wettedness. *Eur J Appl Physiol* 2009;106. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-0983-z>.
- [77] Hollies NR s., Custer AG, Morin CJ, Howard ME. A Human Perception Analysis Approach to Clothing Comfort. *Textile Research Journal* 1979;49. <https://doi.org/10.1177/004051757904901001>.
- [78] Oğlacioğlu N, Çay A, Marmaralı A, Mert E. Characteristics of knitted structures produced by engineered polyester yarns and their blends in terms of thermal comfort. *J Eng Fiber Fabr* 2015;10. <https://doi.org/10.1177/155892501501000104>.
- [79] Ahamed Chowdhury M, Mahbulul Alam M. Improvement of Moisture Management of Polyester Fabric Using Moisture Management Chemical Development of Responsive Camouflage Textile View project Improving hydrophilicity of micro-denier polyester fabric View project. n.d.
- [80] Crippen LK. Moisture transport properties of selected knit fabrics 1975.
- [81] Anon. Active sportswear fabrics. *JTN* 1994. <https://doi.org/10.31031/tteft.2019.05.000606>.
- [82] Chen YS, Fan J, Zhang W. Clothing Thermal Insulation During Sweating. *Textile Research Journal* 2003;73. <https://doi.org/10.1177/004051750307300210>.

- [83] Vivekanandan M V., Sreenivasan S. Dynamic transportation of water vapor through cotton and polyester-cotton blended fabrics: Part I: Indices characterizing moisture buffering and their interrelationships. *J Eng Fiber Fabr* 2012;7.
- [84] Chang YC, Lee KC, Miao MF, Yu HJ. Study on the Increase of Comfort in Ten Fashion Summer Tops Made of Four Kinds of Textiles. *Research Journal of Textile and Apparel* 2014;18. <https://doi.org/10.1108/RJTA-18-02-2014-B008>.
- [85] Kim JO, Spivak SM. Dynamic Moisture Vapor Transfer Through Textiles: Part II: Further Techniques for Microclimate Moisture and Temperature Measurement. *Textile Research Journal* 1994;64. <https://doi.org/10.1177/004051759406400207>.
- [86] Lyons DW, Vollers CT. The Drying of Fibrous Materials. *Textile Research Journal* 1971;41. <https://doi.org/10.1177/004051757104100805>.
- [87] Yiotis AG, Boudouvis AG, Stubos AK, Tsimpanogiannis IN, Yortsos YC. Effect of liquid films on the isothermal drying of porous media. *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics* 2003;68. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.68.037303>.
- [88] PRESTON JM, CHEN JC. Some Aspects of the Drying and Heating of Textiles Part III—The Migration of Solvents and Solutes during Drying. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* 1948;64. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1948.tb02497.x>.
- [89] Lyons DW, Vollers CT, Einashar AM. Contact drying of a sheet of moist fibrous material. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME* 1980;102. <https://doi.org/10.1115/1.3183838>.
- [90] Or D, Lehmann P, Shahraeni E, Shokri N. Advances in Soil Evaporation Physics-A Review. *Vadose Zone Journal* 2013;12. <https://doi.org/10.2136/vzj2012.0163>.
- [91] Khodaparast Haghi A. Relations for Water-Vapor Transport Through Fibers. vol. 5. 2004.
- [92] Bories SA. Fundamentals of Drying of Capillary-Porous Bodies. *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, 1991. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3220-6_12.
- [93] Toei R. Theoretical fundamentals of drying operation. *Drying Technology* 1996;14. <https://doi.org/10.1080/07373939608917089>.
- [94] Nissan AH, Kaye WG, Bell JR. Mechanism of drying thick porous bodies during the falling rate period: I. The pseudo-wet-bulb temperature. *AIChE Journal* 1959;5. <https://doi.org/10.1002/aic.690050122>.
- [95] Cowen W. Some Principles of Drying. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* 1939;55. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1939.tb02061.x>.
- [96] Zhu C, Takater M. Change of temperature of cotton and polyester fabrics in wetting and drying process. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics* 2012;5. <https://doi.org/10.3993/jfbi12201208>.
- [97] Li W, Xu W, Cui W, Wang X. A novel method to analyze the moisture liberation of textile fabrics. *Fibers and Polymers* 2008;9. <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0050-0>.
- [98] Bell JR, Nissan AH. Mechanism of drying thick porous bodies during the falling-rate period: II. A hygroscopic material. *AIChE Journal* 1959;5. <https://doi.org/10.1002/aic.690050318>.
