

REPUBLIQUE TUNISIENNE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE MONASTIR



*École Nationale d'Ingénieurs de Monastir*

*Laboratoire d'Etudes des Systèmes  
Thermiques et Energétiques*



**THESE DE DOCTORAT**  
**POUR L'OBTENTION DU GRADE DE**  
**Docteur**

**Spécialité : GENIE TEXTILE**

**Présentée par**

**Amal BOUGHATTAS**

**Caractérisation des paramètres de confort hydrique  
d'une étoffe textile**

Soutenue le 14/12/2021 devant le jury d'examen :

Pr. Nouredine LIOUANE	Professeur, ENIM	Président
Pr. Xianyi ZENG	Professeur, ENSAIT	Rapporteur
Pr. Jalila SGHAIER	Professeur, ENIM	Rapporteur
Pr. Mohamed HAMDAOUI	Professeur, ENIM	Examineur
Pr. Faten FAYALA	Professeur, ENIM	Directrice de thèse
Dr Sofien BENLTOUFA	Maître assistant, ENIM	Co-encadrant

# Je dédie cette thèse

## A mes chers parents

C'était votre rêve. Pour vous et grâce à vous que j'ai mené à bout cette thèse.  
Aucun mot ne peut exprimer ma gratitude, mon amour et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon enseignement et mon bien être.

J'espère que vous êtes fiers de moi.

Que dieu vous garde et vous accorde une bonne santé pour toujours.

## A mon cher mari

Tu as embelli ma vie.

Merci pour ton amour, ton soutien continu, ta patience et tes encouragements. C'était grâce à toi également que j'ai pu terminer ce travail.

Que dieu nous unisse pour toujours en plein amour et bonheur.

## A mon petit ange Zakaria

Tu es ma vie, ma force et mon trésor.

Que dieu te protège et te garde pour moi.

## A mes chères sœurs

En témoignage de la tendresse, l'amours et l'affection que je porte pour vous, je vous souhaite une vie pleine de bonheur, de réussite et surtout de santé.

A toutes ma famille BOUGHATTAS et toute ma belle famille

A la mémoire de mes grands parents et ma chère tante Hamida

## Remerciements

*Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmants jardiniers par qui nos âmes sont fleuries.*

**Marcel Proust**

Je tiens à exprimer ma profonde et ma sincère reconnaissance à ma directrice de thèse Madame **Faten FAYALA**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, pour la confiance qu'elle m'a accordée en me confiant ce sujet de thèse, son soutien permanent, sa patience, sa disponibilité et sa collaboration tout au long de ce travail doctoral. Je tiens à la remercier surtout pour les qualités humaines et la sympathie qu'elle m'a témoignés au cours de ces années de thèse.

Je remercie chaleureusement mon co-encadrant Monsieur **Sofien BENLTOUFA**, maître assistant au département de génie textile de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir. Il a été toujours disponible et présent. Je tiens également à le remercier pour ses conseils et remarques pertinents qui ont été d'un précieux apport.

J'adresse toute ma gratitude à Monsieur **Lubos HES**, Professeur à Technical University of Liberec (TUL), pour m'avoir accueilli dans le laboratoire « Comfort Evaluation » et de m'avoir permis de travailler dans d'aussi bonnes conditions.

J'exprime aussi tous mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de thèse : Merci à Monsieur **Noureddine LIOUANE**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Monsieur **Xianyi ZENG**, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT), et Madame **Jalila SGHAIER**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, je suis très honorée qu'ils aient accepté la charge de rapporter ma thèse.

Merci à Monsieur **Mohamed HAMD AOUI**, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, pour le grand honneur qu'il m'a fait en acceptant d'examiner ce travail.

Veillez, chers Professeurs, accepter mes chaleureux remerciements, ma profonde admiration pour toute vos qualité humaines et scientifiques et mon profond respect.

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Interface homme/textile : Le confort .....</b>	<b>4</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>II. Définition du confort.....</b>	<b>4</b>
<b>III. Le confort thermo-physiologique.....</b>	<b>5</b>
III.1. Les échanges thermiques.....	5
III.2. Bilan thermique et thermorégulation.....	9
<b>IV. Les paramètres affectant le confort .....</b>	<b>13</b>
IV.1. Les paramètres liés à l'individu .....	14
IV.2. Les paramètres liés au vêtement.....	15
IV.3. Les paramètres liés à l'environnement.....	18
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre II: Contribution vestimentaire dans la définition du confort hydrique .....</b>	<b>23</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>23</b>
<b>II. Les mécanismes de transfert hydrique à travers les étoffes textiles .....</b>	<b>23</b>
II.1. Transfert de la vapeur d'eau .....	24
II.2. Transfert de l'eau liquide.....	28
II.3. Transfert combiné de la vapeur d'eau et de l'eau liquide.....	31
<b>III. Méthodes de caractérisation des propriétés hydriques.....</b>	<b>32</b>
III.1. Méthodes de caractérisation de la transmission à la vapeur d'eau .....	32
III.2. Méthodes de caractérisation de la transmission de l'eau liquide .....	35
<b>IV. Aperçu sur les travaux antécédents sur le confort .....</b>	<b>38</b>
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>39</b>
<b>Chapitre III: : Matériels et méthodes .....</b>	<b>41</b>
<b>I. Introduction .....</b>	<b>41</b>
<b>II. Présentation des tissus utilisés.....</b>	<b>41</b>
<b>III. Préparation des échantillons .....</b>	<b>42</b>
III.1. Débouillissage des tissus en mélange Co/PET.....	42
III.2. Caustification des tissus en PET .....	43
<b>IV. Caractéristiques physiques (caractéristiques de fabrication) des tissus.....</b>	<b>43</b>
<b>V. Les propriétés du confort hydrique .....</b>	<b>47</b>
V.1. La perméabilité à l'air.....	47
V.2. Le transfert de la vapeur d'eau .....	47
V.3. Transfert multidirectionnel des liquides : Méthode de gestion de l'humidité (MMT).....	51
<b>VI. Méthode des plans d'expériences .....</b>	<b>55</b>
VI.1. Méthode des plans d'expériences.....	55

VI.2.	Analyse de la variance.....	56
VI.3.	Méthode des surfaces de réponse .....	58
<b>VII.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>58</b>
<b>Chapitre IV: Évaluation expérimentale des paramètres du confort hydrique .....</b>		<b>60</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>60</b>
<b>II.</b>	<b>Évaluation des paramètres du confort hydrique.....</b>	<b>61</b>
II.1.	La perméabilité à l'air.....	62
II.2.	Transfert de la vapeur d'eau.....	65
II.3.	Transfert de l'eau liquide : Méthode de gestion d'humidité.....	68
<b>III.</b>	<b>Relation entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication .....</b>	<b>75</b>
III.1.	Étude des effets principaux des paramètres de structure sur les paramètres de fabrication .....	75
III.2.	Interaction entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication .....	79
III.3.	Optimisation des paramètres de confort.....	83
III.4.	Optimisation du confort .....	86
<b>IV.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>87</b>
<b>Chapitre V: Modélisation de la diffusion à la vapeur d'eau .....</b>		<b>90</b>
<b>I.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>90</b>
<b>II.</b>	<b>Modélisation géométrique d'un tissu.....</b>	<b>90</b>
II.1.	La Macro porosité .....	91
II.2.	La micro porosité .....	93
<b>III.</b>	<b>Modélisation de la diffusion à la vapeur d'eau .....</b>	<b>94</b>
III.1.	Modèle n°1 .....	94
III.2.	Modèle n°2.....	99
<b>IV.</b>	<b>Transfert de la vapeur d'eau à l'état mouillé.....</b>	<b>104</b>
IV.1.	Les hypothèses théoriques.....	104
IV.2.	La détermination de la perméabilité effective à la vapeur d'eau .....	108
IV.3.	Étude de cas.....	109
<b>V.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>111</b>
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>113</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>116</b>

## Liste des figures

Figure I-1: Modes de transfert de chaleur entre le corps humain et son environnement (Enveho)	6
Figure I-2: Coupe transversale de la peau (docteurclic)	11
Figure I-3: Débit sudoral dégagé en fonction de la température interne du corps dans des conditions environnementales standards	11
Figure I-4: Perception de confort en fonction de la mouillure cutanée (Parsons 2003)	12
Figure I-5: Variation du taux de sudation dans les différentes zones du corps humain (Smith and Havenith 2011)	12
Figure I-6: (a) Les zones du corps produisant de la chaleur, (b) les zones du corps produisant de la sueur (Smith and Havenith 2011)	13
Figure I-7: Les différents paramètres affectant la sensation de confort selon (Salaun 2004)	14
Figure I-8: Schéma illustrant le mécanisme de transfert de chaleur et d'humidité à travers une étoffe textile (Liu 2014)	16
Figure I-9: Design d'un T-shirt (a) T-shirt femme, (b) T-shirt homme (Okur 2014)	18
Figure I-10: Zone de confort pour une température et humidité d'air données	19
Figure II-1: L'isotherme d'adsorption et l'isotherme de désorption (Bhouri 2006)	26
Figure II-2 : L'hystérésis de sorption (Bhouri 2006)	26
Figure II-3: Taux de gonflement des différentes fibres en fonction de l'humidité relative (Benltoufa 2013)	27
Figure II-4: Représentation schématique de la mouillabilité et de la progression capillaire à travers une étoffe textile (Azeem 2017)	28
Figure II-5 : Goutte de liquide en équilibre sur une surface	29
Figure II-6: Représentation schématique de la progression capillaire (Fanaei 2012)	30
Figure II-7 : L'ascension capillaire dans des pores de tailles différentes	31
Figure II-8: (a) Méthode de la coupe droite et (b) Méthode de la coupe inversée	32
Figure II-9: La cellule dynamique de perméabilité à l'humidité (DMPC)	33
Figure II-10: Schéma représentatif de la plaque chaude gardée transpirante selon la norme ISO 11092	34
Figure II-11: Schéma d'une goutte posée sur un support textile et ses dimensions associées	35
Figure II-12: Montage expérimental utilisé pour les tissus par Sénécot (Senecot 2002)	36
Figure II-13: Montage expérimental utilisé pour observer la montée capillaire des étoffes textiles (Benltoufa 2008)	37
Figure II-14: Montage expérimental de Miller pour le mouillage descendant (Benltoufa 2008)	38
Figure III-1: Machine à tisser "PICANOL GamMax-8-R-190"	41
Figure III-2: Images des tissus prises par microscope optique Motic (agrandissement $\times 20$ ): (a) toile, (b) Sergé 3/1 et (c) satin turc	42
Figure III-3: Fil occupant le tissu (a) et fil extrait du tissu (b)	44
Figure III-4: Instrument de mesure de la perméabilité à l'air FX3300	47
Figure III-5: (a) Photo du PERMETEST, (b) Schéma descriptif du PERMETEST	48
Figure III-6: Exemple des deux courbes de régression avec et sans film	51
Figure III-7: Moisture Management Tester (MMT)	51

Figure III-8: Schéma de la tête de mesure de MMT: (a) Section, (b) capteurs concentriques.....	52
Figure III-9: Courbe présentant les résultats obtenus du contenu de l'eau en fonction du temps ..	53
Figure IV-1: Schéma de la méthodologie de cette étude .....	60
Figure IV-2: Droite d'Henry pour chacune des variables de confort.....	62
Figure IV-3: Perméabilité à l'air des différentes étoffes en fonction de la composition, l'armure et le duitage .....	63
Figure IV-4: Influence des paramètres de structure sur la perméabilité à l'air .....	64
Figure IV-5: Courbes d'interactions de la Perméabilité à l'air .....	65
Figure IV-6: La résistance à l'évaporation en fonction de l'armure et le duitage : (a) cas des tissus en Co/PET, (b) cas des tissus en 100% PET .....	65
Figure IV-7: Coupe transversale des fils utilisés (a) fil en Co/PET, (b) fil de 100% Polyester .....	66
Figure IV-8: Influence des paramètres de structure sur la résistance à l'évaporation .....	67
Figure IV-9: Courbes des interactions de la résistance à l'évaporation.....	67
Figure IV-10: Temps de mouillage des différents tissus; (a) la surface supérieure (face envers), (b) la surface inférieure (face endroit).....	70
Figure IV-11: Taux d'absorption des différents tissus ; (a) la surface supérieure ( face envers), (b) de la surface inférieure (face endroit).....	71
Figure IV-12: Rayon maximal de la surface mouillée; (a) la surface supérieure (face envers), (b) la surface inférieure ( face endroit).....	71
Figure IV-13: Vitesse de diffusion des différents tissus; (a) la surface supérieure (face envers), (b) surface inférieure (face endroit) .....	72
Figure IV-14: Indice de transport unidirectionnel des différents tissus .....	73
Figure IV-15: La capacité totale de gestion d'humidité des différents tissus.....	73
Figure IV-16: Influence des paramètres de structure sur la capacité globale de la gestion d'humidité.....	74
Figure IV-17: Courbes des interactions de la gestion d'humidité .....	74
Figure IV-18: Influence des paramètres de structure sur le grammage .....	76
Figure IV-19: Influence des paramètres de structure sur l'épaisseur .....	76
Figure IV-20: Influence des paramètres de structure; (a) sur l'embuvage, (b) sur le retrait ....	77
Figure IV-21: Influence des paramètres de structure sur le facteur couverture .....	77
Figure IV-22: Influence des paramètres de structure sur la porosité .....	78
Figure IV-23: Influence des paramètres de structure sur la tortuosité .....	78
Figure IV-24: Courbes d'interactions (a) du grammage (b) du facteur de couverture (c) de la porosité (d) de l'épaisseur .....	79
Figure IV-25: Courbes d'interactions (a) de l'embuvage (b) du retrait (c) de la tortuosité.....	80
Figure IV-26: Diagrammes des effets principaux de la résistance à la vapeur d'eau Ret.....	81
Figure IV-27: Diagrammes des effets principaux de la perméabilité à la vapeur d'eau $P_{wv}$ ..	81
Figure IV-28: Diagrammes des effets principaux de la perméabilité à l'air .....	81
Figure IV-29: Diagrammes des effets principaux de la capacité globale de gestion d'humidité (OMMC).....	82
Figure IV-30: Graphique de contour de la perméabilité à l'air .....	84
Figure IV-31: Graphique de contour de la résistance à l'évaporation .....	84
Figure IV-32: Graphique de contour de la perméabilité relative à la vapeur d'eau .....	85

Figure IV-33: Graphique de contour de la capacité globale à la gestion d'humidité .....	86
Figure IV-34: Combinaison optimal entre les paramètres de fabrication est les paramètres de confort .....	87
Figure V-1: Motif élémentaire répétitif.....	91
Figure V-2: Résistances d'évaporation théoriques en fonction des résistances à l'évaporation expérimentales.....	98
Figure V-3: Évolution des résistances à l'évaporation théoriques en fonction des résistances à l'évaporation expérimentales .....	102
Figure V-4: Validation du modèle 2 sur des valeurs expérimentales d'autres échantillons selon Varshney et al. des tissus simple (Varshney,2010) et selon Nazir et al. des tissus double couches (Nazir, 2016) .....	103
Figure V-5: Flux thermique généré par l'évaporation de la sueur à partir de la peau et flux thermique libéré l'évaporation à partir de la surface d'un tissu mouillé.....	105
Figure V-6: Schéma de la connexion en séries des résistances évaporatives durant un flux de chaleur par évaporation passant de la peau à travers le tissu .....	105
Figure V-7 : Les résultats des mesures de la perméabilité relative à la vapeur d'eau à travers un tissu mouillé .....	110
Figure V-8: la perméabilité effective à la vapeur d'eau des 6 échantillons étudiés .....	111

## **Liste des tableaux**

Tableau I-1 : Pourcentage de perte de chaleur selon les différents mécanismes d'échange.....	9
Tableau I-2 : Dépenses énergétiques des différentes activités (ASHRAE -American Society of Heating 2005).....	15
Tableau I-3 : Les avantages et les inconvénients des différents types de fibres .....	17
Tableau III-1 : Les caractéristiques des fils utilisés .....	41
Tableau III-2 : : Paramètres et étapes de débouillissage .....	42
Tableau III-3 : Paramètres et étapes de caustification.....	43
Tableau III-4 : Caractéristiques des tissus.....	46
Tableau III-5 : Système de classement des valeurs de Ret .....	49
Tableau III-6 : Les paramètres mesurés par le MMT.....	54
Tableau III-7 : Notation selon les résultats obtenus pour l'ensemble des indices (Yao B 2006) .....	54
Tableau III-8 : Paramètres d'entrées des plans d'expériences.....	56
Tableau IV-1: Plan factoriel représentant les différentes expériences .....	61
Tableau IV-2 : Paramètres statistiques des différentes caractéristiques du confort .....	61
Tableau IV-3 : Propriétés de la gestion d'humidité mesurées à l'aide du MMT .....	69
Tableau IV-4 : Table d'analyse de la variance.....	80
Tableau IV-5: Équations de régression linéaire des paramètres du confort hydrique .....	82
Tableau V-1: Caractéristiques des tissus utilisés .....	109



---

---

# **Introduction Générale**

---

---

## Introduction générale

Comme la nourriture et le logement, le vêtement est un besoin indispensable pour chaque individu. Autrefois, la fonction principale du vêtement était limitée à la protection du corps humain vis-à-vis des conditions du milieu extérieur. C'est pour cette raison que la notion de confort était auxiliaire. Ces dernières décennies les notions de qualité et de confort vestimentaire sont devenus des critères très importants dans le choix des consommateurs et dans les orientations des stratégies de protection des industries du domaine textile.

La notion de confort est un phénomène complexe qui fait intervenir trois facteurs essentiels : le corps humain, l'environnement et les caractéristiques du textile (Hsieh, 1995) . Le confort vestimentaire d'un point de vue échanges avec l'atmosphère environnante est directement lié aux transferts thermiques et hydriques à travers la barrière textile. C'est pour cette raison que certaines équipes de recherches orientent leurs travaux vers la compréhension et la modélisation des phénomènes de transferts et d'échanges thermiques et massique entre le corps (peau humaine) et la structure textile.

Le vêtement doit être conçu de façon à prendre en compte le confort thermo-physiologique, de permettre une aisance au porter et une liberté des mouvements. La négligence de la sensation de confort d'un point de vue thermique et hydrique peut influencer l'état psychologique du porteur et influencer par conséquent ses performances et ses capacités à combler ses tâches correctement.

Dans un environnement chaud ou fortement humide et/ou au cours d'une activité (travail, sport), une transmission élevée de vapeur d'eau ou de sueur est diffusée de la peau du porteur à travers les couches textiles vers l'extérieur. Le microclimat régnant entre la peau humaine et la structure textile en contact avec cette peau est variable en fonction de plusieurs paramètres tels que la température environnante, l'humidité relative, l'activité, etc. Les échanges thermiques et hydriques entre la peau humaine et l'environnement à travers la structure textile sont importants pour préserver un microclimat sain et équilibré permettant d'avoir une bonne sensation de confort.

C'est dans ce cadre que se situe notre étude, qui consiste à évaluer les transferts de masse (vapeur d'eau et eau liquide) tout en étudiant l'effet de la structure et la composition des étoffes textiles sur les paramètres de confort hydrique.

Les résultats obtenus, lors de ce travail, sont présentés dans ce rapport qui est divisé en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué la notion de confort et ses inter disciplines tout en définissant les différentes notions physiologiques en relation avec le corps humain telles que la thermorégulation, les modes d'échanges de chaleur entre le corps et son milieu extérieur.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au confort hydrique. En effet, nous avons étudié les différents mécanismes de transfert de masse (transfert de vapeur d'eau et transfert de l'eau liquide). Ensuite, nous avons présenté les méthodes de mesure des paramètres du confort hydrique les plus utilisées.

Dans le troisième chapitre, intitulé matériels et méthodes, nous avons présenté les étoffes textiles choisies pour réaliser cette étude ainsi que leurs caractéristiques physico-chimiques. Ensuite, nous avons décrit le matériel utilisé pour déterminer les paramètres du confort hydrique tels que la résistance à l'évaporation, la perméabilité à l'air, le temps de mouillage, la vitesse de diffusion, etc.

Dans le quatrième chapitre, nous avons analysé expérimentalement les paramètres du confort hydrique à savoir la perméabilité à l'air, la résistance à l'évaporation, la perméabilité relative à la vapeur d'eau, ainsi que les propriétés de gestion d'humidité. Nous avons aussi, dans un premier lieu, étudié l'effet des paramètres de structure sur les paramètres de confort et les paramètres de fabrication. Nous avons déterminé les effets principaux ainsi que les interactions entre ces différents paramètres en utilisant les plans d'expériences. Ceci dans l'objectif de trouver ensuite des relations directes entre les paramètres de structure et des paramètres de confort. Une fois les relations établies, la dernière partie de ce chapitre, consiste à prévoir les paramètres de confort en fonction des paramètres de structure par les surfaces de réponse.

Le dernier chapitre est dédié à la modélisation de la résistance à la vapeur d'eau en fonction des paramètres géométriques de l'étoffe textile et aussi des conditions climatiques ainsi que la validation expérimentale des modèles établis. Pour bien évaluer l'efficacité des étoffes textiles dans des conditions réelles, la perméabilité à la vapeur d'eau au mouillé est évaluée avec un protocole expérimental spécifique.

Dans la conclusion finale, outre le résumé des principaux résultats obtenus, nous présenterons la continuité de ces travaux de recherche.

## Chapitre I

---

---

# **L'interface Homme/ Textile : Le confort**

---

---

## **Chapitre I: Interface homme/textile : Le confort**

### **I. Introduction**

Le vêtement considéré comme seconde peau doit non seulement protéger le porteur mais également être confortable, sans oublier le côté esthétique. Une fois vêtu, le porteur doit se sentir à l'aise et être dans un état de bien-être.

Avec le développement technologique textile, la qualité des étoffes et vêtements en termes de confort est devenue une exigence. La notion de confort devient un attribut essentiel demandé par les consommateurs modernes, et un critère de marketing pour les fabricants pour mieux vendre.

La recherche d'une compréhension satisfaisante sur l'influence et le rôle du vêtement (structure textile) sur la sensation de confort a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche théoriques et expérimentaux (Haslam 1988), (McCullough 1993). La structure textile intervient dans le système de régulation thermique en maintenant la température corporelle constante même s'il y'a des variations des conditions environnementales et/ou d'activité physique du porteur. Donc, elle présente une barrière entre le corps humain et l'environnement (Ding, Tang et al. 2011), (Frydrych, Dziworska et al. 2002).

Ainsi, nous évoquons dans ce qui suit, la notion de confort et en particulier le confort thermophysique. Nous présentons, ensuite la liaison entre le confort et les échanges thermiques et hydriques du corps humain. Par la suite, nous allons étudier les différents mécanismes et paramètres affectant le confort, ainsi que les interactions entre ces derniers.

### **II. Définition du confort**

Le confort d'un individu est une notion complexe que l'on peut qualifier de globale, comportementale et subjective. C'est un concept faisant intervenir des notions sociologiques, psychologiques et physiologiques.

Dans ce contexte, Slater (Slater 1985) définit le confort d'un individu comme étant "un état d'harmonie physiologique, psychologique et physique entre l'être humain et son environnement".

Selon Fourt (Fourt L 1970), le confort est lié à la situation du porteur tels que "travail" et les conditions critiques et non critiques qu'il subit. La réponse physiologique du corps humain à une combinaison de vêtement et de conditions environnementales données sont prévisibles lorsque l'état de stabilité est atteint.

La perception du confort ne peut être sentie qu'en son absence "l'inconfort". D'ailleurs, (Hatch 1993) a défini le confort comme étant un état de neutralité entre la sensation chaude et froide. En fait, l'inconfort peut être causé par les conditions externes (ambiance trop chaude, trop froide, humidité élevée, courant d'air, ...).

Il est admis que le confort est une sensation subjective. C'est un phénomène complexe qui se présente dans la somme de quatre aspects principaux : le confort thermo-physiologique, le confort sensoriel, le confort psychologique et le confort ergonomique (Bartels 2005).

- Le confort thermo-physiologique englobe le confort thermique et hydrique qui sont liés respectivement aux transferts de masse et de chaleur à travers le vêtement
- Le confort sensoriel traduit les sensations mécaniques du textile ressenties au contact de la peau ; un vêtement doux, souple ou bien rugueux, voir mouillé.
- Le confort psychologique est lié aux préférences personnelles et/ou les phénomènes sociaux tel que la mode.
- Le confort ergonomique est lié à la liberté de mouvement que permet le vêtement, à son aisance et aussi à son design.

### **III. Le confort thermo-physiologique**

Le confort thermo-physiologique est directement lié au rôle du vêtement en tant que barrière entre le corps humain et l'environnement. Il peut aussi être défini comme la capacité du maintien d'équilibre thermique entre la chaleur produite par le corps et celle cédée au milieu extérieur. Le confort thermo-physiologique est assuré par l'équilibre entre les échanges thermiques et hydriques entre le corps humain et l'environnement (Spencer-Smith 1976), (Williams 2009).

#### **III.1. Les échanges thermiques**

L'homme est un homéotherme ; il doit maintenir sa température interne constante aux environs des  $37^{\circ}\text{C} \pm 0,6^{\circ}\text{C}$  au repos et en ambiance climatique neutre (Threlkeld 1970), (Havenith 2002), (Guyton 2002). En fait, il échange avec son environnement des transferts de chaleur (conduction, convection, rayonnement, etc.) et de masse (perspiration et transpiration, etc.). La Figure I-1 résume l'ensemble de ces échanges.

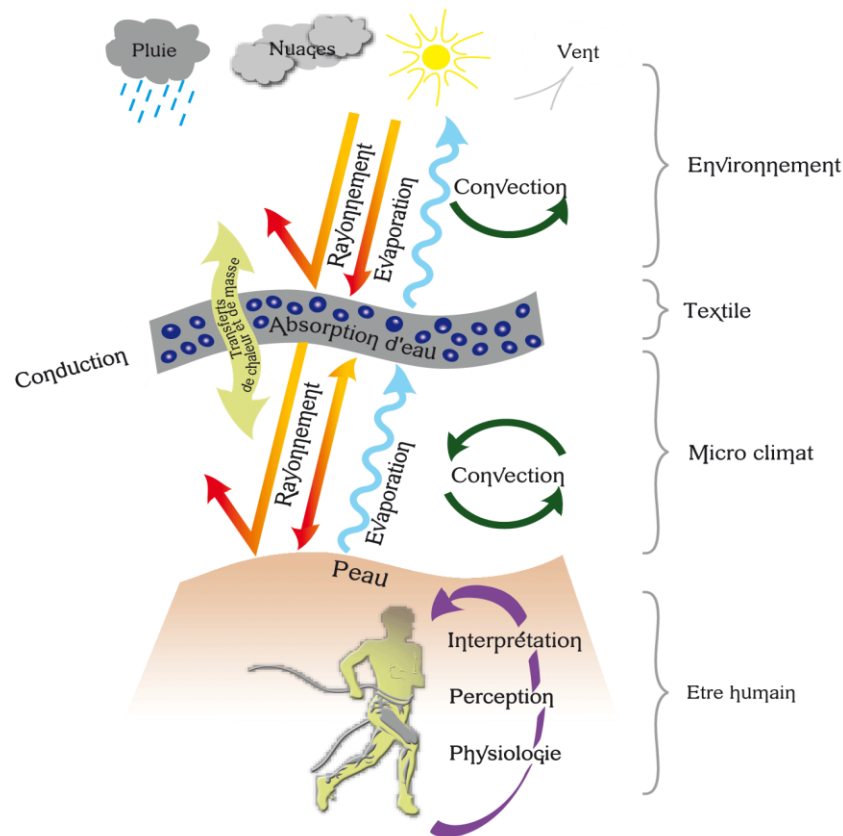


Figure I-1: Modes de transfert de chaleur entre le corps humain et son environnement (Enveho)

- Échange de chaleur par conduction

Les échanges de chaleur par conduction sont les échanges par contact entre deux corps de températures différentes. En général, les transferts de chaleur par conduction sont très faibles. Une personne debout a un pourcentage de contact avec le sol variant entre 1 et 3%. La majorité des échanges par conduction ont lieu entre le vêtement et les solides (chaussures/sol, siège/fesses), ou encore entre les mains et des objets qu'ils soient froids ou chauds. Le flux de chaleur de la surface en contact vers la peau est décrit par la relation suivante :

$$C_K = \lambda(T_p - T_s) \quad \text{I-1}$$

Avec:

- $C_k$  : la densité de flux de chaleur par conduction [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
- $\lambda$  : la conductivité thermique [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $T_p$  et  $T_s$  : respectivement les températures de la peau [K] et de la surface du solide en contact [K].