- [99] Bell JR, Grosberg P. 18—The movement of vapour and moisture during the falling rate period of drying of thick textile materials. *Journal of the Textile Institute Transactions* 1962;53. <https://doi.org/10.1080/19447026208659871>.
- [100] Nissan AH, George HH, Bolles T V. Mechanism of drying thick porous bodies during the falling-rate period: III. Analytical treatment of macroporous systems. *AIChE Journal* 1960;6. <https://doi.org/10.1002/aic.690060312>.
- [101] Gilliland ER. Fundamentals of Drying and Air Conditioning. *Ind Eng Chem* 1938;30. <https://doi.org/10.1021/ie50341a007>.

- [102] Sherwood TK. The Drying of Solids—I. *Ind Eng Chem* 1929;21. <https://doi.org/10.1021/ie50229a004>.
- [103] Maroney RN. The State of Moisture Transport Rate Calculations in Wood Drying. *Wood and Fiber Science* 1969.
- [104] Drying of Porous Materials. n.d.
- [105] PRESTON JM, CHEN JC. Some Aspects of the Drying and Heating of Textiles: Part I—The Moisture in Fabrics. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* 1946;62. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1946.tb02387.x>.
- [106] Lehmann P, Assouline S, Or D. Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2008;77. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.77.056309>.
- [107] Sherwood TK. The Drying of Solids—II. *Ind Eng Chem* 1929;21. <https://doi.org/10.1021/ie50238a021>.
- [108] Lewis WK. The Rate of Drying of Solid Materials. *Ind Eng Chem* 1921;13. <https://doi.org/10.1021/ie50137a021>.
- [109] Fourt L, Sookne AM, Frishman D, Harris M. INDUSTRIAL SECTION The Rate of Drying of Fabrics*. 2014.
- [110] Shahidzadeh-Bonn N, Azouni A, Coussot P. Effect of wetting properties on the kinetics of drying of porous media. *Journal of Physics Condensed Matter* 2007;19. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/19/11/112101>.
- [111] Coplan MJ. Some Moisture Relations of Wool and Several Synthetic Fibers and Blends. *Textile Research Journal* 1953;23. <https://doi.org/10.1177/004051755302301207>.
- [112] Hougen OA. Rate of Drying Chrome Leather. *Ind Eng Chem* 1934;26. <https://doi.org/10.1021/ie50291a024>.
- [113] Erbay Z, Icier F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2010;50:441–64. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>.
- [114] Steele R. Factors Affecting the Drying of Apparel Fabrics. *Textile Research Journal* 1959;29. <https://doi.org/10.1177/004051755902901204>.
- [115] Some moisture relations of colloids.—I. A comparative study of the rates of evaporation of water from wool, sand and clay. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 1923;103. <https://doi.org/10.1098/rspa.1923.0046>.
- [116] Li W, Jiang P, Wang X, Li GW, Xu W. Experimental investigation on the surface humidity of fabric during the process of dynamic moisture liberation. *International Journal of Clothing Science and Technology* 2013;25. <https://doi.org/10.1108/IJCST-05-2012-0023>.
- [117] Brody I, Korösy F. Convection and conduction of heat in gases. *J Appl Phys* 1939;10. <https://doi.org/10.1063/1.1707346>.
- [118] Miles LWC. The drying of textile materials. n.d.
- [119] Fisher EA, Barker G. 17—the influence of various factors on the rate of drying of woollen and worsted fabrics. *Journal of the Textile Institute Transactions* 1927;18. <https://doi.org/10.1080/19447022708661403>.
- [120] Sartori E. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. *Solar Energy* 2000;68. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00054-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00054-7).
- [121] Raja D, Senthilkumar M, Mani K. Novel device for evaluating sweat evaporation characteristics of woven and knitted fabrics. *Indian J Fibre Text Res* 2017;42.

- [122] Cimilli S, Nergis BU, Candan C, Özdemir M. A Comparative Study of Some Comfort-related Properties of Socks of Different Fiber Types. *Textile Research Journal* 2010;80. <https://doi.org/10.1177/0040517509349782>.
- [123] Yang Y, Yu X, Chen L, Zhang P. Effect of knitting structure and yarn composition on thermal comfort properties of bi-layer knitted fabrics. *Textile Research Journal* 2021;91. <https://doi.org/10.1177/0040517520932557>.
- [124] Chau KH, Tang KPM, Kan CW. Constant Temperature Drying Rate Tester: Real-Time Water Evaporation Measurement of Fabrics. *IEEE Trans Instrum Meas* 2018;67. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2817400>.
- [125] Hyun AK, Seung JK. Physical Properties and Wear Comfort of Bio-Fiber-Embedded Yarns and their Knitted Fabrics According to Yarn Structures. *Autex Research Journal* 2019;19. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0038>.
- [126] Praharsan C, Barker RL, Gupta BS. Moisture Vapor Transport Behavior of Polyester Knit Fabrics. *Textile Research Journal* 2005;75. <https://doi.org/10.1177/0040517505053811>.
- [127] Süprem P, Kumaşların Ö, İletim N, Üzerine Ö, Çalışma B. a Study on the Moisture Transport Properties of the Cotton Knitted Fabrics in Single Jersey Structure. *Textile and Apparel* 2009;19.
- [128] Kowalski SJ. Thermomechanics of drying processes. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics* 2003;8.
- [129] Elmogahzy YE. Engineering textiles: Integrating the design and manufacture of textile products. 2019. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01393-9>.
- [130] Kolanjikombil M. The substrates : fibres, yarn and fabrics. n.d.
- [131] Cassidy T, Goswami P. *Textile and Clothing Design Technology*. 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315156163>.
- [132] Ahmad S, Ullah T, Ziauddin. *Fibers for Technical Textiles. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49224-3_2.
- [133] Ray SC. *Fundamentals and advances in knitting technology*. 2012. <https://doi.org/10.1201/b18245>.
- [134] Pan N, Sun Z. Thermal conduction and moisture diffusion in fibrous materials. *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*, 2006. <https://doi.org/10.1533/9781845692261.2.225>.
- [135] Zhu Q, Li Y. Effects of pore size distribution and fiber diameter on the coupled heat and liquid moisture transfer in porous textiles. *Int J Heat Mass Transf* 2003;46. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00370-3](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00370-3).
- [136] Paul R. *Functional Finishes for Textiles: Improving Comfort, Performance and Protection*. 2014. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-16373-8>.
- [137] Eltahan EAE, Sultan M, Mito AB. Determination of loop length, tightness factor and porosity of single jersey knitted fabric. *Alexandria Engineering Journal* 2016;55. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.02.006>.
- [138] Özgen B, Altaş S. The investigation of thermal comfort, moisture management and handle properties of knitted fabrics made of various fibres. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2014;24.
- [139] EN 12127 Textiles - Etoffes - Détermination de la masse surfacique sur de petits échantillons n.d.
- [140] ISO 5084 : 1996 Textiles — Détermination de l'épaisseur des textiles et produits textiles n.d.
- [141] EN 14971 Tricots - Détermination du nombre de mailles par unité de longueur et unité de surface n.d.

- [142] EN 14970:2006. Textiles. Knitted fabrics. Determination of stitch length and yarn linear density in weft knitted fabrics. n.d.
- [143] Bhattacharya SS, Ajmeri JR. Investigation of Air Permeability of Cotton & Modal Knitted Fabrics. *International Journal of Engineering Research and Development* 2013;6.
- [144] ISO 9237 : 1995 Textiles — Détermination de la perméabilité à l'air des étoffes n.d.
- [145] ISO 11092 : 2014 Textiles — Effets physiologiques — Mesurage de la résistance thermique et de la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire (essai de la plaque chaude gardée transpirante) n.d.
- [146] Hes L. Non-destructive determination of comfort parameters during marketing of functional garments and clothing. *Indian J Fibre Text Res* 2008;33.
- [147] AATCC 195-2009 : Test Method for Liquid Moisture Management Properties of Textile Fabrics n.d.
- [148] Troynikov O, Wardiningsih W. Moisture management properties of wool/ polyester and wool/bamboo knitted fabrics for the sportswear base layer. *Textile Research Journal* 2011;81. <https://doi.org/10.1177/0040517510392461>.
- [149] Sampath MB, Aruputharaj A, Senthilkumar M, Nalankilli G. Analysis of thermal comfort characteristics of moisture management finished knitted fabrics made from different yarns. *Journal of Industrial Textiles* 2012;42. <https://doi.org/10.1177/1528083711423952>.
- [150] Özkan ET, Kaplangiray BM. Investigating thermophysiological comfort properties of polyester knitted fabrics. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology* 2019;5. <https://doi.org/10.15406/jteft.2019.05.00180>.