- Échange de chaleur par convection

Chez l'homme, la perte de chaleur par convection se fait au niveau de la peau et les voies respiratoires. En fait, au niveau de la surface cutanée, les échanges par convection s'établissent entre la peau et l'air ambiant au contact, ou dans le microclimat vestimentaire créé par l'air confiné entre la peau et la première couche du vêtement. Le flux de chaleur échangé par convection (Zhong, Xing et al.) est alors calculé selon l'équation suivante :

$$C_c = \alpha \cdot (T_s - T_a) \quad \text{I-2}$$

Avec:

- $C_c$  : le flux de chaleur par convection [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
- $\alpha$  : le coefficient de convection [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $T_s$  et  $T_a$  : respectivement la température de la surface [K] et la température de l'air [K].

Ces échanges augmentent lorsque l'air est renouvelé plus rapidement sous l'effet du déplacement du porteur : c'est l'effet « pompe » du climat sous-vestimentaire (film d'air entre la peau et le vêtement). Le coefficient de convection  $\alpha$  varie avec la vitesse de l'air et la posture du sujet. Par exemple, lorsque celle-ci passe de 0 à 2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , les échanges par convection sont multipliés par trois (Mairiaux P 1990).

Au niveau respiratoire, les échanges sont fonction du débit ventilatoire et de la différence de température entre l'air inspiré et l'air expiré. Ils sont exprimés par l'équation I-3 :

$$C_{res} = \frac{V \rho C_p (T_{a,ex} - T_{a,ins})}{A_D} \quad \text{I-3}$$

Avec:

- $V$ : le débit ventilatoire [ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ ],
- $\rho$ : la masse volumique des gaz expirés [ $\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$ ],
- $C_p$ : la chaleur spécifique des gaz [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $A_D$  la surface corporelle calculée [ $\text{m}^2$ ],
- $T_{a,ex}$  et  $T_{a,ins}$ : respectivement les températures de l'air expiré, et de l'air inspiré [K].

En 1972, Fanger a proposé une expression simplifiée décrite par l'équation suivante (P.O.Fanger 1970):

$$C_{res} = 0,0014 \cdot M (34 - T_a) \quad \text{I-4}$$

Avec:

- $M$ : la puissance métabolique exprimée en [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ],
- $T_a$ : la température de l'air exprimée en [K].



- Échange de chaleur par rayonnement

L'importance des échanges par rayonnement dépend des différences de température entre le corps humain et la source chaude, de la distance qui les sépare et de leurs pouvoirs d'absorption respectifs. Tous les corps, quelques soient leurs états, émettent et absorbent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. La capacité d'un corps à échanger de la chaleur sous cette forme dépend de son émissivité. La fraction de la surface du corps participant aux échanges varie avec la posture du sujet. Le flux thermique échangé par rayonnement est calculé selon la relation suivante :

$$R = \varepsilon_m \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{I-5}$$

Avec:

- R: le flux de chaleur par rayonnement [ $\text{W.m}^{-2}$ ],
  - $\varepsilon_m$  : l'émissivité du matériau,
  - $\sigma$  : la constante de Stephan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ),
  - $T_1$  et  $T_2$ : : les températures des deux corps [K].
- Échange de chaleur par évaporation au niveau de la peau (transpiration) et au niveau de l'appareil respiratoire

Comme la perte de chaleur par convection, l'échange de chaleur par évaporation s'effectue au niveau de la peau et au niveau des voies respiratoires.

En effet, l'évaporation de la sueur à la surface de la peau est le moyen le plus efficace pour perdre de la chaleur du corps humain.

Au niveau respiratoire ( $E_{res}$ ), le flux thermique est estimé par l'expression suivante proposée par Fanger (Fanger 1973) :

$$E_{res} = 0,0173 \times M (P_a - 5,87) \quad \text{I-6}$$

Avec :

- $E_{res}$  : le flux évaporative au niveau respiratoire [ $\text{W.m}^{-2}$ ],
- M: la puissance métabolique exprimée en [ $\text{W.m}^{-2}$ ],
- $P_a$  : la pression partielle de l'air inspiré [K.Pa].

Au niveau de la peau, le phénomène de sudation permet une déperdition calorifique évaporative importante. En effet, l'évaporation du film liquide placé à la surface de la peau s'effectue en prélevant l'essentiel de la chaleur nécessaire à l'organisme et est évaluée en considérant la loi de Kerslake:

$$E = h_E \times w \times f_{cl,E} (P_{sk,sat} - P_{amb}) \quad I-7$$

Avec:

- $E$ : le flux évaporatoire global de la peau [ $W.m^{-2}$ ],
- $P_{amb}$ : la pression partielle de vapeur d'eau ambiante [kPa],
- $P_{sk,sat}$  la pression saturante de vapeur d'eau à la température de peau  $T_{sk}$  [kPa],
- $w$ : la mouillure cutanée (sans dimensions),
- $f_{cl,E}$ : le facteur de réduction des échanges évaporatifs par le vêtement (sans dimensions).
- $h_E$ : le coefficient d'évaporation.
- normales.

La mouillure ( $w$ ) exprime le rapport entre la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné et la quantité d'eau maximale pouvant être admise sur celle-ci. Elle est calculée à partir du rapport entre le flux évaporatif ( $E$ ) actuel et le flux évaporatif maximum admis ( $E_{max}$ ) selon la relation de l'équation suivante (Guyton 2002):

$$w = 0,06 + 0,94 \frac{E}{E_{max}} \quad I-8$$

En fait, la dissipation de la chaleur, entre l'individu et l'environnement, peut être quantifiée en termes de pourcentage de perte de chaleur selon les différents mécanismes d'échanges (Guyton 2002) comme présentée le Tableau I-1:

Tableau I-1 : Pourcentage de perte de chaleur selon les différents mécanismes d'échange

Les échanges	Pourcentage de perte d'énergie
<b>Convection</b>	12 à 15%
<b>Rayonnement</b>	60%
<b>Évaporation</b>	22 à 25%
<b>Conduction</b>	3%

### III.2. Bilan thermique et thermorégulation

Afin de conserver la température corporelle constante et stable, un équilibre entre la production interne de chaleur (résultat de l'activité métabolique ( $M$ ) et du travail physique fourni à l'extérieur ( $W$ ) et les échanges de chaleur vers l'environnement est nécessaire. Le bilan thermique à l'équilibre est décrit par l'équation suivante :

$$M - W = C_K + (C_v + C_{res}) + R + (E + E_{res}) \quad I-9$$

Avec:

- $(M-W)$ : la production de chaleur interne [ $W.m^{-2}$ ],

- $C_v$  et  $C_{res}$ : les échanges de chaleur par convection respectivement cutanée et respiratoire [ $W.m^{-2}$ ],
- $E$  et  $E_{res}$ : les échanges de chaleur par évaporation cutanée et respiratoire. [ $W.m^{-2}$ ],
- $R$ : les échanges de chaleur par rayonnement [ $W.m^{-2}$ ],
- $C_k$ : les échanges de chaleur par conduction [ $W.m^{-2}$ ].

D'après l'équation (I-9) ci-dessus, on constate qu'à l'équilibre thermique, la production de chaleur interne est compensée par les échanges de chaleur par conduction, par convection, par rayonnement et par évaporation ainsi que par les échanges de chaleur au niveau cutané et au niveau des voies respiratoires. En toutes circonstances, le bilan thermique, qui est la somme algébrique des flux de chaleur produits par l'homme et de ceux échangés avec l'environnement, doit être nul. Il s'agit donc d'un équilibre entre la thermogénèse production de chaleur et la thermolyse perte de chaleur. L'organisme échange de la chaleur avec l'environnement par conduction, rayonnement, convection, et évaporation par voies cutanées et respiratoires.

$$C_k + (C_v + C_{res}) + R + (E + E_{res}) - (M - W) = 0 \quad \text{I-10}$$

Dans ce cas, la température corporelle est considérée comme étant stable. En effet, lorsque le corps absorbe le flux de chaleur, les échanges thermiques sont positifs, et il les émet lorsque ceux-ci sont négatifs.

La thermorégulation du corps humain est basée sur la combinaison entre les pertes et les gains de chaleur. Elle permet de maintenir une température interne constante du corps, malgré la variation des conditions externes. Quatre mécanismes interviennent dans la thermorégulation à savoir la transpiration, le frissonnement, la vasodilatation et la vasoconstriction (Pan N 2006). Puisque notre étude porte sur le confort hydrique, nous allons nous intéresser plus précisément à la transpiration.

### ***III.2.1. La transpiration et la production de sueur***

La Figure I- 2 présente une coupe transversale de la peau illustrant les organes responsables de la transpiration. La sécrétion de la sueur est assurée par les glandes sudoripares. Lorsqu'il fait chaud, en cas d'activité physique intense ou encore en cas de fièvre, les cellules sudoripares vont produire de la sueur qui va s'écouler à travers les pores de la peau et se répandre sur la peau. Ainsi, avec l'augmentation de la température interne, un débit sudoral important est induit pouvant atteindre jusqu'à 450 ml/h pour une température interne de 39,6°C (Saltin and Gagge 1971) comme le montre la Figure I-3.

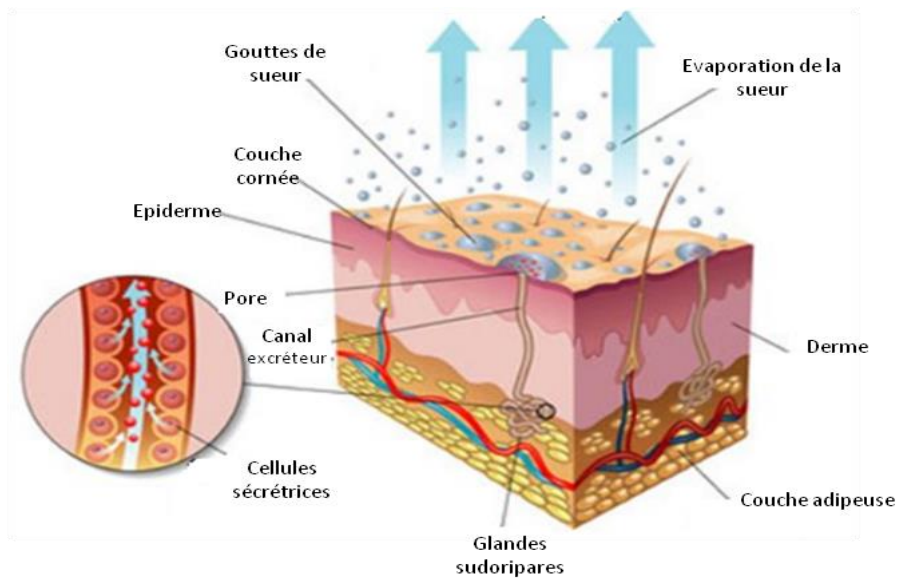


Figure I-2: Coupe transversale de la peau (docteurclie)

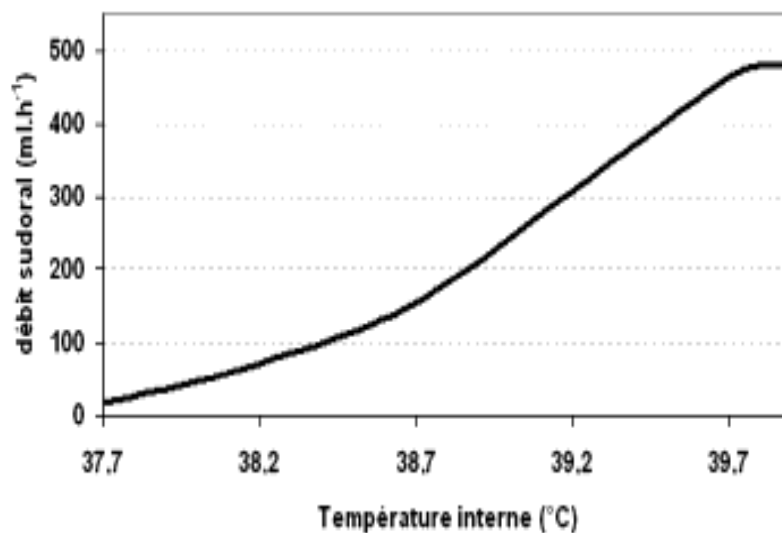


Figure I-3: Débit sudoral dégagé en fonction de la température interne du corps dans des conditions environnementales standards

### III.2.2. Sensibilité thermique et hydrique

La sensibilité hydrique correspond à la détection de l'humidité par la surface de la peau du corps humain. L'élévation de la température cutanée provoque la libération d'acétylcholine augmentant ainsi la sensibilité des récepteurs situés sur les cellules sécrétrices des glandes sudoripares, responsables des phénomènes de sudation. De ce fait, l'inconfort au chaud est souvent lié à la mouillure de la peau. En effet, pour les sujets habillés, une mouillure de peau ( $w$ ) supérieure à 0,2 est alors perçue comme un inconfort. La notion d'inconfort est amenée lorsqu'une partie de la sueur commence à ruisseler dans les régions où l'évaporation se retrouve limitée (Figure I-4). La mouillure de la peau est alors le résultat de l'ensemble des conditions environnementales, de l'activité physique du porteur, et des propriétés du vêtement.

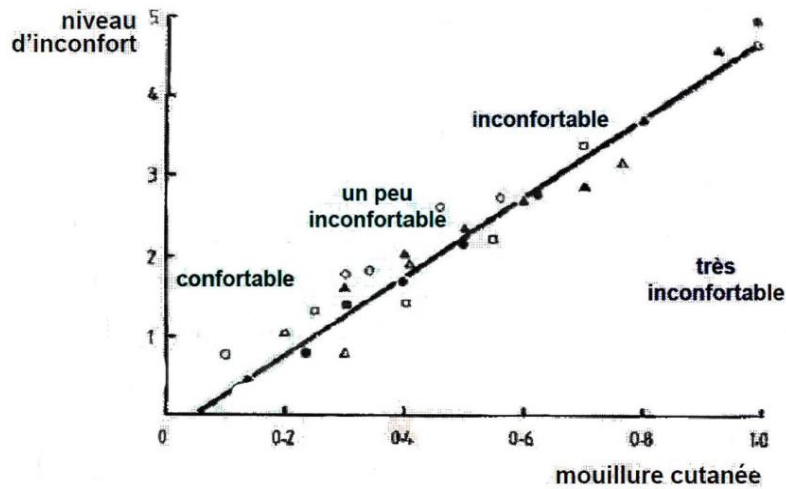


Figure I-4: Perception de confort en fonction de la mouillure cutanée (Parsons 2003)

Théoriquement, la mouillure peut atteindre une valeur de 1. Cependant, les différentes études montrent que celle-ci ne peut pas dépasser 0,8 (Berglund and Gonzalez 1977). La Figure I-5 montre la variation du taux de sudation selon les zones du corps. Il est clair que le dos, les épaules, le bas du dos, la tête et les aisselles sont les zones qui produisent le taux de sueur le plus élevé pouvant atteindre les  $1000 \text{ g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$  et plus.

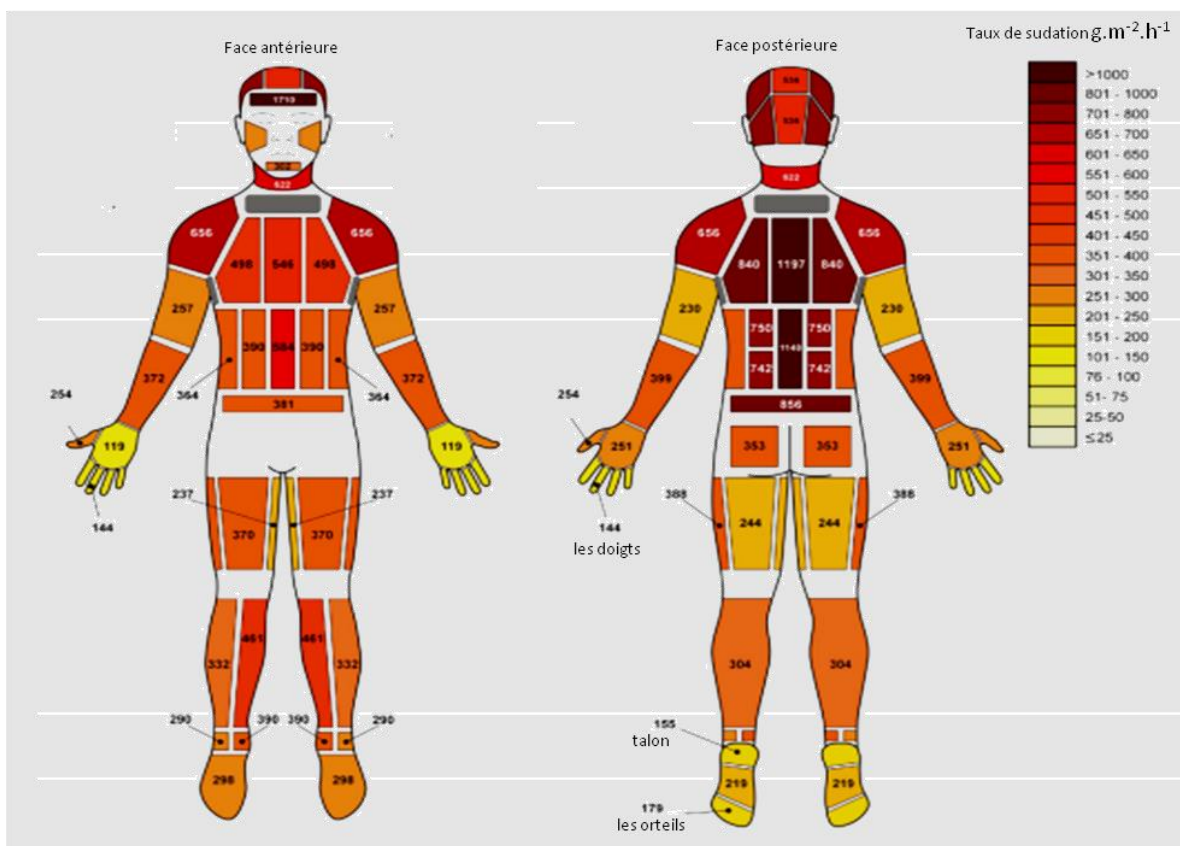


Figure I-5: Variation du taux de sudation dans les différentes zones du corps humain (Smith and Havenith 2011)

La Figure I- 6 illustre la distribution des zones du corps produisant respectivement de la chaleur et de la sueur. Plus la zone est foncée, plus la production de chaleur et de sueur est importante. Cette illustration est utilisée par la compagnie Clima Adidas afin de les aider dans la conception et le design des vêtements de sports (Smith and Havenith 2011). En effet, pour chaque zone, on peut attribuer un tissu spécifique tout en jouant sur les propriétés géométriques (porosité, taille des pores, etc.) et hydriques de celui-ci.

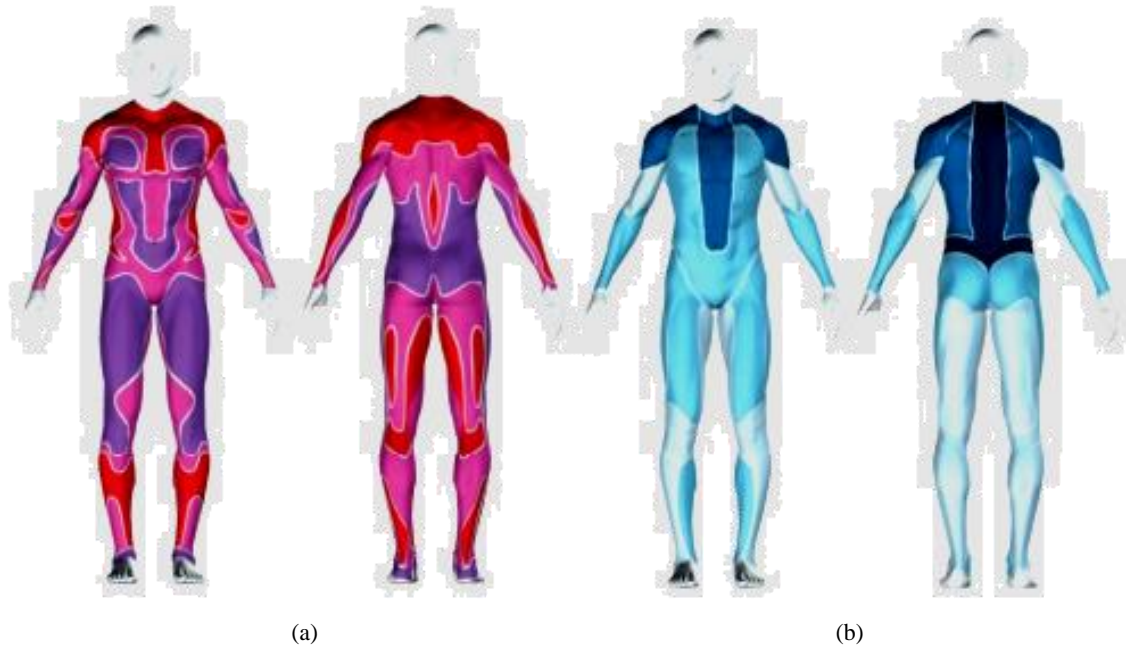


Figure I-6: (a) Les zones au corps produisant de la chaleur, (b) les zones du corps produisant de la sueur (Smith and Havenith 2011)

L'humidité relative de l'air affecte directement non seulement l'évaporation de la vapeur d'eau à la surface de la peau, mais également celle provenant de la respiration. Elle a ainsi une influence sur les pertes de chaleur du corps et implicitement sur la sensation thermique. Par conséquent, la sensation d'inconfort au mouillé lors de l'enclenchement de la transpiration est souvent liée à l'inconfort au chaud. L'intervention du vêtement va modifier le mode d'échange avec l'environnement, en agissant comme une barrière. Après un effort intense, le porteur peut ressentir une sensation de froid humide, due au stockage de la sueur par le textile.

#### **IV. Les paramètres affectant le confort**

La notion de confort est interdisciplinaire et englobe l'ensemble des interactions des facteurs présentés dans la Figure I-7 selon (Salaun 2004). Le confort est géré par l'interaction de trois éléments :

- 1) le corps,
- 2) le climat (l'environnement),
- 3) les vêtements.

L'interaction homme-vêtement-environnement est complexe et est liée à la présence du microclimat qui forme la couche d'air confiné sous vestimentaire. Les variables humaines tels que (l'aspect psychologique de la personne, la réponse physiologique du corps aux conditions

extérieures, etc.), les paramètres environnementaux comme (l'humidité relative de l'air, la température ambiante, etc.) et les caractéristiques du vêtement (les paramètres structuraux de l'étoffe textile, les propriétés physico-chimiques ainsi que le design et le style du vêtement) forment une combinaison riche agissant sur les caractéristiques du microclimat et par la suite des variations dans la sensation de confort du porteur.

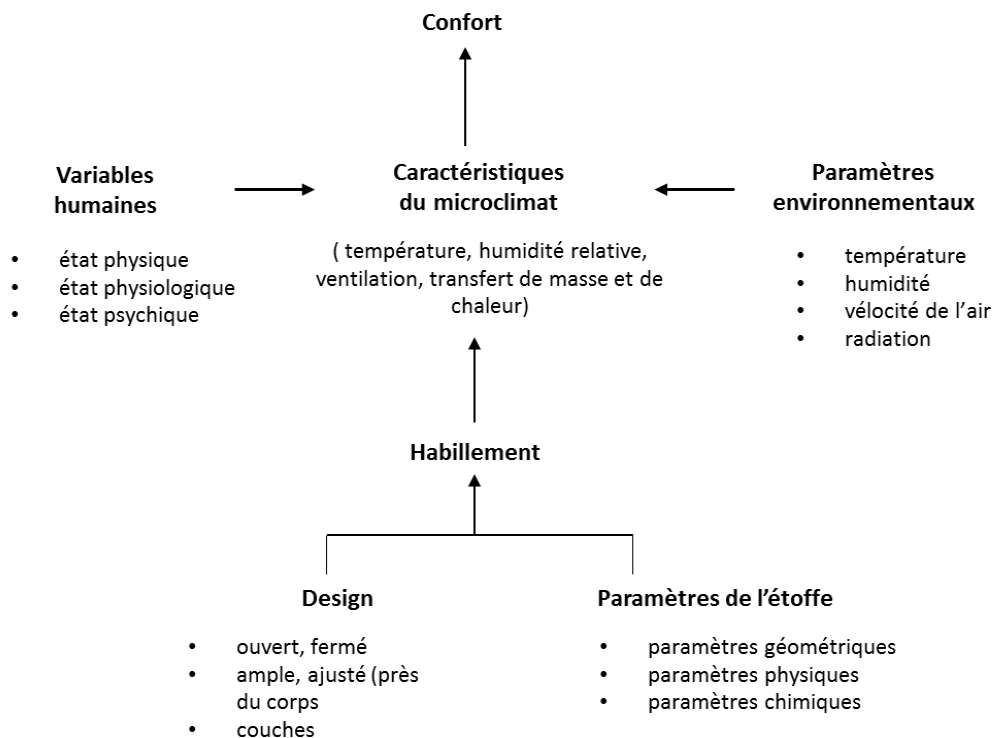


Figure I-7: Les différents paramètres affectant la sensation de confort selon (Salaun 2004)

Le corps humain, son microclimat et les vêtements forment un système mutuellement interactif. Le corps et son microclimat sont invariables alors que les vêtements forment le seul système variable (Ishtiaque 2001).

#### IV.1. Les paramètres liés à l'individu

L'individu est la base du système thermique. Il peut être défini en lui associant trois états différents : l'activité physique, l'état physiologique et l'état psychique ou psychologique.

##### ▪ L'activité physique

L'homme est considéré comme une machine thermique. L'activité physique est un paramètre essentiel pour la sensation du confort de l'individu. Elle définit directement le métabolisme de l'individu, c'est à dire la quantité de chaleur produite par le corps humain. Dans le cas d'une activité intense, elle peut être responsable de sensations de chaud et d'inconfort, même en présence de conditions environnementales très favorables. Le corps humain en tant que système ouvert, est en interaction permanente avec son environnement via des échanges cutanés et respiratoires. La production de chaleur métabolique dans le corps peut être mise à profit d'une augmentation de la température interne, ou bien être dissipée à l'extérieur.



Le métabolisme total (M) peut être mesuré expérimentalement à partir du volume d'oxygène consommé. Dans la pratique, il est estimé à partir des tableaux qui donnent le métabolisme en fonction de la description de l'activité (Tableau I-2). La puissance métabolique est donnée par rapport à la surface corporelle. Elle est exprimée souvent en Met. Cette unité (Met) est égale à 58,15 W/m<sup>2</sup> et correspond au métabolisme d'un individu assis et au repos.

Tableau I-2 : Dépenses énergétiques des différentes activités (ASHRAE -American Society of Heating 2005)

Activités	Dépenses énergétiques [Met]	Puissances métaboliques [W/m <sup>2</sup> ]
Sommeil	0.7	41
Couché et au repos	0.8	45
Assis et au repos	1	58
Assis, travail mental	1.1	
Debout, au repos	1.2	70
Debout, activité légère (achat, laboratoire, industrie légère)	1.6	95
Debout, activité moyenne (vente, travail ménager, travail sur machine)	2	116
Debout, activité soutenue (travail garage)	3	174
Activité intense	> 4	> 233

- État physiologique

L'homme est un homéotherme. C'est-à-dire, il dispose d'un système d'auto régulation de sa propre température via les échanges de chaleur et de masse. En dessous d'une température de 36,5°C et au-dessus de 37,5°C, le corps est en situation d'inconfort généralisé.

Les phénomènes permettant de contrôler et maintenir cette température interne à environ 37°C sont réunis sous l'appellation de thermorégulation. Lorsqu'un individu est en condition de confort les processus de thermorégulation sont minimes voir inactifs.

- État psychique ou psychologique

Au-delà de l'état physique et physiologique du confort, un certain nombre de phénomènes et de paramètres non thermiques apparaissent dans l'évaluation du confort de l'individu : c'est l'état psychologique. Il concerne la sensation et le comportement éprouvés par l'individu dans un environnement. Il est basé sur les expériences et les jugements sensoriels et non pas uniquement sur la physique et la physiologie (Parsons 2003).

La sensation que chacun peut éprouver du confort dépend de nombreux paramètres intrinsèques et personnels à l'individu tels que l'âge, le sexe, le poids, l'état de santé, les propres goûts auxquels s'ajoutent les facteurs socioculturels.

#### IV.2. Les paramètres liés au vêtement

Le port d'un vêtement peut modifier la sensation de confort. Il influe sur les échanges de chaleur en modifiant les coefficients de convection, de rayonnement et d'évaporation. Le vêtement intervient en agissant comme une barrière. En effet, après une activité intense, le porteur de ce



vêtement peut ressentir une sensation de froid humide, due au stockage de la sueur dans les vêtements. Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimentaire, à travers leurs résistances thermiques ceci en modifiant les échanges de chaleur et de masse entre la peau et l'environnement. En effet, le microclimat joue un rôle très important dans l'isolation thermique et la résistance aux transferts hydriques du vêtement. Le microclimat a sa propre température et son humidité relative. Son rôle essentiel est de maintenir le corps dans des conditions thermiques acceptables, été comme hiver.

Le comportement des vêtements d'une personne en activité est complexe et aussi dynamique. Les transferts de chaleur à travers les tissus se font par conduction et les transferts de masse par diffusion pour la phase vapeur et migration pour la phase liquide. A la surface extérieure, les échanges se font avec l'environnement par convection, rayonnement et évaporation. De nombreux facteurs peuvent influencer les échanges de chaleur et de masse à travers les vêtements. A part leurs résistances thermiques et leurs résistances à l'évaporation, il peut y avoir un effet tampon par adsorption de l'eau, un effet de pompage de l'air dû au mouvement du corps ou la pénétration de l'air à travers les tissus ou les orifices.

La nature du tissu, la coupe des vêtements, l'activité et la posture du sujet influencent aussi les différents modes de transferts (Thellier 1989).

La Figure I- 8 illustre le mécanisme de transfert de chaleur et d'humidité à travers une étoffe textile.

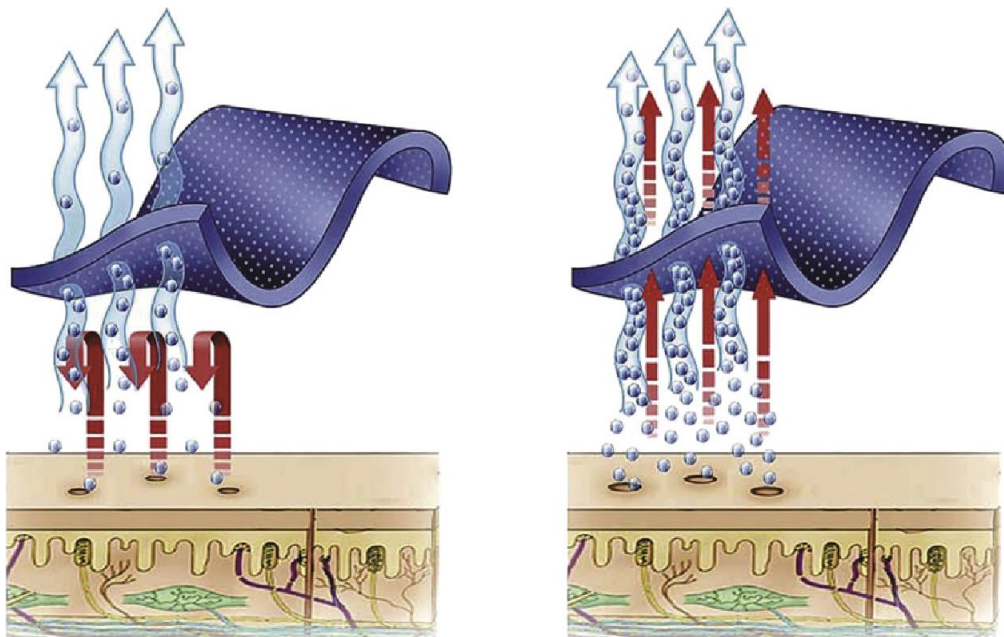


Figure I-8: Schéma illustrant le mécanisme de transfert de chaleur et d'humidité à travers une étoffe textile (Liu 2014)

Comme évoqué précédemment, les vêtements sont susceptibles de modifier les échanges thermiques puisqu'ils engendrent une résistance aux échanges de chaleur et de vapeur d'eau qui s'effectuent entre la peau et l'environnement. Les flux convectifs, radiatifs et d'évaporation cutanée sont réduits. Les facteurs de réduction de ces flux dépendent du comportement thermique des vêtements qui est lui-même fonction de la résistance thermique et de la capacité

évaporatoire du vêtement mais également des mouvements du corps, de la pénétration de l'air dans les tissus ou de l'adsorption d'eau, etc (Parsons 2002).

- Type de fibre

Le type de fibre est l'un des paramètres les plus importants affectant le confort. Les fibres sont principalement classées en deux groupes : les fibres naturelles et les fibres chimiques (artificielles et synthétiques). Le Tableau I-3 présente les avantages et les inconvénients des différentes fibres textiles utilisées dans le domaine de l'habillement.

Tableau I-3 : Les avantages et les inconvénients des différents types de fibres

	Fibres naturelles	Fibres chimiques	
		Fibres artificielles	Fibres synthétiques
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bonnes propriétés d'absorption et de capillarité</li> <li>- teneur en eau élevée</li> <li>- résistance thermique élevée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bonne capacité d'absorption</li> <li>- douce et souple</li> <li>- propriétés de confort adéquates</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- stabilité dimensionnelle</li> <li>- bonne progression capillaire</li> <li>- facilité d'entretien</li> <li>- sensation de douceur</li> <li>- séchage rapide</li> </ul>
<b>Inconvénients</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- séchage lent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- séchage un peu lent</li> <li>- entretien difficile (très fragiles surtout au mouillé)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- faible absorption d'humidité</li> </ul>

Selon la croyance générale, les fibres naturelles offrent une meilleure sensation de confort. Cependant, le coton a tendance à absorber et à retenir l'humidité. A l'état humide, lorsque le vêtement composé de coton est porté, le porteur va ressentir une sensation d'inconfort. C'est pour cette raison que le coton n'est pas conseillé dans les activités intenses et de haute performance. En contrepartie, les fibres synthétiques sont capables d'assurer une bonne combinaison entre la gestion de l'humidité, la légèreté, la haute résistance, la durabilité, la stabilité dimensionnelle, la résistance thermique et le séchage rapide. De nos jours, il est possible de produire des fibres synthétiques avec des sections transversales modifiées. Ces fibres regroupent les avantages non seulement des fibres naturelles mais aussi des fibres synthétiques.

Les mélanges de fibres, par exemple, le mélange de coton et de polyester offre de meilleures propriétés de confort surtout pour les vêtements de sport et de fortes activités.

- Coupe et design

Une conception bien appropriée des vêtements joue un rôle très important dans les échanges de chaleur du corps humain vers l'extérieur.

Les changements dans la conception des vêtements peuvent être effectués par :

- Création d'ouvertures, pour permettre la convection naturelle dans certaines parties du vêtement, par exemple le cou, les poignets, la cheville et la taille.

- Conception des vêtements amples pour avoir une libre convection d'air et un libre échange avec l'air extérieur. C'est-à-dire en assurant une ventilation efficace dans les vêtements. Ainsi

lors d'une forte activité, générant une production métabolique élevée, les transferts d'humidité et de chaleur sont renforcés par des circulations d'air à travers les ouvertures et les pores du vêtement amenés par les mouvements du corps.

- Variation de l'épaisseur de la couche d'air entre le vêtement et la peau selon la zone du corps. Par exemple, au niveau des jambes et du dos, la couche d'air est importante par contre au niveau des épaules, cette couche est très fine (Morel 2014).



Figure I-9: Design d'un T-shirt (a) T-shirt femme, (b) T-shirt homme (Okur 2014)

La Figure I-9 présente deux designs de T-shirt. Le premier est destiné pour les femmes et le deuxième pour les hommes. Nous remarquons que ces T-shirt présentent des découpes. En effet, (Okur et al, 2014) ont étudié les propriétés du confort thermo-physiologique de certains tricotés et ils ont conçu différents designs de T-shirt. Ils ont introduit différents types de fibres et différents liages selon la zone. Pour les zones sensées produisant plus de sueur comme le dos, les aisselles, on peut concevoir des structures assurant la circulation d'air entre la peau et le milieu extérieur.

### IV.3. Les paramètres liés à l'environnement

L'environnement est caractérisé par quatre grandeurs physiques principales : la température de l'air, l'humidité et la vitesse de l'air et la température de rayonnement (Parsons, 2003). Ces variables réagissent avec l'activité physique et les vêtements de l'individu pour établir son état de confort. Outre l'interface textile, les facteurs du milieu extérieur tels que la température ou le niveau de rayonnement, l'humidité relative de l'air et la vitesse du vent.

- La température de l'air

La température de l'air ou température ambiante, est un paramètre essentiel du confort. Elle intervient dans l'évaluation du bilan thermique de l'individu au niveau des échanges convectifs, conductifs et respiratoires. Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe.

- L'humidité relative de l'air

L'humidité de l'air intervient dans les échanges de chaleur par évaporation dans les voies respiratoires et à la surface de la peau. L'humidité relative de l'air influence les échanges évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de

refroidissement de la sueur. L'humidité relative a un effet sur la sensation de confort (Song, 2011) En effet, pour une personne au repos, le confort est maintenu pour une large plage d'humidité. En hiver, le confort est maintenu pour une humidité relative allant de 20 à 50% et en été, la plage de tolérance de l'humidité relative s'étend jusqu'à 60% (Song, 2011). Une humidité trop forte perturbe la thermorégulation du corps car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration. Le corps est la plupart du temps en situation d'inconfort. L'humidité relative de l'air n'affecte pas uniquement l'évaporation de l'humidité à la surface de la peau, mais également celle provenant de la respiration.

L'humidité relative (HR) est présentée comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau ( $P_{vap}$ ) et la pression saturante de la vapeur d'eau ( $P_{sat}$ ) :

$$HR = \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \times 100 \quad \text{I-11}$$

En effet, la pression partielle de la vapeur d'eau dépend de la température de l'air : une augmentation de la température de l'air engendre une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Ainsi, la pression saturante de vapeur d'eau est calculée selon l'équation d'Antoine :

$$P_{sat} = \exp\left(18,956 - \frac{4030,18}{T_a + 235}\right) \quad \text{I-12}$$

Avec

- $T_a$  : la température de l'air exprimée en [K].

La Figure I- 10 présente les différentes zones de sensation de confort en fonction de l'humidité et la température de l'air.

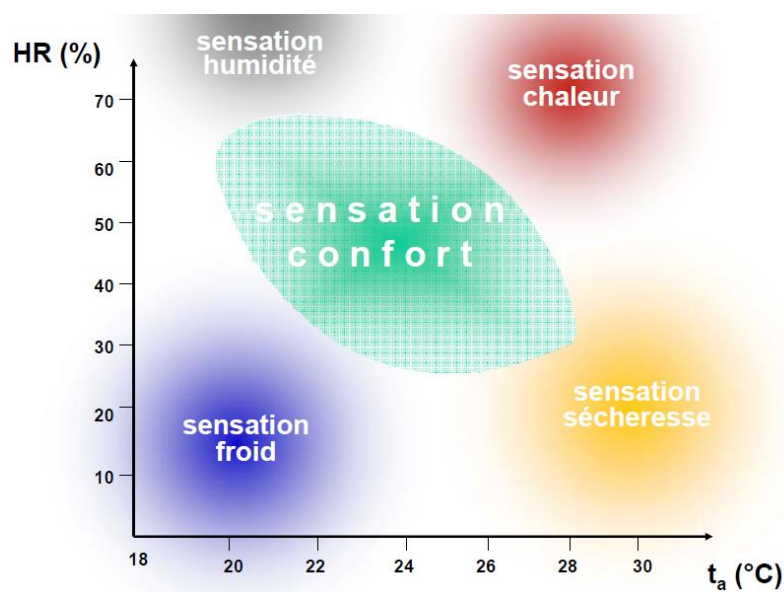


Figure I-10: Zone de confort pour une température et humidité d'air données

D'après la Figure I-10, nous constatons que pour se sentir en état de confort la température de l'air doit être entre 22 et 28 °C et l'humidité de l'air entre 35 et 65%.

- La vitesse de l'air

Les échanges par convection et par évaporation sont fortement influencés par la vitesse relative de l'air ( $V_{air}$ ) à la surface du corps. La vitesse relative de l'air est une composante de la vitesse absolue de l'air ( $V_a$ ) et de la vitesse des mouvements corporels de l'individu. Ainsi, dans un air immobile, des déplacements ou bien la seule gestuelle de l'individu crée une vitesse relative de l'air.

La vitesse relative de l'air ( $V_{air}$ ) est calculée à partir de l'équation suivante :

$$V_{air} = V_a + V_m \quad \text{I-13}$$

(Telle que  $V_m < 0,7$  m/s)

La composante ( $V_m$ ) prend en compte l'activité métabolique :

$$V_m = 0,0052 \times (M - 58) \quad \text{I-14}$$

Avec:

- M: le métabolisme [ $W/m^2$ ].

Le mouvement de l'air affecte de manière significative le transfert de chaleur corporelle par convection et évaporation. Les mouvements d'air résultent de la convection libre (naturelle) et forcée ainsi que des mouvements corporels des occupants. Plus le mouvement est rapide, plus le débit de chaleur est élevé, à la fois par convection et par évaporation. Lorsque les températures ambiantes se situent dans des limites acceptables, il n'y a pas de mouvement d'air minimal à fournir pour le confort thermique. La convection naturelle de l'air sur la surface du corps permet la dissipation continue de la chaleur corporelle. Toutefois, lorsque la température ambiante augmente, la vitesse de circulation naturelle de l'air ne suffit plus et doit être augmentée artificiellement, par exemple en utilisant des ventilateurs.

**Remarque :** La vitesse de l'air utilisée selon la norme ISO 11092 est de 1m/s. Elle représente la vitesse de marche normale de l'individu.

- La radiation

La radiation ou la température radiante est la transmission de la chaleur (par longueurs d'onde infrarouges) à travers le milieu ambiant entre deux surfaces. Elle a un effet direct sur la perception de la chaleur. En plus de la température de l'air et des rayons solaires directs, le corps humain reçoit la température radiante émise par les surfaces (mur, sol). La température radiante dépend de la température extérieure de l'air, du rayonnement solaire reçu par les surfaces extérieures et de leurs caractéristiques thermiques (l'absorption et la conductivité thermique des matériaux).

## **V. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le concept de confort en tant que critère généré par l'interface peau/textile. Nous avons commencé ce chapitre par la définition du confort. Nous nous sommes ensuite intéressés au confort thermo-physiologique qui traite les échanges thermiques et hydriques entre corps humain et son environnement. Puis, nous avons déterminé les notions physiologiques en relation avec les échanges thermiques par conduction, convection, rayonnement et évaporation. Nous avons aussi présenté les interactions homme-textile-environnements en étudiant les différents paramètres de chaque facteur. Finalement, nous avons présenté les paramètres affectant le confort.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la contribution des vêtements dans les différents modes de transferts hydriques et les méthodes de caractérisation des échanges de masse des étoffes textiles.

## Chapitre II

---

---

# **Contribution vestimentaire dans la définition du confort hydrique**

---

---

## **Chapitre II: Contribution vestimentaire dans la définition du confort hydrique**

### **I. Introduction**

La transmission de l'humidité à travers les étoffes textiles a une grande influence sur le confort thermo-physiologique de l'être humain. Pour maintenir sa température constante, le corps humain transpire à la fois sous forme de vapeur d'eau et de liquide (Fanger 1973). Scheurell et al. ont confirmé que la perception de confort est influencée par le taux d'humidité du microclimat (l'espace entre la peau et le vêtement) (D.M. Scheurell 1985). En effet, la perception de l'humidité dépend de nombreux facteurs. Certaines études se sont intéressées au rôle des transferts d'humidité à travers le vêtement dans le confort perçu, où il apparaît que certaines propriétés telles que les transferts de vapeur d'eau et le transport d'eau liquide jouent un rôle essentiel dans la perception du confort du porteur (Bakkevig M.K. 1994) (Guo 2008).

La présence d'humidité dans un vêtement induit les transferts de masse. Il existe différents mécanismes de transports selon l'état de l'eau (liquide, vapeur) et selon le type de l'étoffe textile (structure / composition).

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons détailler les différents mécanismes de transferts hydriques (vapeur d'eau et l'eau liquide). Tandis que dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons décrire les différentes méthodes de caractérisation des propriétés hydriques des étoffes textiles.

### **II. Les mécanismes de transfert hydrique à travers les étoffes textiles**

Les mécanismes de transferts de masse à travers les textiles dans les conditions d'humidité transitoire sont des facteurs importants qui influencent le confort thermo-physiologique du porteur en cas d'activité. Le transfert de masse se présente sous forme de vapeur d'eau et liquide.

Les mécanismes de transmission de la vapeur d'eau sont :

- La diffusion
- L'absorption et la désorption
- La convection forcée
- L'évaporation et la condensation

Alors que, les mécanismes de transmission de l'eau sous sa forme liquide sont :

- Le mouillage
- La progression capillaire



## II.1. Transfert de la vapeur d'eau

### II.1.1. La diffusion

La vapeur d'eau est transportée à travers un matériau textile par diffusion. Ce transfert de masse se produit lorsqu'il y a un gradient de pression à la vapeur d'eau. Le mécanisme de diffusion à travers un matériau poreux (étoffe textile) est gouverné par la loi de FICK avec ses deux principes. En effet, la première loi caractérise essentiellement le changement de diffusion des régions de fortes concentrations vers les régions de faibles concentrations. Elle est présentée par l'équation (II.1) (Ostwald 1891).

$$J = D \frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{II-1}$$

La deuxième loi décrit le taux d'accumulation de la concentration dans le volume de la matière (Ostwald 1891). Elle est décrite par l'équation (II.2) où le taux de changement de concentration est proportionnel au gradient de concentration en ce point de la membrane (Ostwald 1891):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{II-2}$$

Avec:

- J: le flux de diffusion [mol/m<sup>2</sup>s],
- D: le coefficient de diffusion ou la diffusivité [m<sup>2</sup>/s],
- c: la concentration en eau [mol/m<sup>3</sup>].

La vapeur d'eau peut être diffusée à travers une structure textile de deux façons : la diffusion simple à travers les espaces vides entre les fibres et les fils et tout au long de la fibre elle-même (Fohr 2002). Dans le cas où la diffusion est tout au long de la fibre, la vapeur d'eau se diffuse de la surface intérieure de l'étoffe textile jusqu'à la surface des fibres pour atteindre, ensuite, l'intérieur des fibres et la surface extérieure de l'étoffe textile (Das 2007).

Le taux de diffusion tout au long de l'étoffe textile dépend de sa porosité et de la diffusivité à la vapeur d'eau de la fibre.

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air est de 0,239 cm<sup>2</sup>/s. Alors que pour une étoffe en coton, il est de l'ordre de 10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>/s (Das 2007).

Dans le cas où le textile est composé de fibres hydrophiles, la diffusion de la vapeur d'eau n'obéit pas à la loi de FICK. Elle est régie par une loi non-FICKIENNE, diffusion anormale (Das 2012).

Ce procédé de diffusion peut être expliqué par le gonflement des fibres. En effet, la vapeur d'eau est absorbée par les fibres, grâce à l'affinité des molécules d'eau aux fibres hydrophiles. Une fois les fibres sont gonflées, il y aura une réduction de la taille des espaces vides, ce qui retarde le procédé de diffusion. Li et al ont expliqué ce phénomène en tenant compte du fait que la chaleur de sorption produite augmente la température des fibres qui à son tour influe sur le taux de transmission d'humidité.

La diffusivité de l'humidité d'un matériau textile est influencée par un certain nombre de facteurs :

- Volume des fibres : La diffusion diminue avec une augmentation du volume des fibres car la fraction de la structure du matériau constituée d'air diminue (Das 2007).
- Epaisseur et porosité : La diffusion d'humidité diminue avec la diminution de l'épaisseur et de la porosité (Li 2002).
- Perméabilité à l'air : La diffusion est fortement liée à la perméabilité à l'air (Wang 1991). La perméabilité à l'air augmente à mesure que la porosité du textile augmente, ce qui traduit une diffusivité d'humidité plus élevée à travers les espaces vides du matériau textile.

### ***II.1.2. L'absorption et la désorption***

Ce mécanisme est très important pour maintenir une concentration de vapeur d'eau constante du microclimat durant les conditions transitoires, vu son influence sur les transferts secs et humides. L'hygroscopicité est la capacité des fibres à absorber de l'humidité. Plus la fibre peut absorber d'humidité plus elle est hygroscopique (Hatch 1993). Une étoffe textile hygroscopique absorbe la vapeur d'eau de l'air humide du microclimat (l'air confiné) et la libère dans l'atmosphère. Cela favorise le transfert de la vapeur d'eau de la peau vers l'environnement contrairement à une étoffe textile qui n'absorbe pas et ne réduit pas l'humidité cumulée dans le microclimat (Hong 1988), (Kim 1999), (Suprun 2003).

Le processus de sorption concerne la fixation ou la libération des molécules d'eau liées à la surface du matériau. La notion de surface englobe non seulement la surface externe, mais aussi toutes les surfaces des pores qui le constituent (Bhourri 2006). Les effets notés sont :

- Le couplage entre les transferts de masse et de chaleur, lié à la chaleur de sorption et en fonction du taux de reprise des divers tissus.
- L'effet de pompage, l'air entrant à température et humidité de l'extérieur. Un problème se pose pour la détermination des débits sous-vestimentaires locaux, qui dépendent des mouvements et de la porosité du tissu ainsi que de l'activité ou de la vitesse d'air en surface.

#### **● Les isothermes de sorption et désorption**

La courbe représentant, pour une température (T) donnée, la teneur en eau d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau ( $a_w$ ) ou de l'humidité relative (HR) de l'air en équilibre est appelée :

- Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en humidité.

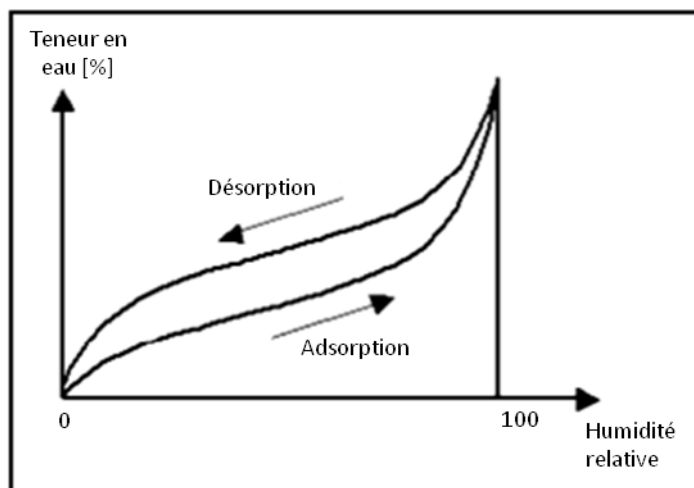


Figure II-1: L'isotherme d'adsorption et l'isotherme de désorption (Bhourri 2006)

Pour chaque valeur d'humidité, l'isotherme de sorption à une température donnée indique la teneur en eau à l'équilibre du produit. Toute modification de la qualité ou de la composition du matériau entraîne une modification de ses isothermes de sorption. En plus de la complexité des phénomènes, les isothermes de sorption ne peuvent pas être calculées facilement à l'avance, mais elles doivent être établies expérimentalement pour chaque produit.

- **L'hystérésis de sorption**

Pour un même matériau poreux et pour une teneur en eau constante, on constate que la pression de vapeur d'équilibre de désorption est inférieure à la pression de vapeur d'équilibre d'adsorption. Ceci implique qu'il existe des modifications irréversibles dans la structure du produit qui accompagnent ces phénomènes et engendrent une hystérésis de sorption dépendante de l'histoire hydrique du matériau.

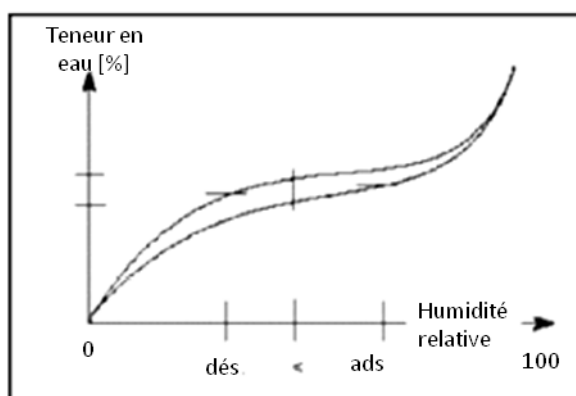


Figure II-2 : L'hystérésis de sorption (Bhourri 2006)

La présence des phénomènes d'hystérésis est normalement liée à l'existence des cavités microscopiques au sein du solide. Cette hystérésis dépend de l'arrangement stéréochimique du matériau et de son histoire hydrique, sa valeur est autant importante que le pourcentage de cristallinité est faible.