- [151] Pamuk O. CLOTHING COMFORT PROPERTIES IN TEXTILE INDUSTRY. قسم التقنيات الاحيائية - كلية العلوم- جامعة بغداد بغداد ، الع ارق 2008;المجلد 49.
- [152] Noman MT, Petru M, Amor N, Yang T, Mansoor T. Thermophysiological comfort of sonochemically synthesized nano TiO₂ coated woven fabrics. *Sci Rep* 2020;10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74357-6>.
- [153] Marolleau A, Salaun F, Dupont D, Gidik H, Ducept S. Influence of textile properties on thermal comfort. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 254, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/18/182007>.
- [154] Pan N, Zhong W. Fluid transport phenomena in fibrous materials. *Textile Progress* 2006;38. <https://doi.org/10.1533/tepr.2006.0002>.
- [155] Pac MJ, Bueno MA, Renner M, El Kasmi S. Warm-Cool Feeling Relative to Tribological Properties of Fabrics. *Textile Research Journal* 2001;71. <https://doi.org/10.1177/004051750107100910>.
- [156] Hes L, de Araujo M, Djulay V V. Effect of Mutual Bonding of Textile Layers on Thermal Insulation and Thermal Contact Properties of Fabric Assemblies. *Textile Research Journal* 1996;66. <https://doi.org/10.1177/004051759606600410>.
- [157] Gunesoglu S, Meric B, Gunesoglu C. Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2005;13.
- [158] Standard B. Textiles-Physiological effects - Measurement of thermal and water-vapour resistance under steady-state conditions. 2012.
- [159] Fourt L, Harrist M. Diffusion of Water Vapor Through Textiles. *Textile Research Journal* 1947;17. <https://doi.org/10.1177/004051754701700502>.
- [160] Hossein. A Dictionary of Research Methodology and Statistics in Applied Linguistics. n.d.
- [161] Rutherford A. *Introducing Anova and Ancova: A GLM Approach*. 2001.
- [162] Paoletta MS. *Linear Models and Time-Series Analysis: Regression, ANOVA, ARMA and GARCH*. 2019.

- [163] Meier L. ANOVA and Mixed Models: A Short Introduction Using R. 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003146216>.
- [164] Vik P. Regression, ANOVA, and the General Linear Model: A Statistics Primer. 2024. <https://doi.org/10.4135/9781071939024>.
- [165] Vogt W. Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) Test. *Dictionary of Statistics & Methodology*, 2015. <https://doi.org/10.4135/9781412983907.n2011>.
- [166] Abdi H, Williams LJ. Tukey's Honestly Significant Difference. n.d.
- [167] Chesterman A. Book review: *Dictionary of research methodologies in Translation and Interpreting Studies*. *The International Journal of Translation and Interpreting Research* 2017;9. <https://doi.org/10.12807/ti.109201.2017.r01>.
- [168] Rutherford A. *Introducing Anova and Ancova: A GLM Approach*. 2001.
- [169] Ahmad S, Ullah T, Ziauddin. *Fibers for Technical Textiles*. *Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49224-3_2.
- [170] Matsuo T. Fibre materials for advanced technical textiles. *Textile Progress* 2008;40. <https://doi.org/10.1080/00405160802133028>.
- [171] Militký J, Venkataraman M, Periyasamy AP. Fibrous Structures and Their Impact on Textile Design. 2022. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4827-5>.
- [172] Sustainable textile materials for high-performance clothing n.d. <https://www.thirtysevenfive.com/sustainable-materials/> (accessed August 6, 2022).
- [173] Kyatuheire S, Wei L, Mwasiagi JI. Investigation of moisture transportation properties of knitted fabrics made from viscose vortex spun yarns. *J Eng Fiber Fabr* 2014;9. <https://doi.org/10.1177/155892501400900318>.
- [174] Manshahia M, Das A. Comfort Characteristics of Knitted Active Sportswear: Heat and Mass Transfer. *Research Journal of Textile and Apparel* 2013;17. <https://doi.org/10.1108/RJTA-17-03-2013-B006>.
- [175] Selli F, Turhan Y. Investigation of air permeability and moisture management properties of the commercial single jersey and rib knitted fabrics. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2017;27.
- [176] Yanılmaz M, Kalaoğlu F. Investigation of wicking, wetting and drying properties of acrylic knitted fabrics. *Textile Research Journal* 2012;82. <https://doi.org/10.1177/0040517511435851>.