● **Gonflement des fibres**

Pendant le gonflement, l'eau absorbée par les macromolécules et les micro molécules des fibres réduit la taille des pores entre les fibres et les fils et par la suite réduit la transmission de la vapeur d'eau à travers l'étoffe textile. Au fur et à mesure que le phénomène de gonflement persiste, les capillaires entre les fibres sont bloqués. Ce qui entraîne une diminution de progression capillaire et par la suite influe sur le processus de sorption de l'humidité.

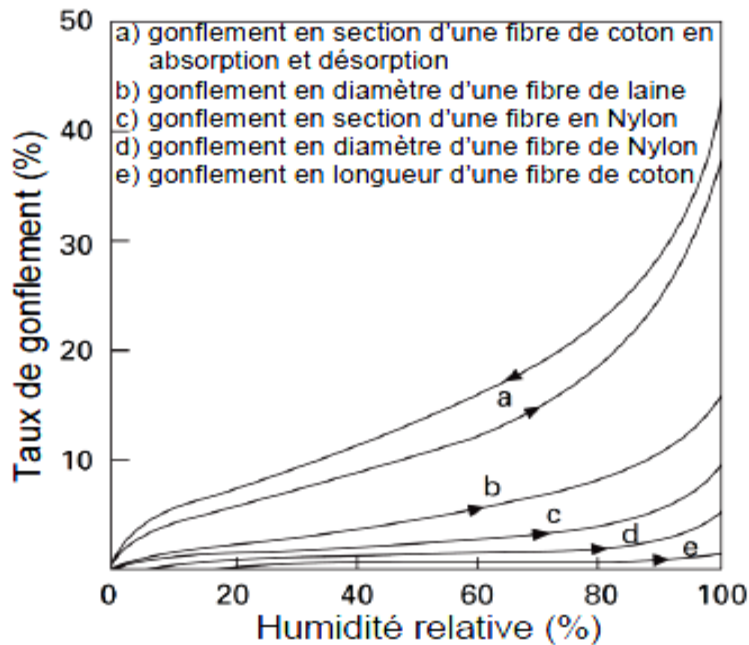


Figure II-3: Taux de gonflement des différentes fibres en fonction de l'humidité relative (Benltoufa 2013)

**II.1.3. La convection forcée**

Ce mécanisme de transfert d'humidité se produit lorsque l'air circule sur une couche humide. C'est ce qu'on appelle la convection forcée (Das 2007).

Dans ce processus, le transfert de masse se traduit par la différence de concentration d'humidité entre l'atmosphère et la source d'humidité (peau). Ce processus est régi par l'équation (II.3):

$$Q_m = A h_m (c_a - c_\infty) \tag{II-3}$$

Avec :

- $Q_m$  : le flux de masse par convection à travers la surface (A) de l'étoffe textile selon la direction du flux,
- $c_a$  : la concentration de la vapeur d'eau à la surface de l'étoffe,
- $c_\infty$  : la concentration de la vapeur dans l'air.

Le flux ( $Q_m$ ) est gouverné par la différence de concentration et le coefficient de transfert de masse, et ceci dépend des propriétés du fluide aussi bien que sa viscosité.

En présence du vent, la méthode convective joue un rôle très important dans la transmission d'humidité de la peau vers l'atmosphère (Gibson 1995).

#### **II.1.4. L'évaporation et la condensation**

L'évaporation et la condensation ont une influence sur la transmission d'humidité. Ils correspondent aux changements de phase du fluide en relation avec la pression de vapeur saturante. Lorsque la pression de la vapeur d'eau est inférieure à la pression de vapeur saturante, l'eau s'évapore. A l'inverse, si la pression de la vapeur d'eau est la plus élevée, on parle de la condensation de l'eau. La condensation et l'évaporation sont respectivement des changements de phase exothermiques et endothermiques.

L'évaporation et la condensation dépendent de la température et de la teneur d'humidité dans le matériau textile au moment du transfert d'humidité (Li 2003).

### **II.2. Transfert de l'eau liquide**

Deux processus sont impliqués dans le transfert de l'eau liquide à travers une structure poreuse: le mouillage et la progression capillaire. Kissa a effectué une distinction claire entre le phénomène de mouillage et la progression capillaire (Kissa 1996). Le mouillage est une condition préalable au phénomène de capillarité ; la progression capillaire n'aura pas lieu si le liquide ne mouille pas les fibres du matériau (Kissa 1996). Par conséquent, ces deux phénomènes sont bien liés et l'un d'entre eux ne peut se produire sans l'autre.

La Figure II-4 présente le processus de transfert de l'eau liquide à travers un matériau poreux (textile) : le mouillage et la progression capillaire.

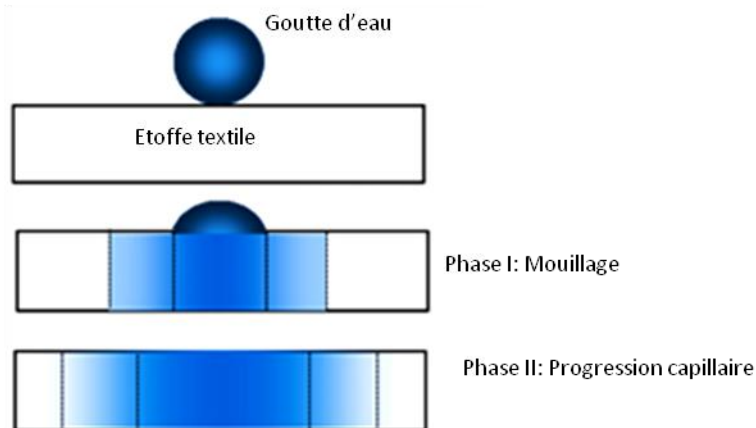


Figure II-4: Représentation schématique de la mouillabilité et de la progression capillaire à travers une étoffe textile (Azeem 2017)

#### **II.2.1. Le mouillage et la notion d'angle de contact**

La vapeur d'eau, en se condensant, se transforme en eau et dégage de la chaleur (chaleur latente d'évaporation en conséquence, il y'aura une perte d'énergie). La transpiration provoque ainsi une humidification de la peau qui s'accompagne d'un mouillage. Dans un premier temps, on a un mouillage de la peau et par la suite mouillage du vêtement qui la recouvre.

Lorsque les fibres sont en contact avec l'eau, les molécules d'eau doivent mouiller la surface des fibres avant d'être transportées vers l'intérieur à travers les pores inter-fibres dans les zones

amorphes. L'interface de l'air-solide dans la fibre est progressivement remplacée par une interface solide-liquide. C'est le phénomène de « mouillage ».

Pour mesurer la mouillabilité, on mesure l'angle de contact. Ce paramètre physique se traduit ainsi : lorsque l'on dépose une goutte de liquide sur une surface solide parfaitement lisse et horizontale, cette goutte prend une forme particulière (calotte sphérique le plus souvent) définie par un angle de contact ( $\theta$ ) à l'équilibre. Cet angle caractérise les interactions entre le liquide et le solide.

La Figure II- 5 illustre une goutte en équilibre sur une surface plane.

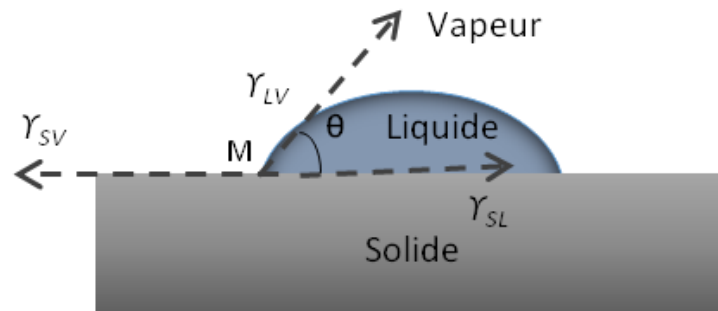


Figure II-5 : Goutte de liquide en équilibre sur une surface

L'équilibre du point M sur la ligne triple solide-liquide-vapeur s'exprime par la relation de Young :

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad \text{II-4}$$

Avec:

- $\gamma_{SL}$  : l'énergie de surface du solide dans la vapeur du liquide [ $\text{N.m}^{-1}$ ],
- $\gamma_{SL}$  : l'énergie interfaciale solide-liquide [ $\text{N.m}^{-1}$ ],
- $\gamma_{LV}$  : l'énergie du liquide dans sa vapeur [ $\text{N.m}^{-1}$ ].

Sur une surface hydrophobe, l'eau garde plutôt sa forme de gouttelette, et par conséquent la surface de contact avec le substrat devient minimale et l'angle de contact devient maximal.

La mouillabilité est influencée par les propriétés du liquide et du solide. Avec l'augmentation de la densité et de la viscosité du liquide, l'énergie de surface de la matière augmente ce qui diminue la mouillabilité du solide étudié. Si le caractère hydrophile du solide se présente, l'angle de contact est réduit, par conséquent la mouillabilité de la surface augmente (Das et al. 2007).

### II.2.2. La progression capillaire

Lorsque le liquide mouille les fibres, il produit une pression capillaire. Le liquide est forcé par cette pression et il est déplacé le long du tube capillaire.

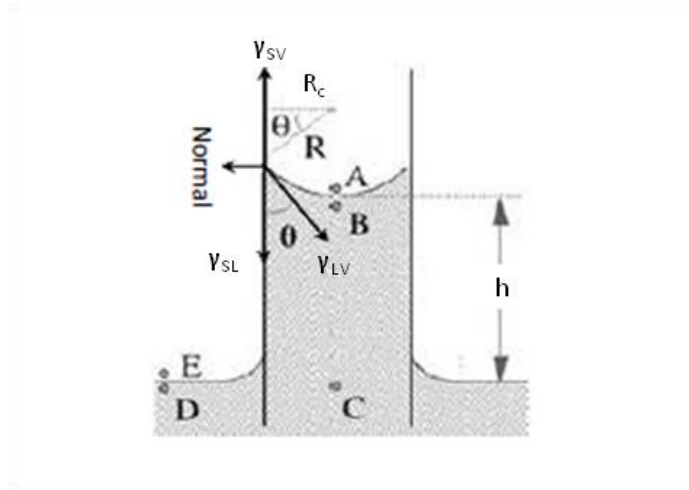


Figure II-6: Représentation schématique de la progression capillaire (Fanaei 2012)

La Figure II-6, est une représentation de la progression capillaire. Selon Young-Laplace , la pression capillaire est exprimée par l'équation suivante :

$$P_C = \frac{2\gamma \cos \theta}{R_C} \quad \text{II-5}$$

Avec:

- $P_C$  : la pression capillaire [ $\text{N.m}^{-2}.\text{Pa}$ ],
- $\gamma$  : l'énergie de surface du liquide [ $\text{n.m}^{-1}$ ],
- $R_C$  : le rayon capillaire [m].

La pression capillaire peut être définie comme la différence de pression hydrostatique à travers une interface solide/liquide qui résulte des forces de tension de surface. En d'autres termes, la montée capillaire ou la capillarité peut être définie comme l'écoulement d'un liquide sous l'effet des forces interfaciales à la surface de contact du liquide avec un solide. Les forces capillaires sont les forces responsables du mouvement d'un liquide à travers une étoffe textile. Les phénomènes capillaires reposent sur les forces intermoléculaires de cohésion et d'adhésion. Le mouvement capillaire se produit si les forces d'adhésion entre le liquide et la paroi du tube sont supérieures aux forces de cohésion entre les molécules du liquide.

L'écoulement capillaire est similaire à d'autres types d'écoulements hydrauliques causés par une différence de pression. Le mouvement spontané du front d'écoulement apparaît pour réduire le gradient de pression en diminuant la quantité d'énergie de surface au contact entre le solide et le liquide. L'écoulement cesse lorsque la différence de pression devient nulle. D'après l'équation (II-5), plus le rayon capillaire est petit, plus la hauteur capillaire est importante.

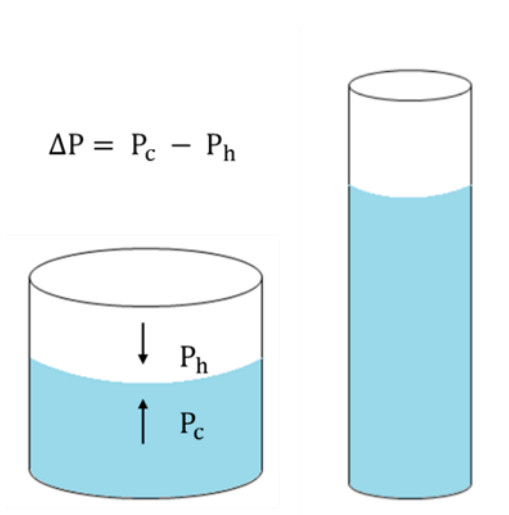


Figure II-7 : L'ascension capillaire dans des pores de tailles différentes

Lors de la transpiration, la progression capillaire est le processus le plus efficace pour maintenir une sensation de confort. Dans le cas où la structure de vêtements est de bonnes propriétés capillaires, l'humidité provenant de la peau est véhiculée vers l'extérieur et offre une sensation de peau sèche car l'étalement du liquide assure une efficace évaporation.

### II.3. Transfert combiné de la vapeur d'eau et de l'eau liquide

Dans des conditions transitoires humides, l'humidité est transportée à travers les textiles sous forme liquide et sous forme de vapeur. Il a été identifié que le transport de l'humidité dans des conditions transitoires humides se produit à trois stades différents (Li 2003).

- La première étape est dominée par deux processus rapides : la diffusion de la vapeur d'eau et la diffusion de l'eau liquide dans l'air remplissant les vides inter-fibres, qui peuvent atteindre une nouvelle condition stable en une fraction de seconde. Pendant cette période, la vapeur d'eau diffuse dans le tissu en raison du gradient de concentration sur les deux surfaces. Pendant ce temps, l'eau liquide commence à s'écouler des régions à plus forte teneur en liquide vers les régions plus sèches, entraînées par la tension de surface.

- Au cours de la deuxième étape, la sorption des fibres par l'humidité est beaucoup plus lente que lors de la première étape et prend quelques minutes à quelques heures, selon le processus de transfert de chaleur. Pendant cette période, la sorption de l'eau dans les fibres se produit lorsque la vapeur d'eau diffuse dans le tissu, ce qui augmente l'humidité relative à la surface des fibres. Après la diffusion de l'eau liquide dans le tissu, les surfaces des fibres sont saturées par le film d'eau qui les recouvre, ce qui améliore le processus de sorption.

- Le troisième stade est atteint en régime permanent, dans lequel toutes les formes de transport d'humidité et de transfert de chaleur deviennent stables et l'effet de couplage entre elles devient moins important. Dans cette condition, les distributions de température, la concentration de vapeur d'eau, la teneur en eau des fibres, le volume de la fraction liquide et le taux d'évaporation deviennent indépendants du temps. Avec l'évaporation de l'eau liquide, l'eau liquide est aspirée des capillaires vers la surface supérieure. La transmission combinée d'eau liquide et de vapeur d'eau le long du tissu est très importante en cas de transpiration. Le transport



de liquide (diffusion liquide ou capillaire) est très faible par rapport à la diffusion de vapeur à faible teneur en humidité, tandis qu'à la saturation, la capillarité est le principal mécanisme de transport de l'humidité (Goldstein 1980).

### III. Méthodes de caractérisation des propriétés hydriques

Les échanges hydriques sous forme vapeur d'eau ou liquide sont caractérisés par plusieurs méthodes. Certaines méthodes en mode statique et d'autres en mode dynamique.

#### III.1. Méthodes de caractérisation de la transmission à la vapeur d'eau

Il existe plus de 30 tests d'évaluation du taux de transmission de la vapeur d'eau, seuls quelques-uns prennent en considération la respirabilité, le confort et la façon dont le vêtement interagit en conditions de porter. Ces méthodes se diffèrent par le matériel utilisé, les conditions du test et les paramètres à mesurer. Les normes associées à la mesure des transferts de la vapeur d'eau qui semblent les plus intéressantes sont l'ASTM E69, ASTM F2298 et l'ISO 11092 (McCullough, 2003).

##### III.1.1. Les méthodes de la coupe droite et la méthode de la coupe inversée

Ces deux méthodes sont décrites respectivement par la norme ASTM E 69 B et BW. Comme présenté dans la Figure II-8, elles permettent de mesurer le taux de transmission de la vapeur d'eau à travers un matériau.

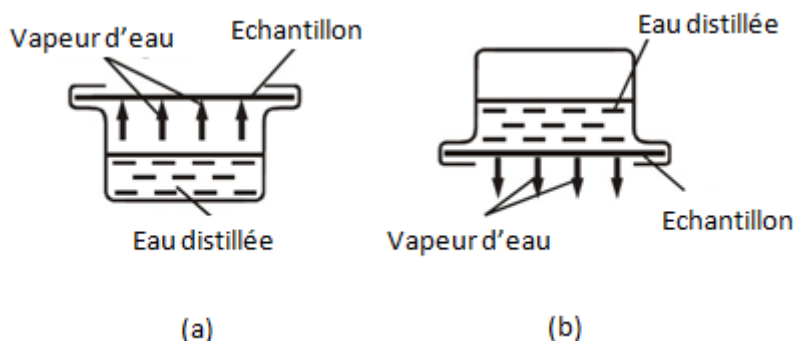


Figure II-8: (a) Méthode de la coupe droite et (b) Méthode de la coupe inversée

Le réservoir de la coupe droite est rempli de 100 mL d'eau distillée et couvert d'un échantillon circulaire de diamètre 74 mm. Par la suite, l'échantillon sera serré avec un joint de serrage. L'ensemble sera conditionné dans une cellule de test où la température est de  $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$  et l'humidité relative est  $50 \pm 2\%$ . La vitesse d'air dans cette cellule est de  $2,8 \pm 0,25$  m/s. Ainsi, la quantité de vapeur d'eau en grammes traversant le matériau textile pendant 24 heures est calculée selon l'équation (II-6):

$$WVT = \frac{G \times 24}{t \times A} \quad \text{II-6}$$

Avec :

- WVT: le taux de transmission de vapeur d'eau [ $\text{g h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ ],
- G: la différence de masse [g],

- $t$ : le temps pendant lequel  $G$  est obtenue [h],
- $A$  est la surface mesurée [ $m^2$ ].

Concernant la méthode de la coupe inversée, les mêmes conditions de température, d'humidité relative et de vitesse d'air ont été considérées et la coupe étant prise d'une façon inversée (Figure II-8 (b)), elle sera couverte d'une membrane de PTFE (ne laisse passer que la vapeur d'eau) pour ne pas mouiller l'échantillon. Ainsi, l'ensemble est placé dans une position inverse et il sera pesé périodiquement pendant une journée. Les calculs du taux de transmission de vapeur d'eau sont obtenus avec la même équation (II-6).

### III.1.2. La cellule dynamique de perméabilité à l'humidité (DMPC)

La Figure II-9 présente la cellule dynamique de perméabilité à l'humidité (Gibson 1997) et qui a été adoptée par l'ASTM F2298 en 2003.

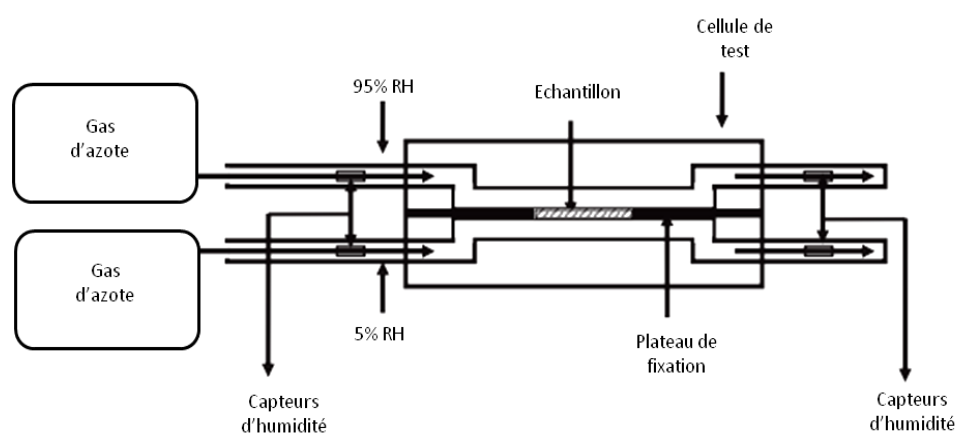


Figure II-9: La cellule dynamique de perméabilité à l'humidité (DMPC)

Dans cette méthode les deux faces d'un échantillon de  $10cm^2$  sont exposées à deux écoulements co-courants différant simplement par leur humidité relative. Cette différence est de 90% (95% d'un côté -5% de l'autre). Un différentiel de pression est également appliqué aux bornes de l'échantillon. Cette différence de pression est graduellement augmentée de -150 Pa à 150 Pa. À la sortie de la DPMC, l'humidité relative des deux écoulements est à nouveau mesurée pour chaque incrément de pression différentielle. Les changements d'humidité relative dans ces écoulements permettent ainsi de calculer et de tracer un flux de vapeur d'eau en fonction de la différence de pression. La valeur retenue pour un matériau donné correspond à l'ordonnée à l'origine de la courbe obtenue.

### III.1.3. La plaque chaude gardée transpirante ou le "Skin Model"

La plaque chaude gardée transpirante ou appelée aussi le "Skin Model" (Figure II-10) simule la peau de l'homme. Cet instrument est très utilisé dans les industries et les laboratoires afin de mesurer les transferts de masse et de chaleur selon la norme ISO 11092.

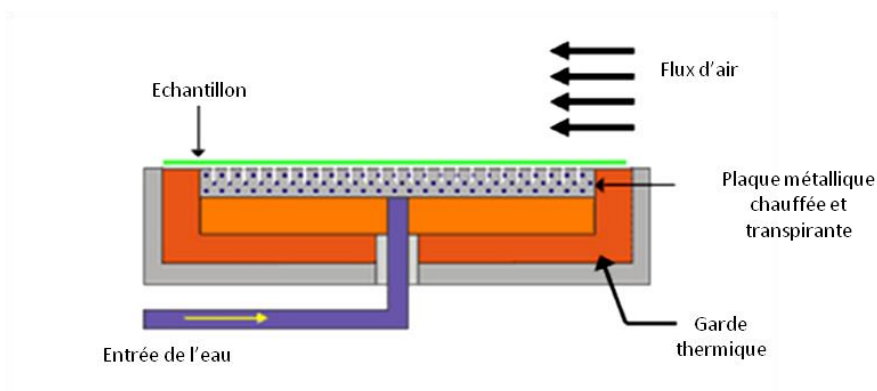


Figure II-10: Schéma représentatif de la plaque chaude gardée transpirante selon la norme ISO 11092

C'est une méthode indirecte de mesure de la propriété de transmission de la vapeur d'un tissu. Dans cette méthode, les mesures sont effectuées dans des conditions isothermes et dans des conditions atmosphériques standards. En effet, cet instrument est composé d'une plaque métallique poreuse par laquelle passe de l'eau distillée alimentée par un canal d'approvisionnement (Figure II-10) afin de simuler la transpiration. La température de la plaque est toujours maintenue à 35°C.

Selon la norme (ISO11092, 1993), le Skin Model est utilisé pour simuler les processus de transferts de chaleur et de masse qui se produisent au voisinage de la peau humaine. Les mesures qui concernent l'un ou les deux transferts peuvent être conduites séparément ou simultanément en utilisant une variété de conditions environnementales combinant la température, l'humidité relative, la vitesse de l'air.

Pour évaluer le confort thermique d'une étoffe textile selon cette méthode, un indice de perméabilité ( $I_{mT}$ ) est calculé. Il est mesuré suivant la norme ISO 11092 par la relation suivante:

$$I_{mT} = s \times \frac{R_{ct}}{R_{et}} \quad \text{II-7}$$

Avec :

- $s$  : la constante de Lewis est égale à 60 Pa.K.

#### III.1.4. Le mannequin thermique

L'utilisation de mannequin thermique s'est développée rapidement, ces dernières années, avec différents types et pour différentes applications. Le mannequin thermique est l'alternative proposée pour pallier au manque d'informations du Skin Model sur le produit final, qui conserve le même principe, mais se rapproche des paramètres morphologiques pour l'évaluation du vêtement dans son ensemble dans une pièce climatique. De nos jours, on parle du mannequin thermique transpirant, un système plus complexe, pourvu d'un mécanisme de transpiration afin de prendre en compte, également, les pertes par évaporation

Néanmoins, son coût élevé, et la difficulté de contrôler efficacement la sudation reste un frein important à bon nombre d'études (Havenith, 1990), (McCullough, 2001).



Figure II-11: Newton: mannequin thermique transpirant(Centexbel)

### III.2. Méthodes de caractérisation de la transmission de l'eau liquide

Il existe plusieurs méthodes (non normalisées) de caractérisation d'imbibition par capillarité, parmi lesquelles la technique de montée capillaire est la plus répandue. Le principe de la mesure consiste à tremper l'extrémité du milieu poreux (dans notre cas, un renfort fibreux) à la surface d'un fluide mouillant. Le fluide remontera dans l'étoffe textile par capillarité. C'est la méthode dite de montée capillaire, utilisée par Masoodi et Pillai (Masoodi 2010) pour les papiers, et Hsieh (Hsieh 1995) et Pezron et al. (Pezron 1995) pour des étoffes textiles.

#### III.2.1. Test de mouillabilité : Méthode de la goutte posée

La méthode de la goutte posée consiste à placer une ou plusieurs gouttes (quantité limitée) et de mesurer la diffusion au cours du temps (Harnett & Mehta, 1984; Kissa, 1996). La méthode de la goutte posée est utilisée pour évaluer certaines propriétés d'un support textile telles que : l'imperméabilité, l'absorbance et l'efficacité de quelques traitements comme l'apprêt antitache (Kissa 1996).

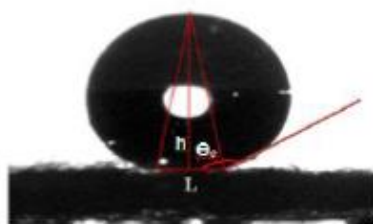


Figure II-12: Schéma d'une goutte posée sur un support textile et ses dimensions associées

Cette méthode est utilisée pour l'évaluation de la mouillabilité statique de liquide sur un solide donné. La mesure est effectuée dans des conditions bien contrôlées. Elle permet d'obtenir la tension de surface, l'étalement ou l'angle de contact et d'autres notions liées à la mouillabilité statique. Avec cette technique, on peut réaliser des mesures dynamiques de l'angle de contact et caractériser l'hystérésis de mouillage.

Le principe de détermination de l'angle de contact est basé sur l'observation du profil d'une goutte déposée sur une surface plane à l'aide d'une micro-seringue. L'appareil est équipé d'une caméra, d'un système d'analyse et de traitement d'images et d'un logiciel permettant de mesurer l'angle de contact.

### III.2.2. Capillarité verticale

Pezron et al. et Hsieh and Yu ont été parmi les premiers chercheurs à étudier l'imbibition verticale de liquides à l'intérieur des renforts de différentes matières comme le coton et le polyéthylène téréphtalate en utilisant l'analyse de la masse de liquide absorbé (Hsieh, 1995, Pezron, 1995). Ils ont choisi un tensiomètre électronique ou une microbalance pour suivre l'évolution de la masse dans les supports textiles. Ces expériences ont été effectuées sur des Petits échantillons. Pezron et al (Pezron 1995) ont réalisé leurs expériences de montée capillaire sur un support textile d'environ un pouce de large avec des fluides non volatils comme l'huile de silicone, le décane, le dodécane, l'hexadécane et le décanol. L'analyse de l'imbibition des supports textiles par capillarité en considérant seulement la masse de liquide absorbé est difficile car la nature double échelle du renfort ne permet pas d'étudier la répartition du liquide entre les micro pores et les macro pores.

Sénécot (Senecot 2002) et Kissa (Kissa 1981) ont suivi l'avancement du front capillaire au cours du temps, mais sans détecter le front par un algorithme de traitement d'image. La Figure II-13 montre le montage développé par Sénécot (Senecot 2002) pour caractériser la progression capillaire d'un liquide dans un tissu.

D'autres chercheurs ont utilisé une méthode fondée sur la capacité électrique pour enregistrer la position avant et pendant la montée capillaire des électrolytes liquides dans les tissus (Tagaya, Haikata et al. 1987). Law (Law 1988).l'a critiqué car cette approche en raison de certaines limitations comme des impuretés dans le liquide servant à l'imbibition qui peuvent réduire la précision des résultats.

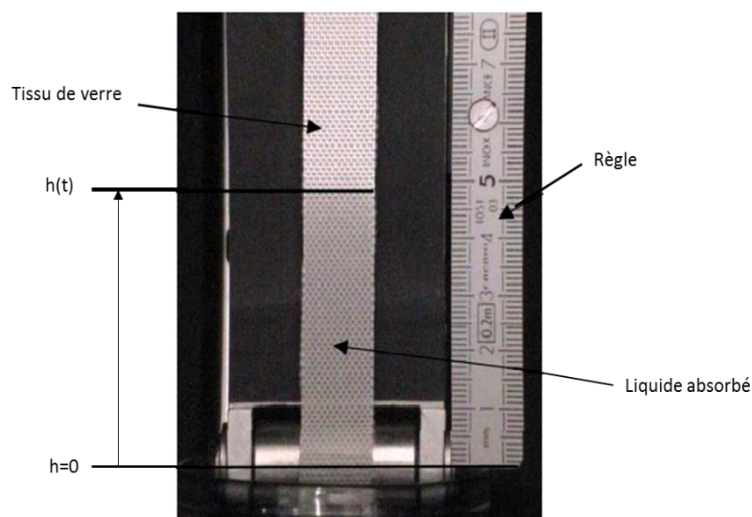


Figure II-13: Montage expérimental utilisé pour les tissus par Sénécot (Senecot 2002)

Les travaux de Zhuang et al. (Zhuang 2002) ont proposé une stratégie pour suivre automatiquement la montée capillaire avec un appareil photo numérique et l'analyse d'image. Cette approche est moins sujette aux erreurs de l'opérateur et peut donc être considérée comme

plus robuste. Récemment, Benltoufa et al (Benltoufa 2008) ont utilisé un montage fondé sur la montée capillaire pour étudier l'ascension capillaire à travers les matériaux textiles à partir d'un réservoir infini. Un élévateur a été utilisé ici pour mettre le liquide en contact avec le tissu tel qu'illustré par la Figure II-14.

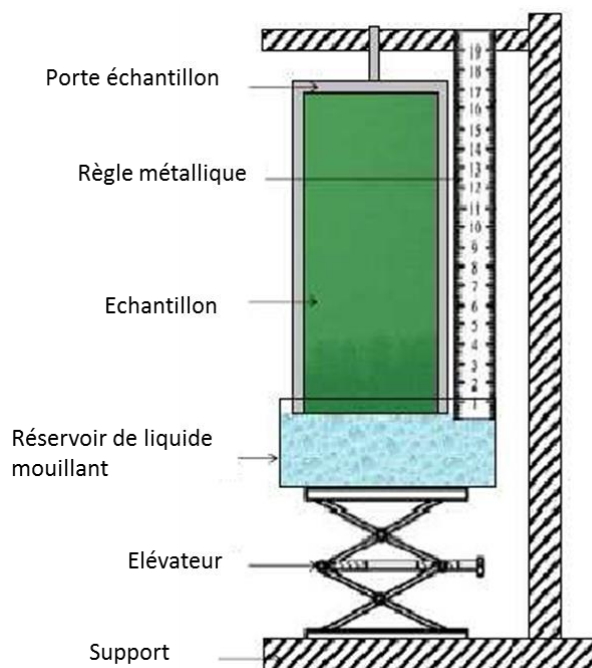


Figure II-14: Montage expérimental utilisé pour observer la montée capillaire des étoffes textiles (Benltoufa 2008)

Plusieurs applications dans le domaine des textiles et des milieux poreux demandent une caractérisation précise et fiable de la montée capillaire. Cependant les méthodes expérimentales utilisées jusqu'ici ne sont pas toujours automatisées. Par ailleurs, le problème de décoloration de la zone imprégnée persiste. C'est pourquoi le développement d'un nouveau montage expérimental, automatisé et plus précis est nécessaire (Fanaei 2012)

Le nouveau montage expérimental développé pour observer la montée capillaire combine un suivi visuel du front de résine avec une caméra numérique et une acquisition de la masse par une balance à haute résolution. Le suivi du front capillaire avec l'appareil photo est amélioré par l'utilisation d'un colorant fluorescent (technique dite DPI, « *Dye Penetrant Inspection*»). Cette approche présente l'avantage d'être reproductible, peu coûteuse et rapide. L'application d'une telle méthode nécessite la mise en place d'un protocole expérimental ainsi qu'une méthode numérique de traitement d'image adéquate pour extraire avec précision les positions du front de liquide pendant l'expérience de montée capillaire.

### III.2.3. Capillarité descendante

La Figure II-15 présente le montage expérimental de Miller pour la progression capillaire descendante : une fois le liquide atteint la barre supérieure (située à  $h_0$  dès l'origine de l'étoffe imprégnée dans le réservoir), le liquide commence à descendre vers le bas et le débit du liquide demeure constant tout au long de la progression capillaire descendante (Miller 2000).



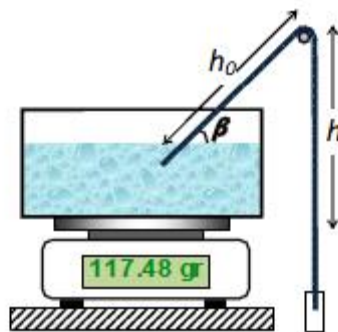


Figure II-15: Montage expérimental de Miller pour le mouillage descendant (Bentoufa 2008)

Ces normes et méthodes d'essais peuvent être utilisées pour évaluer le pouvoir d'absorption simple et pour déterminer les propriétés de capillarité en fonction du temps. Mais, elles ne permettent pas d'étudier le transfert des liquides à travers les vêtements d'une façon dynamique et dans des conditions réelles.

#### IV. Aperçu sur les travaux antécédents sur le confort

Depuis plusieurs années, le confort est devenu un critère important dans la fabrication des articles textiles. Ceci a amené les chercheurs à s'intéresser à l'étude du confort vestimentaire sous quatre aspects le confort thermo-physiologique, le confort sensoriel, le confort psychologique et le confort ergonomique (Li, 2001), (Das, 2010), (Saville, 2002). Des centaines d'études ont été élaborées sur le confort thermo-physiologique qui est lié aux échanges de chaleur et de masse se produisant dans le microclimat. L'objectif final de toutes ces études étant l'amélioration des propriétés de confort.

Dans certaines études, les chercheurs ont étudié l'effet de la nature de la fibre sur les paramètres de confort (Cimilli, 2010). Higgings et Anaud ont cherché l'influence des fibres synthétiques spéciale comme le polyester modifié (higgins & anaud 2003) sur les paramètres de confort.

D'autres recherches ont été consacrées à l'étude de l'effet des traitements de finissage sur les matières textiles tel que les matériaux à changement de phases (Nelson 2002), la micro-encapsulation (Gorkhan&sariik 2004), etc.

D'autres études avaient pour objectifs la prévision des paramètres de confort par les méthodes d'analyses avancées (Baghdadi, 2016).

La majorité de ces études a été effectuée sur les tricots car ils sont, généralement, les plus utilisés dans les vêtements de sport, les sous-vêtements (Bedek, 2011), (Sampath, 2012), (Yang, 2021).

Aujourd'hui, la recherche s'oriente vers la compréhension approfondie des phénomènes de transferts et plus précisément la gestion d'humidité tout en assurant une adaptation plus complexe de l'interface textile. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre étude. Nous avons focalisé notre travail sur le confort hydrique pour comprendre d'une façon approfondie l'influence dans un premier lieu, des paramètres de structure à savoir l'armure, le duitage et la matière et dans un deuxième lieu les paramètres de fabrication tels que le grammage, l'épaisseur, la porosité, la tortuosité, l'embuage et le retrait. En plus, nous avons choisi les étoffes textiles tissées car elles ne sont pas trop étudiées. Pourtant, le confort de nos jours ne se résume pas aux

articles de sport et aux sous-vêtements. Au contraire, de nos jours, le critère de confort est devenu parmi les conditions nécessaires pour l'achat des vêtements de tous les jours et même les vêtements de travail.

C'est vrai que ces dernières années, on voit apparaître des structures textiles trop sophistiquées. Mais, la compréhension des phénomènes de transfert sur les structures de base permet de faciliter par la suite les études sur les structures complexes.

## **V. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différents mécanismes de transfert de masse, généralement, sous forme vapeur d'eau ou liquide. Il existe plusieurs matériels et méthodes pour la détermination du taux de transmission de la vapeur d'eau et la résistance à l'évaporation. La plaque chauffante gardée et le mannequin thermique s'avèrent très intéressants et efficaces mais ça reste des tests destructifs et de plus les dimensions des échantillons à utiliser lors de ces tests sont grands. Par conséquent, c'est trop difficile voire même impossible de contrôler l'homogénéité de la répartition de la vapeur d'eau dans la surface de l'étoffe textile à tester. Pour combler ce problème, nous avons choisi d'utiliser un appareil stimulant aussi le "skin model" qui est le PERMETEST. Il sera présenté et détaillé dans le chapitre III dans lequel, nous allons présenter les matières ainsi que les matériels et méthodes à utiliser lors de cette thèse.

Nous avons aussi lors de ce chapitre, cité quelques méthodes caractérisant le transfert de l'eau liquide qui se basent sur la mouillabilité et la capillarité.

Pour conclure cette partie bibliographique, nous avons donné un aperçu sur les travaux antécédents du confort.



## Chapitre III:

---

---

# **Matériels et méthodes**

---

---

## Chapitre III: : Matériels et méthodes

### I. Introduction

La détermination et l'analyse des paramètres du confort hydrique étant importante, nous allons dans ce chapitre présenter les méthodes et matériaux choisis pour la réalisation de ces études. Une présentation des tissus fabriqués, des étapes de préparations de ces tissus et des méthodes de leurs caractérisations est exposée en premier lieu. Ensuite suivra la présentation des méthodes de mesures des paramètres de confort. Ce sont des méthodes simples, rapides et directement applicables sur l'étoffe que nous avons choisie. Nous avons utilisé le PERMETEST qui est un appareil non destructif pour la mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau et le MMT (Moisture Management Tester) est utilisé pour déterminer les propriétés de gestion de l'humidité.

### II. Présentation des tissus utilisés

Différents tissus ont été fabriqués pour la réalisation de ce travail. Le choix de ces tissus est basé sur la variation de trois paramètres l'armure, la matière et le duitage. Les trois armures de base ont été choisies ; la toile, le sergé de 3 à effet trame côte Z et le satin turc effet trame. Deux types de fils de trame ont été utilisés pour chaque échantillon (100% polyester (PET) et le mélange Coton/PET), et trois valeurs de duitage, différentes sont choisies (18 duites/cm, 21 duites/cm et 24 duites/cm). Donc, au total, 18 tissus différents ont été fabriqués pour la réalisation du présent travail. Le Tableau III-1 présente un récapitulatif des caractéristiques des fils utilisés.

Tableau III-1 : Les caractéristiques des fils utilisés

	Fil chaîne	Fil trame	
<b>Composition</b>	50% Co/ 50% PET	50% Co/50%PET	100% PET
<b>Titre des fils [Tex]</b>	33,5	33,5	18,8

Les échantillons ont été tissés sur la machine à tisser à lances flexibles "PICANOL GamMax-8-R-190" présentée par la Figure III-1, et disponible dans l'atelier de tissage du département de génie textile de l'ENIM. C'est une machine à tisser à ratière électronique, les fils de fond sont rentrés sur 4 cadres et avec un dérouleur et régulateur de duitage électroniques.



Figure III-1: Machine à tisser "PICANOL GamMax-8-R-190"

La Figure III- 2 présente 3 échantillons représentant les différentes armures fabriquées.

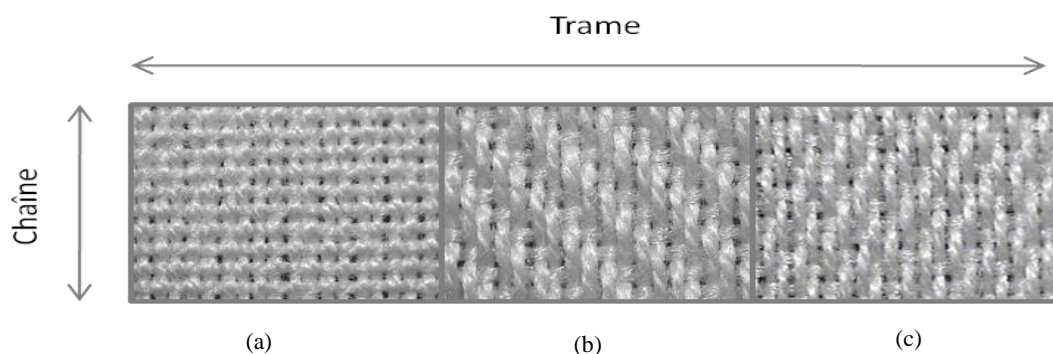


Figure III-2: Images des tissus prises par microscope optique Motic (agrandissement  $\times 20$ ): (a) toile, (b) Sergé 3/1 et (c) satin turc

### III. Préparation des échantillons

Avant la caractérisation des échantillons fabriqués, une préparation des échantillons est nécessaire. Les échantillons en mélange coton/polyester ont été débouillis et les échantillons en 100% polyester ont été caustifiés, relaxés et conditionnés en atmosphère d'essai. Le protocole expérimental est le suivant :

#### III.1. Débouillissage des tissus en mélange Co/PET

Le traitement de débouillissage est réalisé sur les tissus en mélange Co/PET. Le but de ce traitement est d'éliminer toutes les cires naturelles enrobant les fibres cellulosiques et la colle appliquée aux fils de chaînes avant le tissage. Par conséquent, l'hydrophilie des échantillons s'améliore. La recette de débouillissage est présentée dans le tableau III-2 suivant. L'utilisation de la soude caustique pour les tissus en mélange Co/PET provoque aussi une amélioration du pouvoir absorbant de la fibre de polyester 100%.

Tableau III-2 : Paramètres et étapes de débouillissage

Recette de débouillissage		
Produit	Rôle	Dosage
CHTT MRS (g/L)	Détergent	2
Séquestrant	Séquestrant	2
Soude caustique (g/L)	Base	2
Hydrosulfite de sodium	Agent protecteur	0,5
Conditions opératoires		
Paramètre	Valeur	
Température (°C)	100	
Durée (min)	20	
RdB	1/20	
Neutralisation		
Étape	Recette	Conditions
1er lavage	--	T= 95°C durant 5 min
2ème lavage	--	T= 60°C durant 5 min
3ème lavage	1 mL/L de CH <sub>3</sub> COOH à 50%	T= 40°C durant 2 min
4ème lavage	--	Température ambiante durant 2 min

### III.2. Caustification des tissus en PET

Le traitement de caustification est utilisé en vue de l'obtention de touché extrêmement doux et soyeux. Les échantillons traités sont plus hydrophiles et plus confortables au porter. En fait, ce traitement attaque la surface des fibres de polyester qui est partiellement hydrolysée avec la soude caustique.

Tableau III-3 : Paramètres et étapes de caustification

Recette de caustification		
Produit	Rôle	Dosage
Soude caustique (%)	Base	1
Alpatex (g/L)	Accélérateur de réduction	2
Conditions opératoires		
Paramètre	Valeur	
Température (°C)	130	
Durée (min)	45	
RdB	1/20	

### IV. Caractéristiques physiques (caractéristiques de fabrication) des tissus

Après avoir été traités, les tissus étudiés vont être caractérisés par les tests métrologiques les plus courant cités dans ce qui suit. Il faut noter que 5 éprouvettes ont été testées à chaque fois et que la valeur moyenne a été retenue pour l'analyse des résultats.

- **Grammage ou masse surfacique**

C'est la masse en gramme d'un mètre carré de tissu. La masse surfacique de nos échantillons a été déterminée suivant la norme européenne (EN12127, 1998). Les éprouvettes de surfaces 100 cm<sup>2</sup> ont été découpées pour être ensuite pesées sur une balance électronique de précision.

- **Épaisseur**

L'épaisseur du tissu est une de ses propriétés de base. Elle peut apporter des informations sur son poids et sa rigidité à l'usage. La mesure de l'épaisseur est réalisée selon la norme ISO 5084. Il s'agit d'appliquer une pression égale 1 kPa sur une éprouvette maintenue par deux plaques de référence et mesurer ensuite la distance perpendiculaire entre ces deux plaques (ISO5084, 1996).

- **Masse linéique**

La masse linéique ou titre des fils est déterminée par la mesure de la longueur d'un fil dans une atmosphère conditionnée selon la norme ISO 2060. Une fois la longueur déterminée, la balance électronique permet de mesurer le poids final des fils de chaîne et de trame (ISO2060, 1994) . L'équation qui donne la relation entre la finesse, la longueur et la masse est :

$$\text{Titre (Tex)} = \frac{m}{l} \quad \text{III-1}$$

Avec:

- m: la masse du fil [g],

- $l$ : la longueur du fil [Km].

- **Embuvement et retrait**

L'entrelacement des fils dans un tissu impose une ondulation tant aux fils de chaîne qu'aux fils de trame.

L'embuvement est la consommation en fil chaîne d'un article donné. De même, le retrait, lorsqu'il s'agit de l'élément trame. Ces deux facteurs sont largement dépendants de l'armure en question. La disposition du fil (tendu et sollicité) est donnée par la figure suivante :

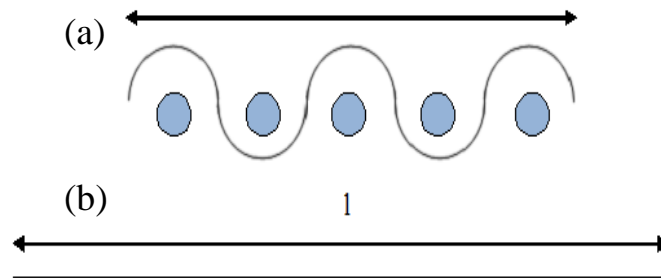


Figure III-3: Fil occupant le tissu (a) et fil extrait du tissu (b)

Lors du tissage, les fils de chaîne sont tendus pour garder la même position et pour permettre l'insertion de la trame. Une fois le tissu tombé du métier, les fils de chaîne se rétractent alors que ceux de trame ne changent pas d'état ; ce qui explique que l'embuvement est toujours plus élevé que le retrait.

$$e_m (\%) \text{ ou } r (\%) = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \quad \text{III-2}$$

Avec :

- $l$  : la longueur sans évolution (tendu),
- $l_0$  : la longueur avec évolution (dans le tissu).

Le pourcentage d'embuvement ou de retrait d'une éprouvette donnée est ainsi déterminé selon la norme française NF G 07-156.

- **Compte chaîne et le duitage**

Le compte en chaîne est le nombre de fils de chaînes par centimètre de tissu. Le duitage est le nombre de fils de trame par centimètre de tissu. Il s'agit de compter le nombre de fils de chaînes ou de trame (duite) occupant une longueur bien déterminée, en détissant les bords du tissu, déjà conditionné. Puis de calculer le nombre de fils par unité de longueur (EN1049-2, 1993) .

- **Facteur de couverture**

Le facteur de couverture est le pourcentage de la surface de tissu couverte par les fils et les fibres. Ce facteur dépend de l'armure, la densité et la forme des fils. Le facteur de couverture définit la compacité de l'étoffe textile, qui est étroitement liée aux échanges de masse objet de notre étude.

Pour déterminer le facteur de couverture des tissus, Peirce (Peirce, 1937) propose l'équation III-3. Cette équation est recommandée aux usines de tissage par les entreprises de machines à tisser Picanol (Dubrovski, 2010)

$$F_c = \left( \frac{Ch/in}{\sqrt{N_e}} + \frac{Du/in}{\sqrt{N_e}} \right) \times f_{correction(fil)} \times f_{correction(tissu)} \quad \text{III-3}$$

Avec:

- Ch/in, Du/in: le compte en chaîne et le compte en trame (duitage) par inch,
- $N_e$ : Le numéro anglais,
- $f_{correction(fil)}$ ,  $f_{correction(tissu)}$ : les facteurs de correction, respectivement, fil et tissu.

#### • Porosité

La porosité totale est le rapport entre le volume des vides du matériau textile et le volume total. Elle est exprimée, généralement, en [%]. La porosité totale des textiles peut s'étendre jusqu'à 95% ou plus dans certains cas. La porosité peut être calculée selon l'équation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{\rho_s e} \quad \text{III-4}$$

Avec :


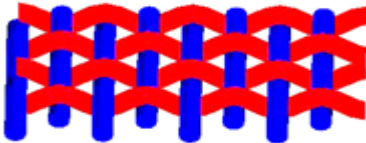
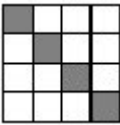

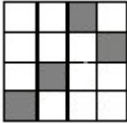

- $\varepsilon$ : la porosité [%],
- $M_s$ : la masse surfacique du textile [ $g/m^2$ ],
- $e$ : l'épaisseur du textile [m],
- $\rho_s$ : la densité des fibres constituant l'échantillon [ $g/m^3$ ].

En se basant sur l'équation (III-4), nous allons proposer une formule de la macro et la micro porosité qui est fonction des diamètres des fils chaîne et trame, duitage, compte en chaîne, etc. Elle sera présentée et détaillée dans le chapitre V.

#### • Diamètres moyens des fils et des fibres

Cette méthode consiste à mesurer le diamètre moyen des fils et des fibres en utilisant un microscope à projection. Pour la réalisation de ces mesures, nous avons utilisé le microscope optique Leica DM500 et nous avons effectué 100 mesures pour chaque fil et fibre. Les fils et les fibres sont placées sur une lamelle. Cette dernière est supportée par une platine qui se déplace au-dessous d'un oculaire où une caméra est montée. Une image est transmise à l'écran de l'ordinateur et par la suite, nos mesures de diamètres sont effectuées quel que soit l'orientation des fils ou des fibres. Dans notre étude, nous avons pris comme hypothèse que les fibres et les fils sont cylindriques et nous avons réalisé les mesures selon la norme française NFG-07-004. Les principales caractéristiques techniques des tissus utilisés sont rassemblées dans le tableau III-4.

Tableau III-4 : Caractéristiques des tissus

Armure						
Toile						
						
	D18		D21		D24	
Composition fil de Trame	Co/PET	PET	Co/PET	PET	Co/PET	PET
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	158	121	165	131	184	138
Embuvaage (%)	9,42	9,1	14,42	12,43	12,28	10,5
Retrait (%)	4,4	2,53	4,03	2,15	4,58	3,84
Épaisseur [mm]	0,39	0,35	0,63	0,46	0,42	0,32
Facteur de couverture	24,05	20,82	25,77	22,07	27,49	23,32
Porosité (%)	68,38	70,60	62,61	68,11	59,96	66,63
Tortuosité	1,5	1,5	1,3	1,6	1,4	1,8
Sergé 3						
						
	D18		D21		D24	
Composition fil de Trame	Co/PET	PET	Co/PET	PET	Co/PET	PET
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	153	124	166	134	179	138
Embuvaage (%)	5,3	5,12	6,37	5,85	2,15	2,1
Retrait (%)	2,91	3,1	5,3	1,96	1,96	2,15
Épaisseur [mm]	0,53	0,47	0,53	0,44	0,5	0,42
Facteur de couverture	13,95	12,08	14,95	12,80	15,94	13,52
Porosité (%)	62,62	65,40	58,27	63,55	56,93	61,19
Tortuosité	1,2	1,2	1,3	1,1	1,4	1,1
Satin Turc						
						
	D18		D21		D24	
Composition fil de Trame	Co/PET	PET	Co/PET	PET	Co/PET	PET
Grammage (g/m <sup>2</sup> )	154	123	167	135	179	1384
Embuvaage (%)	4,76	2,98	6,19	4,33	11,5	8,56
Retrait (%)	4,21	2,72	4,58	2,91	5,12	3,28
Épaisseur [mm]	0,51	0,46	0,51	0,44	0,5	0,42
Facteur de couverture	12,03	10,41	12,88	11,04	13,74	11,66
Porosité (%)	63,32	66,20	59,04	63,52	54,85	60,74
Tortuosité	1,3	1,3	1,2	1,3	1,1	1,1

## V. Les propriétés du confort hydrique

Les propriétés du confort hydrique que nous avons étudié et mesuré sont la perméabilité à l'air, la résistance à l'évaporation, la perméabilité relative à la vapeur d'eau et les différentes propriétés déterminées par le MMT (le temps de mouillage, le taux d'absorption, le rayon maximal de la surface mouillée, la vitesse de diffusion, l'indice de transport et la capacité globale de gestion d'humidité).

### V.1. La perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air représente la perméabilité de l'étoffe textile à la pénétration d'air. Elle a été mesurée à l'aide de l'instrument FX3300 de TEXTTEST (Figure III-4) selon la norme ISO 9237 (ISO9237, 1995) . Il s'agit de déterminer le flux d'air passant à travers une zone donnée de l'échantillon. En effet, la pression est présélectionnée numériquement et conformément à la norme d'essai. Elle est contrôlée et maintenue par l'instrument grâce à la présence d'un différentiel de pression qui rend les mesures bien précises même à des débits d'air élevés. La perméabilité à l'air d'une étoffe textile est mesurée à partir de la chute de pression et est affichée numériquement sur l'unité de mesure.



Figure III-4: Instrument de mesure de la perméabilité à l'air FX3300

L'appareil est utilisé rapidement, simplement et avec une grande précision. Un matériau perméable à l'air est généralement perméable à l'eau, soit dans la phase vapeur ou la phase liquide. Ainsi, la perméabilité à la vapeur d'eau et la transmission du liquide sont étroitement liés à la perméabilité à l'air et ce facteur est, à son tour, influencé par la structure du tissu.

### V.2. Le transfert de la vapeur d'eau

Le PERMETEST est une version simple du Skin Model. C'est un instrument non destructif. Il a été développé par Lubos Hes et ses collaborateurs (Hes L, 1993) , (Hes L, 2002) (Hes L, 2003) , (Hes L, 2006). Cet appareil mesure la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ), la perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) et la résistance thermique ( $R_{ct}$ ) comme défini dans la norme ISO 11092 (ISO11092, 1993) .