- [177] Öner E, Okur A. The effect of different knitted fabrics' structures on the moisture transport properties. *Journal of the Textile Institute* 2013;104. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.782214>.
- [178] Senthilkumar P, Suganthi T. Influence of tuck stitch in wale direction on thermal comfort characteristics of layered knitted fabrics. *Indian J Fibre Text Res* 2019;44.
- [179] Nyoni AB, Brook D. Wicking mechanisms in yarns-the key to fabric wicking performance. *Journal of the Textile Institute* 2006;97. <https://doi.org/10.1533/joti.2005.0128>.
- [180] Senthilkumar M, Sampath MB, Ramachandran T. Moisture Management in an Active Sportswear: Techniques and Evaluation—A Review Article. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E* 2012;93. <https://doi.org/10.1007/s40034-013-0013-x>.
- [181] Sampath MB, Mani S, Nalankilli G. Effect of filament fineness on comfort characteristics of moisture management finished polyester knitted fabrics. *Journal of Industrial Textiles* 2011;41. <https://doi.org/10.1177/1528083711400774>.
- [182] Afzal A, Ahmad S, Rasheed A, Ahmad F, Iftikhar F, Nawab Y. Influence of fabric parameters on thermal comfort performance of double layer knitted interlock fabrics. *Autex Research Journal* 2017;17. <https://doi.org/10.1515/aut-2015-0037>.

- [183] Öner E, Okur A. Thermophysiological comfort properties of selected knitted fabrics and design of T-shirts. *Journal of the Textile Institute* 2015;106. <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.995931>.
- [184] Bivainyte A, Mikučioniene D. Investigation on the air and water vapour permeability of double-layered weft knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2011;86.
- [185] Ogulata RT, Mavruz S. Investigation of porosity and air permeability values of plain knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2010;82.
- [186] Das B, Das A, Kothari V, Fanguiero R, Araujo MD. Moisture flow through blended fabrics - Effect of hydrophilicity. *J Eng Fiber Fabr* 2009;4. <https://doi.org/10.1177/155892500900400405>.
- [187] Yoo HS, Hu YS, Kim EA. Effects of Heat and Moisture Transport in Fabrics and Garments Determined with a Vertical Plate Sweating Skin Model. *Textile Research Journal* 2000;70. <https://doi.org/10.1177/004051750007000612>.
- [188] Suganthi T, Senthilkumar P. Thermo-physiological comfort of layered knitted fabrics for sportswear. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2017;27.
- [189] Chen Q, Tang KPM, Ma P, Jiang G, Xu C. Thermophysiological comfort properties of polyester weft-knitted fabrics for sports T-shirt. *Journal of the Textile Institute* 2017;108. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1255122>.
- [190] Üstündağ S, Çarkıt G, Türksoy HG. Thermal Comfort Properties of Fabrics Knitted from Bamboo/Cotton Blended Yarns. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik* 2017;19. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195649>.
- [191] Tobler-Rohr MI. *Handbook of sustainable textile production*. 2011. <https://doi.org/10.1533/9780857092861>.
- [192] Nayak R. *Sustainable technologies for fashion and textiles*. 2019. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00610-6>.
- [193] Blackburn RS. *Biodegradable and sustainable fibres*. 2005. <https://doi.org/10.1533/9781845690991>.
- [194] Keeble JJ, Topiol S, Berkeley S. Using Indicators to Measure Sustainability Performance at a Corporate and Project Level. *Journal of Business Ethics*, vol. 44, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1023343614973>.
- [195] Ozgen B. New biodegradable fibres, yarn properties and their applications in textiles: A review. *Industria Textila* 2012;63.
- [196] Karlsson S, Albertsson AC. Biodegradable polymers and environmental interaction. *Polym Eng Sci* 1998;38. <https://doi.org/10.1002/pen.10294>.
- [197] Poole AJ, Church JS, Huson MG. Environmentally sustainable fibers from regenerated protein. *Biomacromolecules* 2009;10. <https://doi.org/10.1021/bm8010648>.
- [198] ASTM D5511. *ASTM D5511 – 18: Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under High-Solids Anaerobic- Digestion Conditions*”. ASTM - American Society for Testing Materials 2018.
- [199] accessed Aug. 25 2022. Cocona’s 37.5 fibres to have new biodegradable additive - Fibre2Fashion. n.d. <https://www.fibre2fashion.com/news/textile-news/cocona-s-37-5-fibres-to-have-new-biodegradable-additive-255349-newsdetails.htm> (accessed August 6, 2023).