La tête de mesure est composée d'une surface poreuse légèrement courbée, de diamètre d'environ 80 mm, et couverte par une membrane semi-perméable par laquelle passe la vapeur



d'eau pour simuler la transpiration. La Figure III-5 présente une photo du PERMETEST et un schéma explicatif de toutes ses composantes.

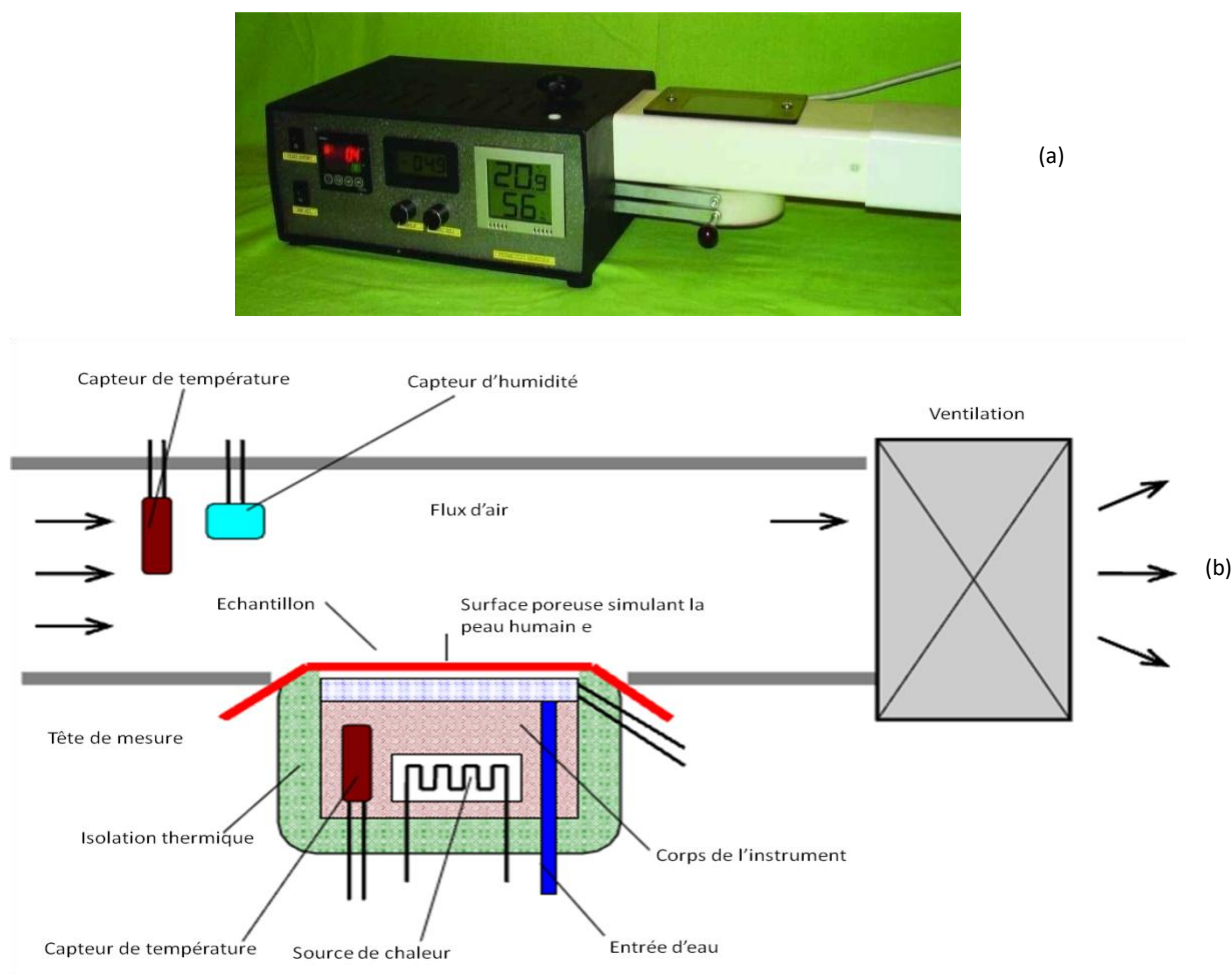


Figure III-5: (a) Photo du PERMETEST, (b) Schéma descriptif du PERMETEST

L'alimentation en eau est effectuée jusqu'à l'obtention d'une saturation en humidité proche de 100% HR. L'échantillon à tester est placé au-dessus de la surface poreuse. Cette surface est chauffée via une résistance électrique interne de température pouvant atteindre jusqu'à 35°C. Par conséquent, l'eau s'évapore et la membrane semi-perméable ne laisse passer que l'eau sous forme de vapeur d'eau à travers l'échantillon. Celui-ci sera exposé à un flux d'air parallèle à vitesse réglable ( $1\text{ms}^{-1}$  ou  $2\text{ms}^{-1}$ ). Ainsi, les deux paramètres indiqués ( $R_{et}$ ) et ( $P_{wv}$ ) sont déterminés par le PERMETEST:

- **La résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ )**

C'est l'énergie nécessaire pour faire passer la vapeur d'eau à travers l'étoffe textile. La surface poreuse est couverte par une membrane semi-perméable pour simuler la peau. Tout d'abord, l'instrument mesure le flux de chaleur ( $q_0$ ) sans échantillon. Par la suite, on introduit l'étoffe textile et on lance la mesure. Lorsque le signal est stable, le niveau de ( $q_{tissu}$ ), qui représente le flux de chaleur mesuré par le PERMETEST lorsque la tête de mesure est couverte par l'étoffe textile, est enregistré. Les deux valeurs ( $q_0$ ) et ( $q_{tissu}$ ) permettent de calculer la résistance à l'évaporation moyenne selon l'équation suivante III-5.

$$R_{et} = (P_{sat} - P_{vap}) \times \left( \frac{1}{q_{tissu}} - \frac{1}{q_0} \right) \quad \text{III-5}$$

Avec:

- $R_{et}$  : la résistance à l'évaporation [ $m^2 \cdot Pa/W$ ],
- $P_{sat}$  et  $P_{vap}$ : sont respectivement la pression partielle saturée de vapeur d'eau en environnement de laboratoire de  $T_0$  (22-25°C) et la pression partielle de vapeur d'eau au même environnement [Pa],
- $q_0$ : le flux de chaleur mesuré sans échantillon [ $W/m^2$ ],
- $q_{tissu}$  : le flux de chaleur mesuré avec échantillon [ $W/m^2$ ].

En fait, le coefficient ( $R_{et}$ ) détermine la résistance qu'oppose un textile à l'évacuation de l'humidité du corps. Plus cette résistance est faible plus le textile est considéré comme respirant.

L'institut allemand "Hohenstein" a réalisé un système de classification de la qualité de confort des textiles selon les valeurs de la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) (Reljić 2016) comme présenté par le Tableau III-5.

Tableau III-5 : Système de classement des valeurs de  $R_{et}$

Valeur de $R_{et}$	Notation	Description
<b>0-6</b>	Très bien (very good)	Extrêmement respirant et confortable pour les fortes activités
<b>7-13</b>	Bien (good)	Respirant et confortable pour des activités modérées
<b>14-20</b>	Satisfaisant	Respirant mais inconfortable en cas de fortes activités
<b>21-30</b>	Non satisfaisant	Légèrement respirant offrant un confort modéré en cas de faibles activités
<b>31+</b>	Très insatisfaisant	N'est pas respirant et inconfortable

- **La perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ )**

La perméabilité relative à la vapeur d'eau d'une étoffe textile est exprimée par le rapport entre le flux de chaleur de la tête de mesure couverte par l'échantillon ( $q_{tissu}$ ) et celui sans échantillon ( $q_0$ ), comme l'indique l'équation suivante :

$$P_{wv} = \frac{q_{tissu}}{q_0} \times 100 \quad \text{III-6}$$

Avec:

- $P_{wv}$ : la perméabilité relative à la vapeur d'eau [%].

Le PERMETEST est le seul instrument avec lequel on peut déterminer la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) et la perméabilité à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) à l'état mouillé (lorsque l'étoffe textile est humide). Pour ceci, un protocole expérimental spécifique est utilisé. Il est décrit dans le paragraphe suivant.

- **Mesure de la perméabilité effective à la vapeur d'eau à l'état mouillé**

Lorsque l'étoffe est mouillée, un film d'eau continu va se former et va empêcher l'évaporation. Nous avons donc suivi le protocole présenté ci-dessous avant de mesurer la perméabilité à la vapeur d'eau à l'état mouillé.

Tout d'abord, Nous avons mesuré la masse sèche des échantillons. Pour ce faire, les échantillons sont séchés dans une étuve à une température de 105-110°C. Nous avons ensuite et rapidement noté la masse des échantillons ( $M_{\text{sèche}}$ ) (la rapidité des mesures permet d'éviter le transfert de masse avec l'air et l'absorption d'humidité).

Ensuite, pour simuler la sueur, les échantillons sont imprégnés dans un bac rempli d'eau distillée + 2 gouttes de détergent/l pendant 15h (minimum) et sont ensuite essorés manuellement (convection naturelle).

Pour chaque échantillon (mouillé), les étapes suivantes sont établies :

- Étape 1 : on mesure sa masse ( $M_{\text{mouillé}}$ )
- Étape 2 : on effectue les mesures de la résistance à l'évaporation avec le PERMETEST préalablement calibré. La première mesure va être sans film plastique, on obtient la résistance à l'évaporation ( $R_{\text{et}}$ ).
- Étape 3 : on mesure une autre fois la masse du même échantillon.
- Étape 4 : on mesure la résistance à l'évaporation ( $R_{\text{et}}$ ) cette fois-ci, en mettant un film plastique au-dessous de l'échantillon.
- Étape 5 : on essaye de sécher l'échantillon en utilisant un papier absorbant

Les étapes précédentes sont répétées toujours et dans l'ordre jusqu'à avoir 5 à 7 mesures et à chaque fois la teneur en eau (U) dans l'échantillon est calculée selon l'équation III-7.

$$U(\%) = \frac{M_{\text{mouillée}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{sèche}}} \times 100 \quad \text{III-7}$$

Par la suite les deux courbes de régression sont tracés comme présenté par la Figure III-6. La première courbe "sans film" représente le flux total de refroidissement lorsqu'une partie de ce flux vient de la surface de tissu et l'autre partie vient de l'intérieur de l'instrument en passant à travers le tissu.

La deuxième courbe "avec film", présente seulement le flux de refroidissement de la surface.

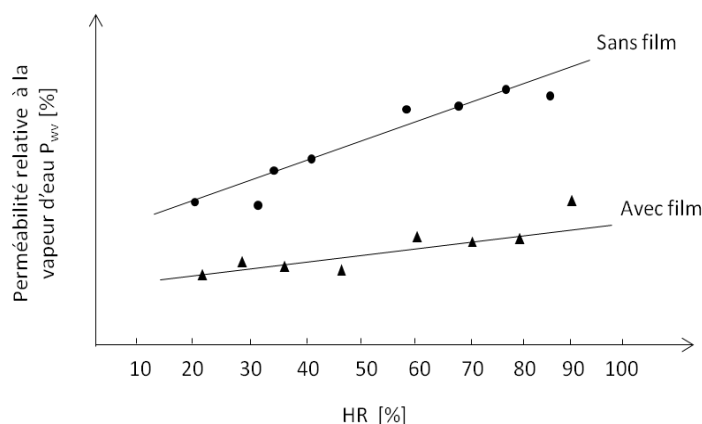


Figure III-6: Exemple des deux courbes de régression avec et sans film

Le but de ce protocole est la détermination de la perméabilité effective à la vapeur d'eau. C'est un paramètre très important car il traduit d'une façon réelle comment une étoffe mouillée peut être perméable.

### V.3. Transfert multidirectionnel des liquides : Méthode de gestion de l'humidité (MMT)

La plupart des méthodes adoptées pour la détermination de la cinétique du transfert des liquides à travers les matériaux poreux sont des méthodes unidirectionnelles. Cependant, la méthode de gestion d'humidité est utilisée pour la mesure quantitative du transfert du liquide à travers une étoffe textile dans des directions différentes.

Au sein du laboratoire "Comfort evaluation" au TUL (Technical University of Liberec), on a utilisé le MMT ou "Moisture Management Tester" comme dispositif expérimental pour la caractérisation hydrique des étoffes textiles testées (Figure III-7).



Figure III-7: Moisture Management Tester (MMT)

En fait, le MMT est un instrument qui a été développé par Li et al (Li Y 2000). Faisant l'objet d'une norme AATCC TM95 depuis 2009, cet instrument permet la caractérisation des transferts d'humidité d'une étoffe textile (Yao B 2006). Le principe du MMT est basé sur la mesure du changement de résistance électrique de l'étoffe textile lorsque celle-ci est humidifiée. Ainsi, une série de paramètres est déterminée pour caractériser les performances de gestion d'humidité du textile (Figure III-7).

L'échantillon à tester est placé entre les capteurs supérieurs et inférieurs. Une solution de sueur synthétique est introduite au centre du capteur supérieur, avec un taux prédéfini ( $0,21 \pm 0,01g$ ), à l'aide d'une pompe. La tête de mesure est composée de six anneaux. L'échantillon est maintenu à plat sous pression fixe entre les capteurs.

Selon la norme AATCC TM95, les dimensions des échantillons sont de  $8cm \times 8cm$ . Pour réaliser le test, on prépare une solution de sueur artificielle. Une éprouvette est placée sur des capteurs d'humidité. La goutte de la solution préparée est déposée, par la suite, sur la surface supérieure de l'étoffe textile. Au bout de deux minutes, l'appareil réalise une acquisition des données. La machine effectue une analyse des deux surfaces. L'opération est répétée cinq fois pour chaque type de tissu, puis l'appareil nous permet de déterminer la valeur moyenne des différents paramètres, chacun correspond à une gestion particulière de l'humidité.

Par conséquent, il est possible de déterminer le transport de l'eau dans les trois directions suivantes :

- diffusion vers la face externe de l'étoffe,
- transfert de la face interne vers la face externe à travers l'étoffe,
- diffusion vers la face interne de l'étoffe.

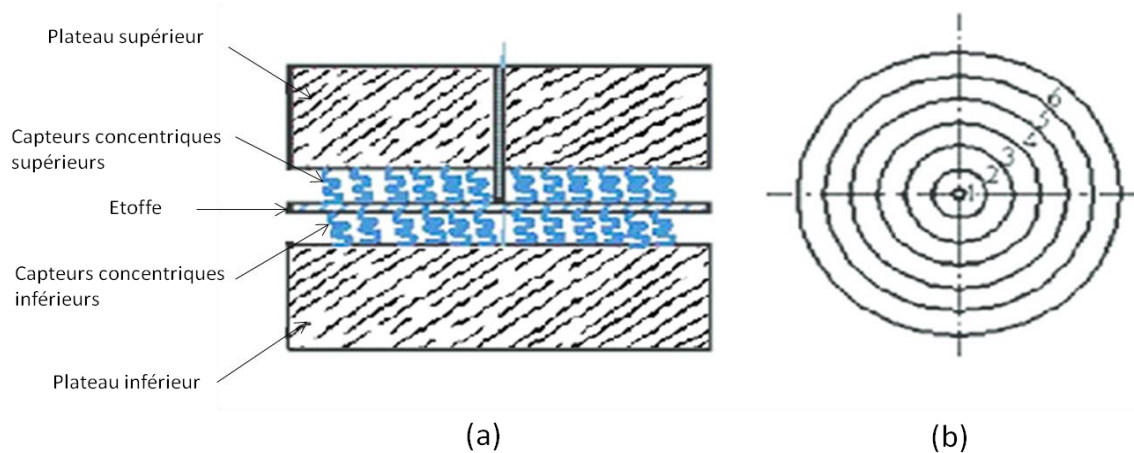


Figure III-8: Schéma de la tête de mesure de MMT:(a) Section, (b) capteurs concentriques

A un anneau  $i$  la tension détectée est  $V_i$  et le contenu en eau de l'anneau  $U_i$  est défini par l'équation suivante :

$$U_i = \frac{A_i}{R_i} = \frac{A_i(V_{DD} - V_i)}{R_{réf} \times V_i} \quad \text{III-8}$$

Avec:

- $A_i$ : le facteur de calibration,
- $R_i$ : la résistance électrique de l'anneau  $i$ ,
- $V_{DD}$ : la tension appliquée,
- $R_{réf}$ : la résistance de référence.

Le contenu total en eau de chaque face peut être déterminé par l'équation suivante :

$$USup = \sum_{i=1}^6 M_{sup_i}$$

$$UInf = \sum_{i=1}^6 M_{inf_i}$$

III-9

Avec :

- $M_{sup}$  et  $M_{inf}$ : respectivement les contenus en eau élémentaires limités par les capteurs de la face supérieure (face contre la peau) et ceux de la face inférieure (face externe).

En se basant sur la variation de mesure de tension, il est donc possible de mesurer le contenu en eau dans l'échantillon en fonction du temps sur chacune de ses faces. Ainsi, nous obtenons une courbe comme celle présentée dans la Figure III-9 et une série de paramètres seront définis et calculés afin d'évaluer les propriétés de transport d'humidité à travers l'étoffe textile.

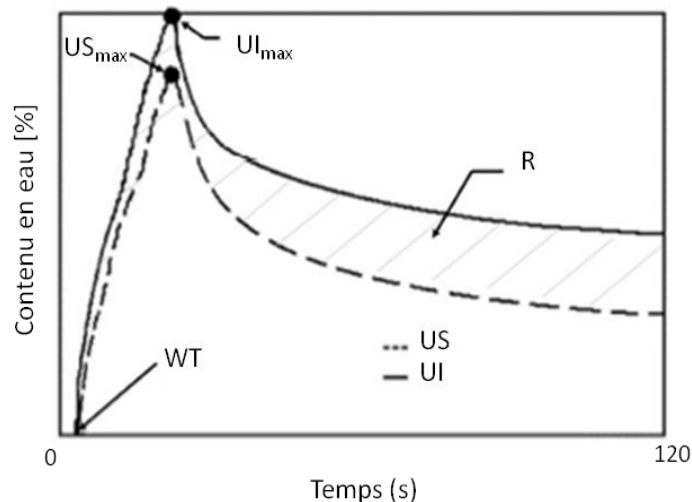


Figure III-9: Courbe présentant les résultats obtenus du contenu de l'eau en fonction du temps

Avec:

- US : le contenu en eau de la surface supérieure,
- UI : le contenu en eau de la surface inférieure,
- WT : le temps de mouillage,
- R : Indice de transport qui est la différence entre les surfaces des courbes sur le temps de mesure total (120s).  $R = \text{Aire(UI)} - \text{Aire(US)} / 120$

Les paramètres mesurés sont le temps de mouillage, le taux d'absorption, le rayon maximal de la surface mouillée, la vitesse de diffusion, l'indice de transport et la capacité globale de gestion d'humidité. Le tableau suivant présente tous les paramètres présentés, leurs symboles et leurs désignations (Hu J 2005).

Tableau III-6 : Les paramètres mesurés par le MMT

Paramètres	Désignations et symboles
<b>Temps de mouillage [s]</b>	Les temps de mouillage <b>WTt</b> (face supérieure) et <b>WTb</b> (face inférieure) représentent le début de mouillage lorsque la pente du contenu en eau pour chaque face est supérieure à la tangente (15°)
<b>Taux d'absorption [%/s]</b>	Les taux d'absorption <b>ARt</b> (face supérieure) et <b>ARb</b> (face inférieure) représentent la vitesse moyenne de diffusion de l'eau
<b>Rayon maximal de la surface mouillée [mm]</b>	Le rayon maximal de la surface mouillée <b>MWR<sub>top</sub></b> (face supérieure) et <b>MWR<sub>bottom</sub></b> (face inférieure) représentent les rayons maximum de la surface mouillée
<b>Vitesse de diffusion [mm/s]</b>	Les vitesses de diffusion <b>SSt</b> (face supérieure) et <b>SSb</b> (face inférieure) représentent les vitesses de diffusion accumulées du centre (anneau i=1) au rayon maximal MWR de chaque face selon l'équation : $TSS = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}}; BSS = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}}$ Où N <sub>T</sub> et N <sub>B</sub> représentent le nombre d'anneaux correspondant à MWR <sub>top</sub> et MWR <sub>bottom</sub>
<b>Indice de transport [%]</b>	L'indice de transport <b>AOTI</b> est le rapport entre la différence des surfaces des deux courbes (Figure III-) et le temps de mesure total (120s). $AOTI = \frac{Aire(UI) - Aire(US)}{120}$
<b>Capacité globale de gestion d'humidité</b>	La capacité globale de gestion d'humidité <b>OMMC</b> est l'indice correspondant à la performance générale de l'étoffe à gérer le transport d'eau. L'OMMC est calculé selon l'équation suivante: $OMMC = 0.25 \times BAR + 0.5 \times AOTI + 0.25 \times BSS$

Parfois, les valeurs de ces indices sont difficiles à interpréter. Pour résoudre ce problème, les indices peuvent être classés et convertis en valeur de grade basé sur une échelle de cinq grades comme le montre le Tableau III- 7 présentant la classification de tous les indices.

Tableau III-7 : Notation selon les résultats obtenus pour l'ensemble des indices (Yao B 2006)

Grade		1	2	3	4	5	
<b>WT</b>	Non mouillant	>119	20-119	5-19	3-5	<3	Mouillage rapide
<b>AR</b>	Absorption lente	0-10	10-30	30-50	50-100	>100	Absorption rapide
<b>MWR</b>	Non mouillant	0-7	7-12	12-17	17-22	>22	Grande propagation d'humidité
<b>SS</b>	Diffusion lente	0-1	1-2	2-3	3-4	>4	Diffusion rapide
<b>AOTI</b>	Peu d'échanges	<-50	-50-100	100-200	200-400	>400	Échanges excellents
<b>OMMC</b>	Propriétés de gestion d'humidité faible	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	>0,8	Excellente gestion d'humidité

## **VI. Méthode des plans d'expériences**

La méthode des plans d'expérience est une technique ancienne. Elle est basée sur des méthodes statistiques faisant appel à des notions mathématiques simple. Les plans d'expériences consistent à ordonner et à sélectionner les essais dans le but d'identifier les effets des paramètres d'entrées sur la ou les réponses (les sorties). Il existe différents plans dont chacun permet de résoudre certains problèmes particuliers. Le programme MINITAB 17 est utilisé pour la détermination de l'effet des paramètres d'entrées sur chaque paramètre de sortie.

Dans notre étude, nous avons utilisé les méthodes citées ci-dessous.

### **VI.1. Méthode des plans d'expériences**

Les plans factoriels sont des plans d'expériences qui permettent d'étudier les effets que plusieurs facteurs peuvent avoir sur une réponse. Ils permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique. L'utilisation des plans d'expériences permet de soustraire un maximum de renseignements avec un minimum d'expériences. Pour cela, des règles mathématiques sont à suivre et des démarches rigoureuses doivent être adoptées. Dans un plan d'expérience, chacun des facteurs varie selon des niveaux différents. Une expérience correspond à un niveau précis de chacun des facteurs. Lorsque ces niveaux varient, on peut étudier l'influence de la variation des facteurs sur la réponse et en même temps les interactions entre les différents facteurs.

Il existe de nombreux plans d'expériences adaptés à plusieurs cas rencontrés. Chaque expérimentateur utilise le plan adéquat. Nous allons dans ce travail, utiliser les plans factoriels complets.

Il existe de nombreux plans d'expériences pouvant être adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur.

L'utilisation d'un plan d'expérience vise les objectifs suivants :

- La détermination des facteurs clés dans la conception d'un nouveau produit ou d'un nouveau procédé,
- L'optimisation des réglages d'un procédé de fabrication ou d'un appareil de mesure,
- La prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Dans ce travail, le but est de nous permettre d'interpréter d'une façon efficace les résultats. En effet, les paramètres de fabrication (grammage, épaisseur, facteur de couverture, porosité, etc) sont des paramètres essentiels pour le choix des tissus lors de fabrication des vêtements et peuvent avoir une influence sur le confort hydrique. Les plans factoriels sont donc utilisés afin de déterminer, en chemin inverse, l'influence de ces paramètres sur le confort hydrique et par la suite, déterminer l'armure et le duitage les plus adéquats. Pour chaque paramètre, plusieurs niveaux ont été choisis. Le choix des niveaux dépend de deux facteurs :

- Balayage de la majorité des intervalles,
- Réalisation méthodique des combinaisons par ordre prioritaire bien étudié.

Ainsi, un plan d'expériences était considéré pour chaque composition des tissus. Dès lors, trois plans factoriels complets étaient appliqués dans cette étude.



Les niveaux des paramètres d'entrées pour chacun des plans sont présentés dans le Tableau III-8.

Tableau III-8 : Paramètres d'entrées des plans d'expériences

Paramètre	Matière		Duitage			Armure		
	1	2	1	2	3	1	2	3
Plan_1	Co/PET	PET	18	21	24	Toile	Sergé	Satin
Plan_2	Co/PET		18	21	24	Toile	Sergé	Satin
Plan_3	PET		18	21	24	Toile	Sergé	Satin

## VI.2. Analyse de la variance

L'analyse de la variance, appelée aussi ANOVA a été développée au début du vingtième siècle par Fisher (Figueiredo, 2021). C'est une méthode statistique qui permet d'étudier l'influence éventuelle d'un ou plusieurs facteurs qualitatifs sur la moyenne ( $\mu$ ) d'une quantité (Y) mesurée (variable réponse). Dans le cas où nous avons un seul facteur, on l'appelle analyse de la variance à un seul facteur ("one way ANOVA"). Sinon, on l'appelle analyse de la variance à deux ou plusieurs facteurs.

Le but est de tester si deux niveaux différents d'un facteur entraînent une différence significative dans la variable de sortie Y.

De ce fait nous nous basons sur les éléments suivants. Nous réalisons les essais sur les différents niveaux. Ensuite, nous calculons :

Les moyennes de chacun des essais. Les moyennes peuvent présenter des légers écarts.

La variance totale sur l'ensemble des échantillons et de l'exprimer en fonction de la variance due aux facteurs, de la variance due à l'interaction entre les facteurs et de la variance résiduelle aléatoire.

Diviser les variances calculées par la variance résiduelle. Nous calculons le rapport entre la variance des moyennes et la variance des erreurs. Si ce rapport est supérieur à un seuil donné, ceci signifie que le facteur étudié a une influence sur le phénomène. Sinon, les différences obtenues sont des différences dues à des erreurs de mesures ou à des facteurs non contrôlés.

Le raisonnement est tel que : si le facteur étudié a un effet significatif, cela veut dire que les variances calculées sont relativement plus grandes que les variances résiduelles ce facteur. Comme c'est un test d'hypothèse, il faut donc comparer le rapport entre les variances à une valeur de référence dont les propriétés statistiques sont connues, et qui permet d'obtenir des conclusions objective. C'est le facteur F de Fisher. Il suffit de comparer les valeurs calculées aux valeurs critiques de F, au seuil  $\nu$  fixé.

L'analyse est basée sur l'hypothèse nulle ou alternative et sur le test F.

L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) : les moyennes de Y sont égales dans les sous-populations.

L'hypothèse alternative ( $H_1$ ) : il existe au moins un groupe pour lequel la moyenne est différente.

F est le coefficient de Fisher. C'est le rapport entre la variance des moyennes et la variance des erreurs.  $F_\nu$  est la valeur de référence donnée par le seuil de signification  $\nu$  choisi.

- Si ( $F > F_v$ ) alors l'hypothèse  $H_0$  est rejetée ( $H_1$  acceptée). C'est à dire il y'a un effet entre les paramètres. C'est-à-dire que la variation du facteur étudié a un effet sur les résultats.
- Si ( $F < F_v$ )  $H_0$  acceptée ( $H_1$  est rejetée) et ceci veut dire que la variation du niveau du facteur n'a pas d'effet sur la réponse (les différents essais ont les mêmes résultats).

#### **VI.2.1. Interprétation par rapport au coefficient de Fisher, $F$**

Le coefficient de Fisher  $F$  est obtenu soit par le calcul, soit directement en utilisant des logiciels de statistiques tel que le logiciel MINITAB, SPSS, etc...

$F_v$  est lu sur les tables statistiques de la loi de Fisher-Snedecor (Olshen, 1973). Nous pouvons ainsi déterminer la signification et l'influence des paramètres d'entrée sur la sortie en comparant ces valeurs.

#### **VI.2.2. Interprétation par rapport à la « P-value » ou « p- valeur »**

Pour déterminer le degré d'influence du paramètre d'entrée sur la sortie, nous pouvons directement analyser la valeur de « p » présente sur la table d'analyse de la variance. Cette valeur représente la probabilité de faire une erreur de type 1, ou de rejeter l'hypothèse nulle si elle est vraie. La p-valeur est la probabilité d'obtenir les résultats observés d'un test, en supposant que l'hypothèse nulle est correcte. C'est le niveau de signification marginale dans un test d'hypothèse statistique. La valeur p est utilisée comme alternative aux points de rejet pour fournir le plus petit niveau de signification auquel l'hypothèse nulle serait rejetée.

Plus la valeur de « p » est petite, plus la probabilité de faire une erreur en rejetant l'hypothèse nulle est faible. La valeur limite de  $v$  est souvent utilisée. Autrement dit, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle si la valeur de p est inférieure à  $v$  (généralement 0.05). MINITAB calcule automatiquement les valeurs de p pour la plupart des tests d'hypothèses ce qui rend les analyses plus simples et plus rapides. Selon les valeurs de « p », trois classifications peuvent être considérées :

- $p = 0$ : facteur hautement significatif
- $0 < p \leq 0,05$ : facteur significatif
- $p > 0,05$ : facteur non significatif

Si les paramètres significatifs présentent la même valeur de p, alors la valeur du coefficient de Fisher  $F$  nous permet de juger le degré d'influence de chacun d'entre eux.

#### **VI.2.3. Interprétation par rapport au diagramme des effets**

En plus de l'analyse de la variance, les diagrammes des effets principaux et des interactions sont très utilisés lors de la visualisation de l'influence des facteurs. Le graphique des effets principaux est créé par MINITAB en traçant la moyenne des caractéristiques pour chaque niveau de facteurs. Les réponses pour chaque facteur sont reliées par une ligne. Si cette ligne est horizontale, le facteur n'a pas d'effet.

### VI.3. Méthode des surfaces de réponse

La méthode des surfaces de réponse est un ensemble de technique mathématiques qui se base sur la conception expérimentale pour déterminer la portée des variables d'entrée indépendantes. Cette méthode permet, grâce à des modèles mathématiques empiriques, de déterminer une relation d'approximation entre les réponses de sortie et les variables d'entrée pour optimiser les paramètres du procédé afin d'atteindre des réponses souhaitables. Dans cette méthode, la réponse peut s'écrire sous la forme suivante :

$$y = f(X_1, X_2, X_3 \dots \dots \dots X_k) + \tau \quad \text{III-10}$$

Avec :

- f: la fonction-réponse qui dépend des variables aléatoires  $x_i$  indépendantes
- $\tau$  : un terme qui représente d'autres sources de variabilité.

Dans notre étude, les réponses de sortie sont la perméabilité à l'air, la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ), la perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) et la capacité globale de la gestion d'humidité (OMMC). Les variables d'entrée sont dans un premier lieu les paramètres de structure (matière, armure et duitage) et dans un deuxième lieu les paramètres de fabrication (le grammage, l'épaisseur, le facteur de couverture, la porosité, l'embuvage, le retrait et la tortuosité). Nous avons utilisé cette méthode pour optimiser les paramètres du confort hydrique.

## VII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les différentes conditions opératoires qui ont accompagné ce travail. Nous avons présenté le protocole expérimental de la préparation des échantillons et les techniques de détermination des caractéristiques des tissus.

Ensuite, nous avons présenté les protocoles expérimentaux permettant de conditionner les échantillons et de mesurer les paramètres de confort hydrique. Nous avons également présenté le matériel de mesure de la perméabilité de la vapeur d'eau selon la norme ISO 11092 : le PERMETEST. Les paramètres mesurés par cet appareil sont la perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) et la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ). Nous avons aussi présenté le Moisture Management Test (MMT) appareil de mesure de la diffusion de l'eau liquide. Cet appareil donne les caractéristiques suivantes : le temps de mouillage, le taux d'absorption, le rayon maximal de la surface mouillée, la vitesse de diffusion et l'indice de transport. Ces dernières grandeurs peuvent être réunies dans un paramètre global appelé capacité globale de gestion d'humidité (OMMC).

La méthode des plans d'expériences a été introduite pour l'analyse des résultats expérimentaux.

## Chapitre IV

---

---

# **Évaluation expérimentale des paramètres du confort hydrique**

---

---

## Chapitre IV: Évaluation expérimentale des paramètres du confort hydrique

### I. Introduction

L'étude des caractéristiques de confort sert à déterminer les paramètres de fabrications nécessaires pour l'obtention d'un article ayant un confort souhaité. A titre d'exemple, que faut-il fixer comme paramètres de fabrications pour obtenir un article confortable et léger? La réponse à cette question n'est possible que lorsqu'on procède par le chemin inverse. La conception d'un vêtement confortable fait généralement, intervenir plusieurs paramètres de fabrication à savoir le grammage, l'épaisseur, la porosité, etc. Ces paramètres sont modifiés selon l'application demandée et les caractéristiques de confort recherchées.

L'objectif principal de cette partie d'étude est d'optimiser certains paramètres de fabrication afin de concevoir un article confortable d'un point de vue échanges hydriques. Pour atteindre cet objectif, nous allons dans une première partie de ce chapitre, étudier l'influence des paramètres de structure sur les paramètres du confort hydrique (à savoir la perméabilité à l'air, la résistance à l'évaporation, la perméabilité à la vapeur d'eau et la capacité de gestion de l'humidité). Dans cette partie, nous allons effectuer une évaluation de chaque paramètre de confort. Ensuite, nous déterminerons pour chaque composition de matière première (Co/PET et PET), pour chaque type d'armure (Toile, Sergé et satin) et pour différents duitages (18, 21 et 24), les effets principaux de ces paramètres sur les paramètres de confort hydrique.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons étudier l'influence des paramètres de structure sur les paramètres de fabrication. L'objectif est de trouver des relations reliant les paramètres de fabrication aux paramètres de confort hydrique. Ces relations vont permettre par la suite de prévoir les paramètres de structure donnant des paramètres d'un confort hydrique souhaité.

La Figure IV-1 présente un schéma explicatif du travail en illustrant tous les paramètres mis en jeu.

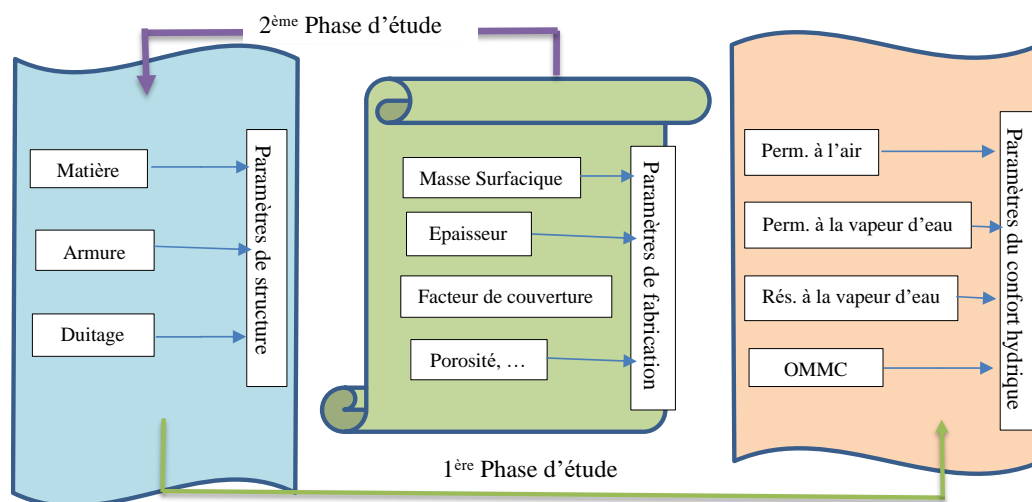


Figure IV-1: Schéma de la méthodologie de cette étude

## II. Évaluation des paramètres du confort hydrique

Nous nous intéressons dans cette partie à l'étude de l'influence des paramètres de fabrication des étoffes (armure et duitage) et les types de fils utilisés (composition de la matière première) sur les paramètres de confort. Un plan d'expérience factoriel complet est adopté. Les trois facteurs sont la matière (type de fil utilisé), l'armure et le duitage. Le type du fil utilisé prend deux niveaux et les deux autres facteurs prennent trois niveaux différents.

Au total, nous devons effectuer  $2 * 3^2 = 18$  expériences. Quand un facteur passe d'un niveau à l'autre, la réponse des paramètres du confort hydrique est éventuellement modifiée suite à cette variation.

L'ensemble des résultats des expériences effectuées est présenté dans le Tableau .IV-1

Tableau IV-1: Plan factoriel représentant les différentes expériences

Échantillons	Matière	Armure	Duitage	Perméabilité air [mm/s]	Ret[m <sup>2</sup> .Pa/W]	P <sub>wv</sub> [%]	OMMC
1	Co/PET	Toile	18	413	2,8	73,3	0,311
2	Co/PET	Toile	21	242	2,9	73,2	0,213
3	Co/PET	Toile	24	122	3,2	71	0,649
4	Co/PET	Sergé	18	852	3,4	69,4	0,623
5	Co/PET	Sergé	21	606	3,7	67,4	0,273
6	Co/PET	Sergé	24	377	3,8	71,1	0,358
7	Co/PET	Satin	18	835	3,3	70,3	0,342
8	Co/PET	Satin	21	590	3,5	68,9	0,261
9	Co/PET	Satin	24	363	3,5	65,8	0,269
10	PET	Toile	18	476	2,5	75,4	0,225
11	PET	Toile	21	238	2,7	73,2	0,111
12	PET	Toile	24	156	2,9	75,4	0,182
13	PET	Sergé	18	811	2,8	71,8	0,115
14	PET	Sergé	21	596	2,9	74,2	0,214
15	PET	Sergé	24	446	3,1	75	0,221
16	PET	Satin	18	989	2,4	72,2	0,316
17	PET	Satin	21	700	2,5	71	0,163
18	PET	Satin	24	429	2,5	75,4	0,320

Le tableau IV-2 présente le traitement statistique de ces données et permet de déterminer les caractéristiques de position et de dispersion des réponses (des paramètres du confort hydrique).

Tableau IV-2 : Paramètres statistiques des différentes caractéristiques du confort

	Moyenne	Min	Max	Écart type	CV%
<b>Perméabilité à l'air [mm/s]</b>	513,4	122	989	252,5	49,18
<b>Ret [m<sup>2</sup>. Pa/W]</b>	3,022	2,4	3,8	0,436	14,43
<b>P<sub>wv</sub> [%]</b>	71,889	65,8	75,4	2,814	3,91
<b>OMMC</b>	0,2869	0,1108	0,6488	0,1458	50,81

D'après ce tableau, nous remarquons que les coefficients de variations de la perméabilité à l'air et de la capacité de gestion de l'humidité sont très importants. Pour comprendre l'origine de ces

écarts, nous allons analyser l'influence des différents paramètres de fabrication sur chaque caractéristique de confort.

Cette analyse est basée sur le test F de Fisher qui est appliqué lorsque les variables suivent une loi normale (normalité de la variable).

La Figure IV-2 présente les droites d'Henri relatives à tous les facteurs étudiés.

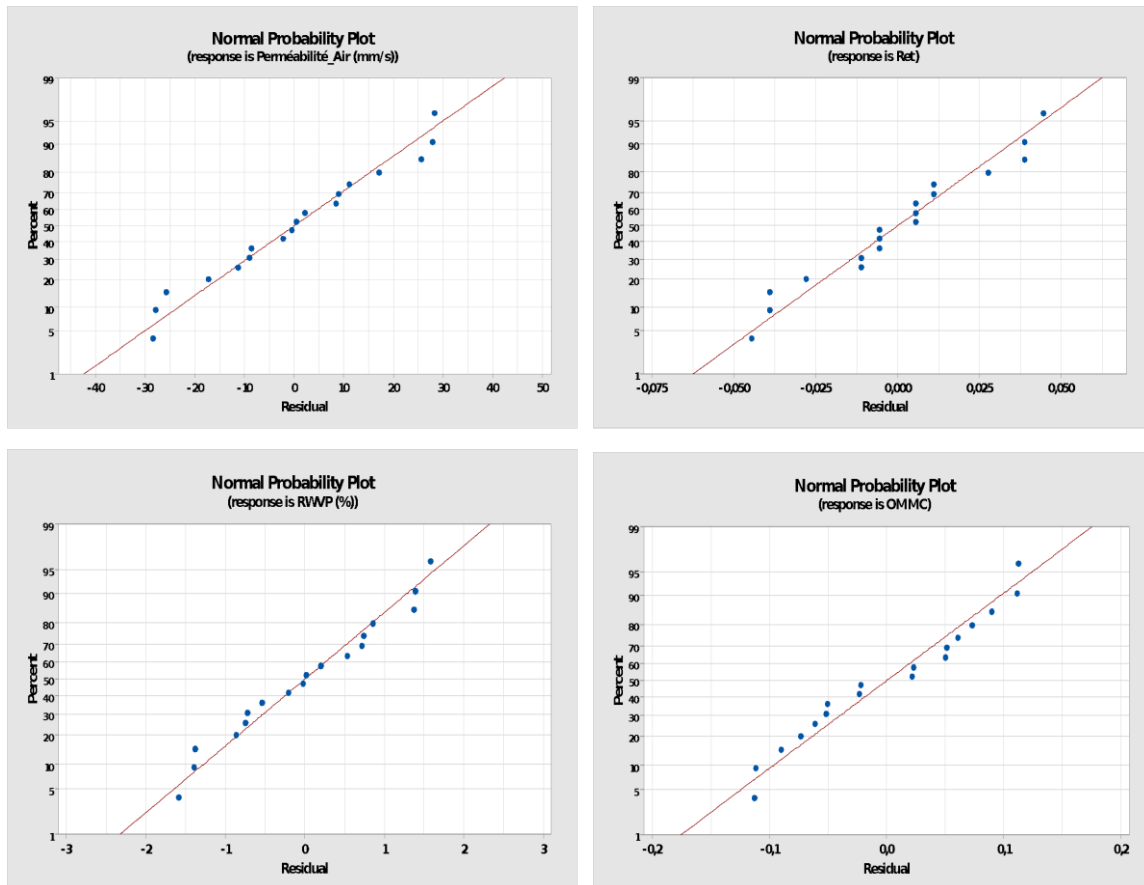


Figure IV-2: Droite d'Henry pour chacune des variables de confort

Les résultats présentés par la Figure IV-2 montrent que chacune des variables de confort suit une loi normale. Ainsi, la méthode de l'analyse de la variance peut s'appliquer à ces résultats pour déterminer les effets des paramètres de structure sur les sorties (caractéristiques du confort hydrique).

### II.1. La perméabilité à l'air

La Figure IV-3 illustre la variation de la perméabilité à l'air en fonction de l'armure, du duitage et des différents types de fils. Nous constatons que la perméabilité à l'air est affectée par ces paramètres. D'après la figure IV-3, nous remarquons que cette variable varie d'une armure à une autre, d'un duitage à l'autre et d'une matière à une autre.

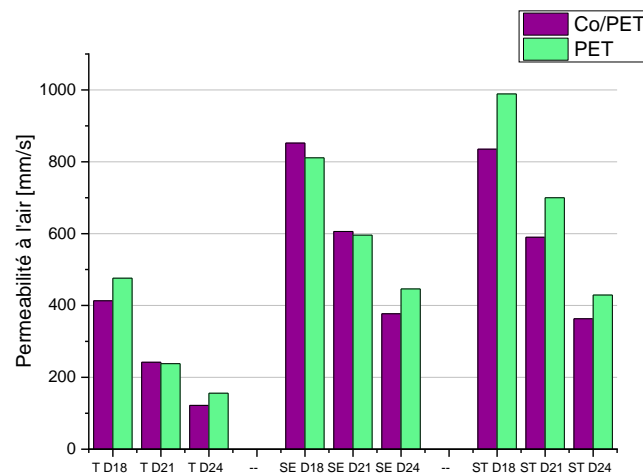


Figure IV-3: Perméabilité à l'air des différentes étoffes en fonction de la composition, l'armure et le duitage

Les résultats obtenus montrent qu'il y a :

- Influence du duitage sur la perméabilité à l'air

Plus le compte en trame est faible plus la perméabilité à l'air est importante. Ceci est dû au fait que le tissu présente plus de pores. Ces pores sont divisés en deux catégories ; les pores inter-fils et les pores inter-fibres. Cependant, pour des valeurs de duitages assez élevés, la structure est plus dense et la porosité est plus faible.

Les étoffes textiles conçues avec les fils de polyester ont une perméabilité à l'air plus importante que celles conçues avec des fils en mélange Co/PET. Ceci peut s'expliquer par la structure des fibres utilisées et les canaux inter-fils. En fait, les fibres de PET ont une section ronde alors que celles en coton ont une section en forme d'haricot. Ce qui peut entraîner la diminution de la porosité à cause du tassement de ces fibres et pouvant ainsi diminuer la perméabilité.

- Influence de la structure des tissus sur la perméabilité à l'air

D'après les résultats obtenus et présentés dans la figure IV-3, nous constatons que l'armure a un effet sur la perméabilité à l'air. L'armure toile est la moins perméable. En effet, cette armure est la plus liée (plus dense) que toutes les autres armures. Nous observons que l'armure satin est la plus perméable et c'est dû au fait qu'elle est la plus poreuse. En comparant l'armure satin et l'armure sergé, nous remarquons que la circulation de l'air est plus facile à travers les tissus en satin comparés à ceux en sergé pourtant les deux armures présentent le même nombre de flottés en sens chaîne et en sens trame, et pour toutes les valeurs de duitage. De plus, elles ont des valeurs de masse surfacique voisine. En effet, les courbures des fils de chaînes et des duites de l'armure sergé sont plus importantes par rapport à celles de l'armure satin qui a une surface plus lisse ce qui donne des valeurs différentes du retrait et de l'épaisseur.

Pour les tissus en Co/PET, la perméabilité à l'air ne change pas lorsqu'on compare les deux armures : sergé et satin.



Pour les tissus en 100% PET, la différence de perméabilité devient plus marquée lorsque le duitage diminue : cette perméabilité est alors plus élevée pour l'armure satin.

### II.1.1. Étude des effets principaux des paramètres de structure sur la perméabilité à l'air

La Figure IV-4 présente l'influence des paramètres de structure (matière, duitage et armure) sur la perméabilité à l'air.

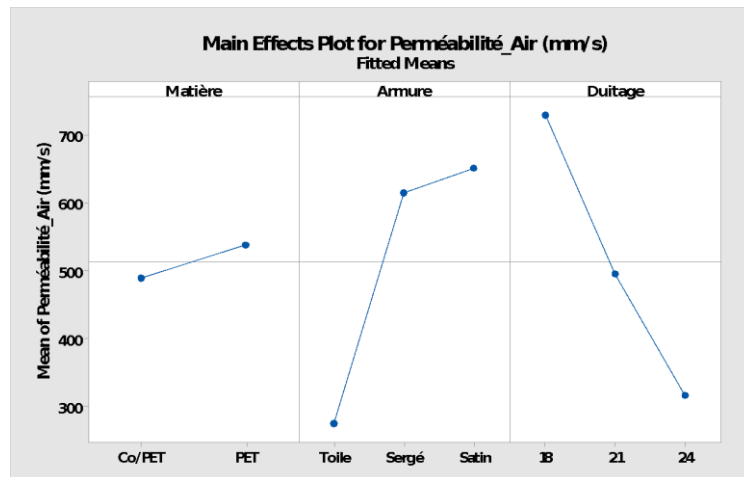


Figure IV-4: Influence des paramètres de structure sur la perméabilité à l'air

D'après cette figure, nous constatons que, la matière de la trame n'a pas un grand effet sur la perméabilité à l'air (elle varie entre 485 et 518 mm/s). Cependant, le duitage a un effet sur la perméabilité à l'air. En fait, en augmentant le nombre de duite par cm, la perméabilité à l'air diminue. Pour les structures moins denses (duitage 18), la perméabilité à l'air est plus que 700 mm/s alors que pour les structures denses (duitage 24), la perméabilité à l'air est de l'ordre de 320 mm/s. Pour l'armure sergé et satin, la variation de la perméabilité à l'air n'est pas importante (entre 620 et 680 mm/s), car ces deux armures possèdent des flottés sur 3 points de liage en sens chaîne et en sens trame aussi. La seule différence consiste à dissimulation des points de liage au niveau de l'armure satin Turc et ce qui rend cette dernière la plus perméable à l'air. Pour l'armure toile, la perméabilité à l'air est beaucoup plus faible, elle est de l'ordre de 300mm/s. En effet, la toile est l'armure la plus liée.

### II.1.2. Interaction entre la perméabilité à l'air et les paramètres de structure

La Figure IV-5 illustre les courbes des interactions des paramètres de structure sur la perméabilité à l'air.

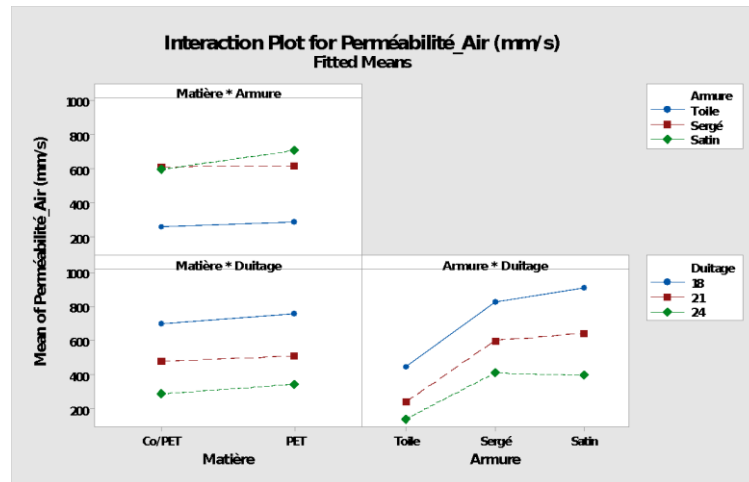


Figure IV-5: Courbes d'interactions de la Perméabilité à l'air

Nous constatons l'absence d'interaction entre « l'armure et le duitage » et la « matière et le duitage » mais on remarque une faible interaction entre « la matière et l'armure ».

## II.2. Transfert de la vapeur d'eau

La perméabilité à la vapeur d'eau est la capacité de transmettre la vapeur d'eau du corps. Elle représente aussi la quantité d'humidité traversant un matériau. Le rôle de l'étoffe textile à transporter la vapeur d'eau est un paramètre déterminant du confort (Skenderi Z 2009), (Wang F 2009).

Nous nous intéressons dans cette étude à mesurer et à étudier l'effet des différents paramètres de structure sur la variation de la perméabilité à la vapeur d'eau.

La Figure IV-6 illustre la variation de la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) des différents tissus en fonction de l'armure, du duitage et du type de fil.

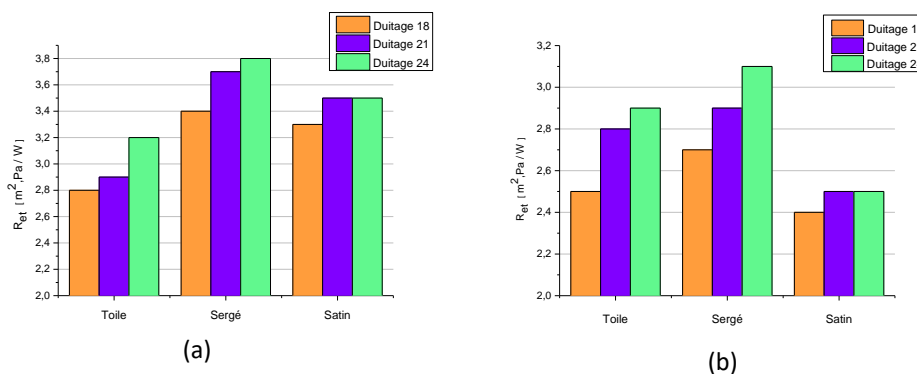


Figure IV-6: La résistance à l'évaporation en fonction de l'armure et le duitage : (a) cas des tissus en Co/PET, (b) cas des tissus en 100% PET

Nous constatons que ( $R_{et}$ ) est profondément affecté par ces paramètres. En fait, plus la valeur de  $R_{et}$  est faible plus on a un meilleur transfert d'humidité ce qui permet de garder la peau sèche. Dans le cas du mélange Co/PET, les tissus en armure toile ont les valeurs de ( $R_{et}$ ) les plus faibles par rapport aux autres armures (sergé et satin). D'après (Havenith 2002), la résistance à l'évaporation est directement proportionnelle à l'épaisseur et à l'air emprisonnée.

Dans le cas des tissus en Polyester, les échantillons en armure satin ont les valeurs de  $R_{et}$  les plus faibles étant donné, aussi, que l'armure satin présente plus de flottés et la perméabilité à l'air la plus élevée.

Les armures sergées ont des valeurs de ( $R_{et}$ ) les plus élevées par rapport aux autres armures vu qu'elles présentent des sillons favorisant ainsi le transfert d'humidité. De plus, elles ont les épaisseurs les plus élevées.

Les valeurs de ( $R_{et}$ ) des tissus en mélange Co/PET sont comprises entre 2,8 et 3,8  $m^2Pa/W$  alors que pour les tissus en Polyester, ces valeurs sont comprises entre 2,5 et 3,2  $m^2Pa/W$ . Cela est dû à la distribution des fibres dans les fils composants les différents tissus étudiés. Comme l'indique la Figure IV-7, les fils en Co/PET sont composés d'un nombre élevé de fibres à la section en les comparant avec les fils en Polyester utilisés.