- [200] Cocona launches sustainable 37.5 biodegradable additive22 | TEXtalks | let’s talk textiles... n.d. <https://textalks.com/cocona-launches-sustainable-37-5-biodegradable-additive22/> (accessed August 25, 2022).
- [201] Srinivasan J, Ramakrishnan G, Mukhopadhyay S, Manoharan S. A study of knitted fabrics from polyester microdenier fibres. *Journal of the Textile Institute* 2007;98. <https://doi.org/10.1533/joti.2005.0180>.

- [202] Manshahia M, Das A. Thermophysiological comfort characteristics of plated knitted fabrics. *Journal of the Textile Institute* 2014;105. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.826419>.
- [203] Das B, Das A, Kothari VK, Fanguiero R, De Araújo M. Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics. *Fibers and Polymers* 2008;9. <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0036-y>.
- [204] Karaca E, Kahraman N, Omeroglu S, Becerir B. Effects of fiber cross sectional shape and weave pattern on thermal comfort properties of polyester woven fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2012;92.
- [205] Gupta D, Kothari VK, Jhanji Y. Heat and moisture transport in single jersey plated fabrics. *Indian J Fibre Text Res* 2014;39.
- [206] Chen Q, Tang K po M, Ma P, Jiang G. Evaluation of water absorption and transport properties of weft knitted polyester fabrics by spontaneous uptake water transport tester and conventional test methods. *Fibers and Polymers* 2016;17. <https://doi.org/10.1007/s12221-016-6454-3>.
- [207] Majumdar A, Mukhopadhyay S, Yadav R. Thermal properties of knitted fabrics made from cotton and regenerated bamboo cellulosic fibres. *International Journal of Thermal Sciences* 2010;49. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.05.017>.
- [208] Chidambaram P, Govind R, Venkataraman KC. The effect of loop length and yarn linear density on the thermal properties of bamboo knitted fabric. *Autex Research Journal* 2011;11.
- [209] Tesinova P, Atalie D. Thermal Comfort Properties of Sport Fabrics with Dependency on Structure Parameters and Maintenance. *Fibers and Polymers* 2022;23. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4160-x>.
- [210] Duru SC, Candan C. Effect of repeated laundering on wicking and drying properties of fabrics of seamless garments. *Textile Research Journal* 2013;83. <https://doi.org/10.1177/0040517512456754>.
- [211] Mikučionienė D, Milašiūtė L, Milašius R. Influence of knits structure on flammability and comfortability. *Autex Research Journal* 2014;14. <https://doi.org/10.2478/aut-2014-0022>.
- [212] Çoruh E. Optimization of comfort properties of single jersey knitted fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2015;23.
- [213] Varshney RK, Kothari VK, Dhamija S. A study on thermophysiological comfort properties of fabrics in relation to constituent fibre fineness and cross-sectional shapes. *Journal of the Textile Institute* 2010;101. <https://doi.org/10.1080/00405000802542184>.
- [214] Novaković MS, Milanović J, Grujić D, Stanković SB. Liquid transfer properties of textile fabrics as a function of moisture content. *Hem Ind* 2020;74. <https://doi.org/10.2298/HEMIND190925008N>.
- [215] Crow RM, Oszcewski RJ. THE EFFECT OF FIBRE AND FABRIC PROPERTIES ON FABRIC DRYING TIMES. 94AD.
- [216] Chau KH, Tang KPM, Lam NF, Kan CW. Constant Power Drying Rate Tester: Measurement of Water Evaporation from Textiles with Heat. *Fibers and Polymers* 2018;19. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-8555-7>.
- [217] Manshahia M, Das A. Moisture management of high active sportswear. *Fibers and Polymers* 2014;15. <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1221-9>.
- [218] Oglakcioglu N, Celik P, Ute TB, Marmarali A, Kadoglu H. Thermal Comfort Properties of Angora Rabbit/Cotton Fiber Blended Knitted Fabrics. *Textile Research Journal* 2009;79. <https://doi.org/10.1177/0040517508099396>.
- [219] Sukhbat O. SHAPING THE PHYSIOLOGICAL COMFORT PERFORMANCE OF MULTILAYER CLOTHING ASSEMBLIES FOR FIREFIGHTERS. n.d.

- [220] Frydrych I, Matusiak M. Changes in fabric handle resulting from different fabric finishing. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2003;11.