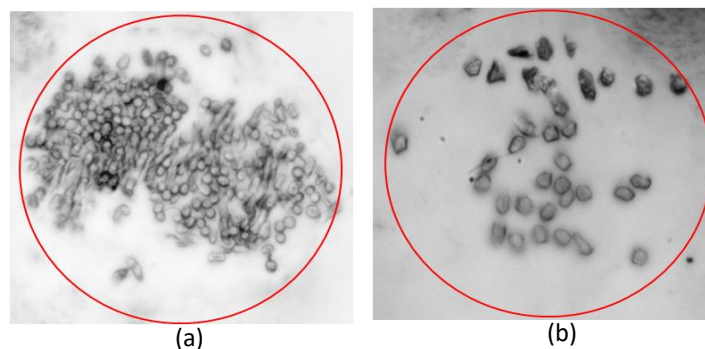


Figure IV-7: Coupe transversale des fils utilisés (a) fil en Co/PET, (b) fil de 100% Polyester

Le compte en trame affecte la perméabilité à la vapeur d'eau des étoffes textiles utilisées. Les tissus qui ont des valeurs de duitage faibles (duitage=18) ont des valeurs de ( $R_{et}$ ) faibles pour tous les types de fils et pour toutes les armures. Lorsque le compte en trame augmente, la structure devient plus compacte et la transmission de la vapeur d'eau devient de plus en plus difficile.

Selon le système de mesure de confort de l'institut Hohenstein, les matériaux textiles dont la valeur de ( $R_{et}$ ) est inférieure à 3  $m^2Pa/W$  sont jugés comme matériaux performants et confortables au porter en termes de respirabilité et de transfert de la vapeur d'eau. D'après ces résultats, l'armure satin en Polyester est la plus perméable à la transmission de la vapeur d'eau.

### ***II.2.1. Étude des effets principaux des paramètres de structure sur la résistance à l'évaporation***

D'après la Figure IV-8, nous constatons que la matière a un effet sur la résistance à l'évaporation. Mais cet effet n'est pas important. L'armure sergé a la résistance à l'évaporation la plus élevée. Elle est égale à 3.3  $m^2.Pa/W$ .

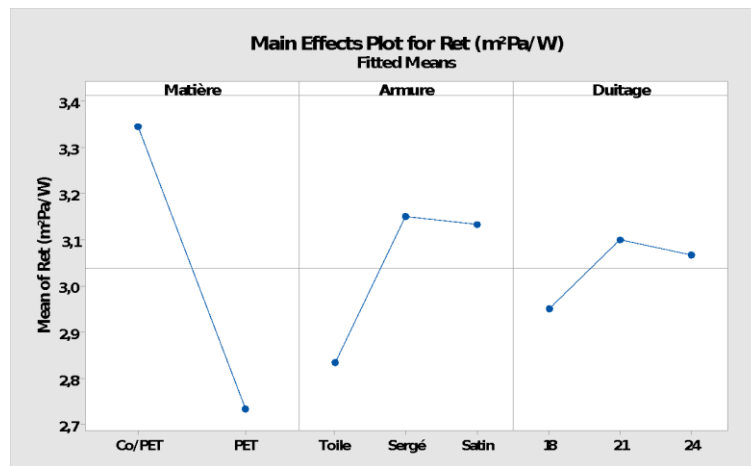


Figure IV-8: Influence des paramètres de structure sur la résistance à l'évaporation

En augmentant le nombre de duites par cm, la résistance à l'évaporation augmente, pour le duitage 18, elle est de l'ordre de 2,8 m<sup>2</sup>.Pa/W et pour le duitage 24, la résistance à l'évaporation est égale à 3,2 m<sup>2</sup>.Pa/W. L'armure sergé a la valeur de la résistance à l'évaporation la plus élevée (3,3 m<sup>2</sup>.Pa/W) alors que l'armure toile a la valeur de la résistance à l'évaporation la plus faible (2,8 m<sup>2</sup>.Pa/W). En effet, la toile, étant l'armure la plus liée et ayant plus d'ondulations en sens chaîne et trame, donne un aspect des grains et laisse apparaître des interstices entre les points de liages ce qui facilite le passage de la vapeur d'eau comparée aux autres armures ayant des flottés donnant plus de résistance au passage de la vapeur d'eau.

### II.2.2. Interaction entre la résistance à l'évaporation et les paramètres de structure

La Figure IV-9 présente les courbes des interactions des paramètres de structure sur la résistance à l'évaporation.

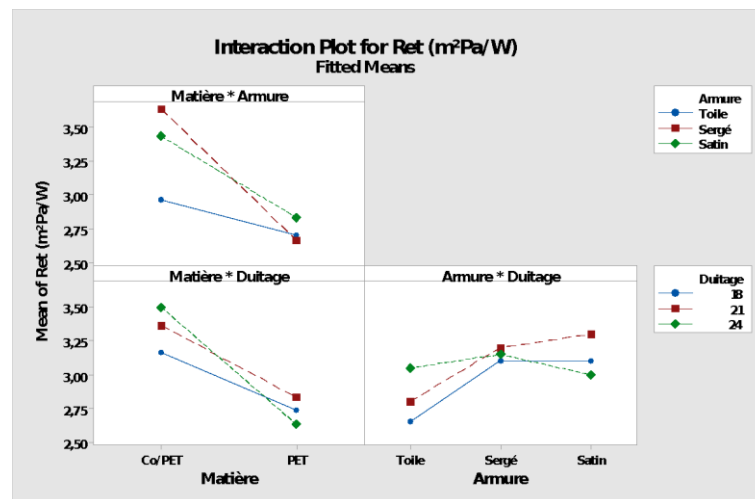


Figure IV-9: Courbes des interactions de la résistance à l'évaporation

En se basant sur la Figure IV-9, nous constatons l'existence de faibles interactions entre les différents paramètres de structure "matière et armure", "matière et duitage" et "armure et duitage".

### **II.3. Transfert de l'eau liquide : Méthode de gestion d'humidité**

L'étude des propriétés de la gestion de l'humidité est essentielle pour l'évaluation du confort hydrique des étoffes textiles puisqu'elle affecte et donne une idée sur la diffusion, l'absorption et l'élimination de la sueur des deux surfaces de l'étoffe. (Özkan and Meriç 2015).

Pour évaluer la capacité des différentes étoffes à transférer l'eau liquide, nous avons eu recours à la méthode de gestion d'humidité. Le Moisture Management Tester "MMT" est le dispositif expérimental utilisé. Les étoffes textiles ont été préparées et leurs capacités de gestion d'humidité ont été mesurées, enregistrées et étudiées afin de déterminer l'effet des paramètres structuraux (armure et duitage) et de la composition des fils sur le transfert d'eau. En effet, pour chaque type de tissus, tous les paramètres déterminés par le MMT (rayon maximal de la surface mouillée, taux d'absorption, indice du transport unidirectionnel, capacité totale de gestion d'humidité, etc.) ont été mesurés avec leurs valeurs moyennes pour les deux surfaces de l'étoffe. Dans cette étude, la surface supérieure est considérée la face en contact avec la peau (face envers du tissu) et la surface inférieure est la face endroit du tissu. Les résultats des tests sont regroupés dans le tableau IV-3 et convertis en grades illustrés dans : la figure IV-10, la figure IV-11, la figure IV-12, la figure IV-13, la figure IV-14 et la figure IV-15.

Tableau IV-3 : Propriétés de la gestion d'humidité mesurées à l'aide du MMT

Échantillons	Temps de mouillage [s]		Taux d'absorption [%/s]		Rayon maximal de la surface mouillée [mm]		Vitesse de diffusion [mm/s]		AOTI [%]	OMMC
	WTt	WTb	Art	ARb	MWRt	MWRb	SSt	SSb		
<b>Co/PET</b>										
<b>T D18</b>	4,1556	4,4928	14,8284	18,0069	18	22	3,2617	3,4485	29,6753	0,3114
<b>T D21</b>	6,7208	7,0576	18,8593	24,4036	14	13	2,1722	2,0027	30,6252	0,2132
<b>T D24</b>	3,7442	3,8188	31,2186	46,1767	22	22	3,8306	3,6502	246,7905	0,6488
<b>SE D18</b>	3,2443	3,2133	36,1274	39,9814	20	20	4,2355	4,1023	210,39	0,6226
<b>SE D21</b>	3,3508	3,2198	9,2585	8,5441	20	15	4,1927	3,5337	35,2815	0,2733
<b>SE D24</b>	3,276	2,995	11,616	11,6871	20	20	4,2823	4,2586	43,0567	0,3581
<b>ST D18</b>	3,5335	3,5097	8,8497	8,6983	20	20	3,7053	3,8425	44,2672	0,3416
<b>ST D21</b>	3,8377	4,0252	9,4317	9,21	15	16,25	2,9819	3,0093	34,2421	0,261
<b>ST D24</b>	3,763	3,7068	10,6266	9,425	17	18	3,3337	3,4701	5,2563	0,2686
<b>Polyester</b>										
<b>T D18</b>	11,138	5,428	7,9387	10,2718	10	10	2,1963	2,4342	44,3291	0,2251
<b>T D21</b>	11,232	9,266	7,1637	5,496	10	5	0,5083	0,5237	49,7621	0,1108
<b>T D24</b>	7,02	6,74	4,252	3,6681	10	15	1,5067	1,8233	52,3193	0,1823
<b>SE D18</b>	10,858	15,351	15,5931	10,6838	5	15	0,4527	0,6631	52,098	0,1153
<b>SE D21</b>	15,257	15,538	41,5887	21,7012	5	5	0,3238	0,318	112,9351	0,2135
<b>SE D24</b>	2,808	2,996	6,4102	4,7258	20	10	5,3122	2,9765	0,4391	0,2208
<b>ST D18</b>	17,784	8,237	43,755	19,8366	5	5	0,2782	0,5935	210,0804	0,3163
<b>ST D21</b>	16,1925	8,026	24,667	27,9568	7,5	8,75	0,6949	0,4114	51,0909	0,1626
<b>ST D24</b>	17,409	6,645	28,105	65,5058	10	5	0,8106	0,2841	99,0705	0,3198

WTt: Temps de mouillage de la face supérieure [s]

WTb: Temps de mouillage de la face inférieure [s]

Art: Taux d'absorption de la face supérieure [%/s]

ARb: Taux d'absorption de la face inférieure [%/s]

MWRt: Rayon maximal de la face supérieure mouillée [mm]

MWRb: Rayon maximal de la face inférieure mouillée [mm]

SSt: Vitesse de diffusion de la face supérieure [mm/s]

SSb: Vitesse de diffusion de la face inférieure [mm/s]

AOTI: Indice de transport [%]

OMMC: Capacité globale de gestion d'humidité

### II.3.1. Influence des paramètres structuraux sur le temps de mouillage

Les valeurs moyennes du temps de mouillage de la surface supérieure (WTt) et de la surface inférieure (WTb) de tous les tissus sont présentées dans la Figure IV-10.

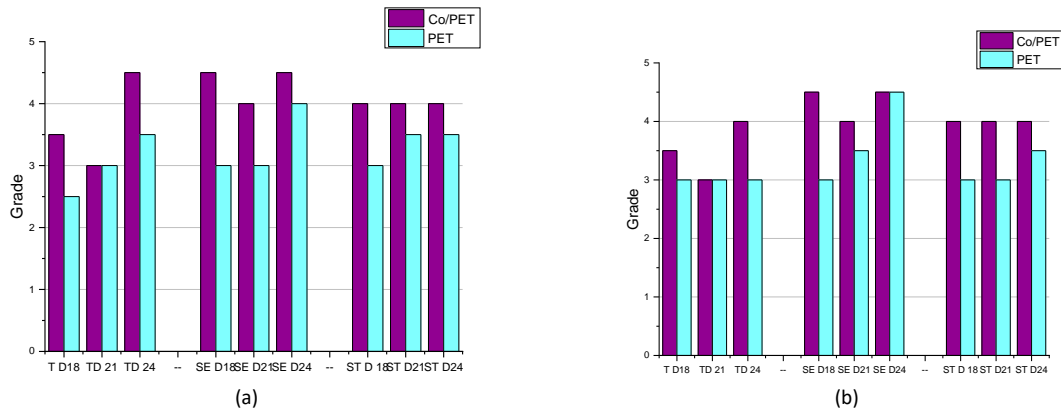


Figure IV-10: Temps de mouillage des différents tissus; (a) la surface supérieure (face envers), (b) la surface inférieure (face endroit)

Pour le satin, les temps de mouillage des deux surfaces supérieure et inférieure ne sont pas influencées par le duitage dans le cas des tissus en Co/PET. Il semble que la longueur des flottés est déterminante, les temps de mouillage étant globalement plus courts pour les tissus en armure toile à cause de l'existence d'un nombre important des interstices entre les points de liage permettant de mieux canaliser les liquides sur une même face et aussi permettant un passage plus facile d'une face à une autre.

Nous constatons que les tissus en Co/PET ont des temps de mouillage et des grades plus élevés que les tissus en 100% PET que ce soit dans la surface supérieure ou la surface inférieure. L'absorption d'humidité du coton est compensée par la présence de longs flottés, ce qui maintient le temps de mouillage constant en dépit de la modification du duitage.

En comparant les tissus en Polyester et ceux en Co/PET, nous constatons que les mélanges améliorent le grade du temps de mouillage pour les différents types de tissus.

Aussi, d'après le Tableau IV-3, la détection de la présence d'eau par les capteurs de la MMT de la surface inférieure est plus rapide dans les tissus en mélange Co/PET. Ceci indique que le transfert unidirectionnel du liquide du haut en bas à travers les tissus en mélange Co/PET est plus rapide. Cependant, le caractère hydrophobe du polyester rend l'absorption de l'humidité de plus en plus lente. En effet et malgré que la fibre de polyester est hydrophobe mais a une surface lisse permettant d'améliorer le transfert capillaire.

### II.3.2. Influence des paramètres structuraux sur le taux d'absorption

La Figure IV-11(a) et la Figure IV-11(b) montrent les moyennes des grades du taux d'absorption de la surface inférieure (ARb) et la surface supérieure (ARt) des différents tissus. Le taux d'absorption présente la capacité de la surface de l'étoffe textile à absorber de l'humidité lors de l'augmentation de la teneur en eau.

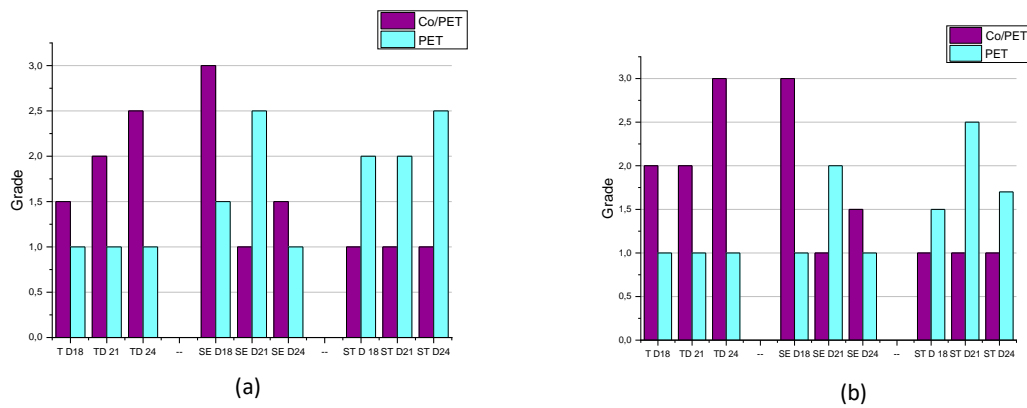


Figure IV-11: Taux d'absorption des différents tissus ; (a) la surface supérieure ( face envers), (b) de la surface inférieure (face endroit)

Nous constatons que l'évolution du grade du taux d'absorption des différents tissus est presque la même sur les deux surfaces supérieure et inférieure. La majorité des tissus ont un moyen taux d'absorption sur la surface supérieure et aussi un moyen taux de séchage sur la surface inférieure. En effet, Les armures toile et sergé composées de mélange Co/PET ont une absorption moyenne alors que celles composées de polyester ont une faible absorption. C'est tout à fait normal que la présence du coton améliore le taux d'absorption. De plus, en contact avec la peau, le tissu en Co/PET va absorber l'humidité contrairement aux tissus en armure satin qui présentent un meilleur taux d'absorption en cas de Polyester sur les deux surfaces. En effet, les flottés au niveau de l'armure satin sont plus linéaires vue que sa surface est plus lisse ce qui présente une valeur tortuosité plus faible et favorise la capillarité.

### II.3.3. Influence des paramètres structuraux sur le rayon maximal de la surface mouillée

La Figure IV-12(a) et la Figure IV-12(b) représentent la moyenne des grades des rayons maximaux, respectivement, de la surface supérieure mouillée et la surface inférieure mouillée des différents tissus étudiés.

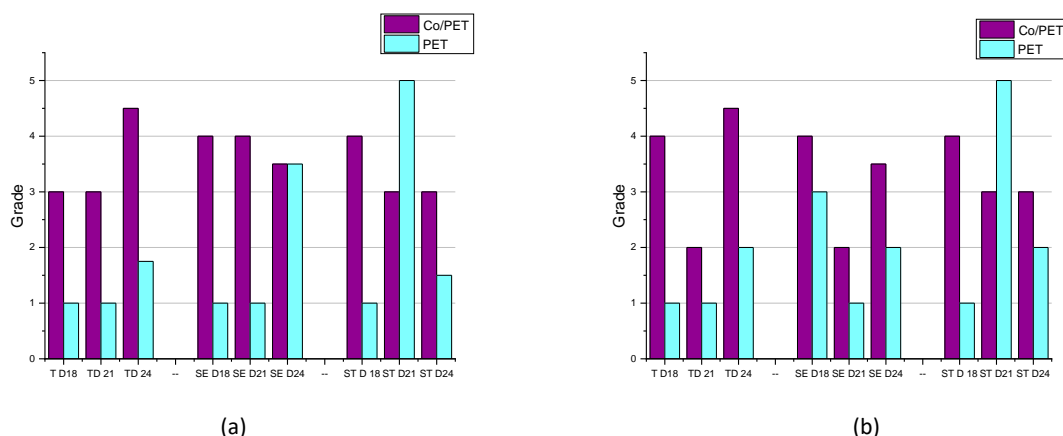


Figure IV-12: Rayon maximal de la surface mouillée; (a) la surface supérieure (face envers), (b) la surface inférieure (face endroit)

Nous constatons que les tissus en mélange Co/PET ont des rayons maximaux des surfaces supérieures et inférieures élevés par rapport aux tissus en polyester. En effet, le taux d'absorption du coton est plus élevé que celui du polyester. Pour l'armure satin, à un duitage de 21 duites/cm avec une trame en polyester, on remarque un rayon maximal plus important



pour les deux faces comparées aux autres structures. Ceci est influencé par la taille des pores : la diffusion capillaire se passe en premier lieu et pour des instants court, avec des faibles distances capillaires dans les macro pores qui serviront comme réservoir pour alimenter les micro pores permettant d'atteindre des distances capillaires plus longues mais avec un temps de transfert capillaire assez long (Benltoufa, 2008). Donc, pour ce cas, l'armure satin, duitage 21 duites/cm et trame en polyester présente un bon équilibre entre les tailles ainsi que la répartition spatiale des pores. Alors que pour un duitage plus serré tel que 24 duites/cm le rayon maximal de la surface mouillée est plus faible. En effet, la fibre de coton en absorbant de l'eau gonfle diamétralement ce qui permet de rétrécir les pores voire même bloquer les canaux capillaires.

### II.3.4. Influence des paramètres structuraux sur la vitesse d'étalement

La Figure IV-13(a) et la Figure IV-13(b) montrent la moyenne des grades des vitesses de diffusion, respectivement, des surfaces supérieures et inférieures des différents tissus.

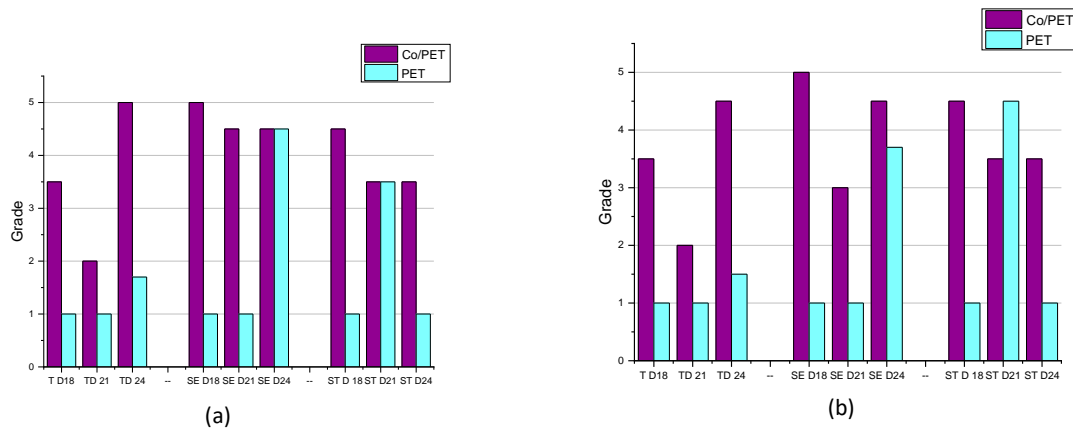


Figure IV-13: Vitesse de diffusion des différents tissus; (a) la surface supérieure (face envers), (b) surface inférieure (face endroit)

La vitesse d'étalement et le rayon maximal de la surface mouillée servent à déterminer et quantifier la vitesse de séchage d'un tissu. Plus l'eau s'étale rapidement en créant une grande superficie de mouillage sur le tissu et plus son séchage est rapide.

Nous constatons que les tissus en Co/PET ont des vitesses de diffusion des surfaces supérieures et inférieures bien élevées et elles sont proches pour toutes les armures.

### II.3.5. Influence des paramètres structuraux sur l'indice du transport unidirectionnel et la capacité totale de gestion d'humidité

La Figure IV-14 et la Figure IV-15 présentent respectivement l'indice du transport unidirectionnel et la capacité totale de gestion d'humidité. Ces deux paramètres sont les plus importants pour évaluer la capacité des étoffes textiles à la gestion d'humidité (Kumar, 2021). Ces deux paramètres sont proportionnellement liés.

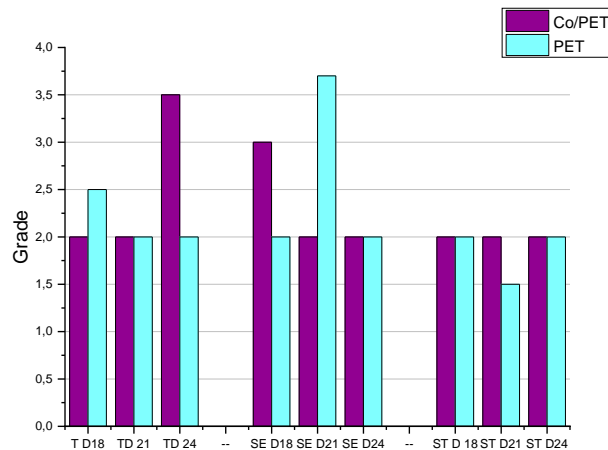


Figure IV-14: Indice de transport unidirectionnel des différents tissus

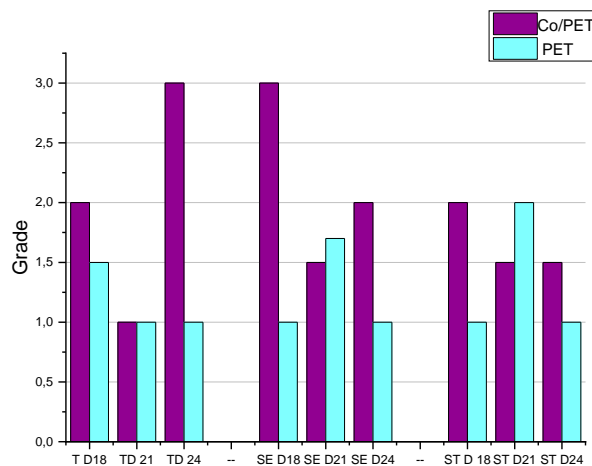


Figure IV-15: La capacité totale de gestion d'humidité des différents tissus

Nous pouvons constater d'après les résultats présentés dans le Tableau IV-3 que la valeur de (AOTI) des tissus en mélange Co/PET est la plus élevée. Ceci signifie que ce type de tissu peut transférer le liquide du côté supérieur vers le côté inférieur beaucoup plus rapidement que celui en PES. Par conséquent, la sueur peut être transférée facilement et rapidement de la peau vers la surface externe.

En outre, nous constatons que la capacité totale de gestion d'humidité de tous tissus varie de 0,213 à 0,648 pour le tissu en mélange Co/PET et de 0,110 à 0,319 seulement pour le tissu en PET. En effet, l'OMMC est un indice qui nous renseigne sur la capacité globale de l'étoffe à gérer le transport d'humidité (Hu J 2005). Plus sa valeur est élevée, plus la capacité totale de gestion de l'humidité du tissu est importante (Shaid A 2014), (Achour,NS, 2016). Nous pouvons conclure alors que l'ajout d'un pourcentage des fibres de polyester améliore la capacité totale de gestion de l'humidité d'une étoffe mais affaiblie son taux d'absorption.

Ces résultats peuvent être aussi confirmés en comparant les valeurs moyennes de la capacité totale de gestion d'humidité (OMMC) et de l'indice du transport unidirectionnel (AOTI) des différents tissus qui sont présentés dans les figures précédentes. En effet, on remarque que le

tissu en armure toile et duitage 24 en Co/PET et le tissu en armure sergé avec le duitage 18 en Co/PES présentent, à la fois le meilleur (AOTI) et (OMMC).

**II.3.6. Étude des effets principaux des paramètres de structure sur OMMC**

D'après la Figure IV-16, nous constatons que tous la matière un effet sur la capacité globale à la gestion de l'humidité. Les tissus en PET ont la valeur de OMMC la plus faible.

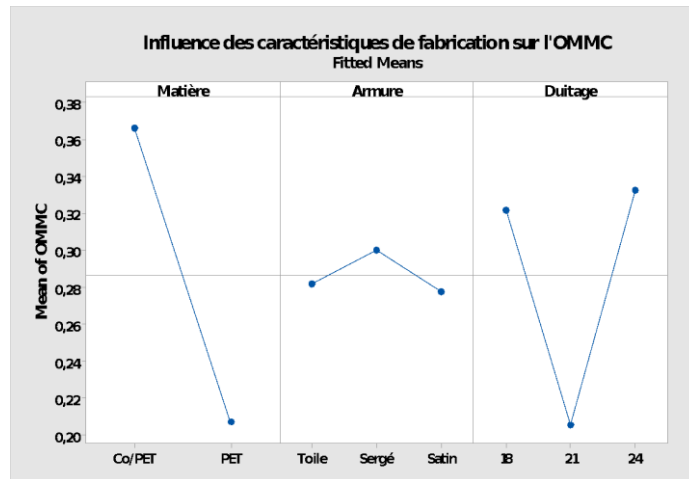


Figure IV-16: Influence des paramètres de structure sur la capacité globale de la gestion d'humidité

L'armure a un léger effet sur OMMC (la variation est très faible entre 0.28 et 0.30). L'effet du duitage n'est pas linéaire. Le duitage 21 a la valeur de OMMC la plus faible. Alors que pour le duitage 18 et 24 les valeurs de OMMC sont très proches.

**II.3.7. Interactions entre OMMC et les paramètres de structure**

La Figure IV-17 présente les interactions des paramètres de structure sur la capacité totale de gestion d'humidité.

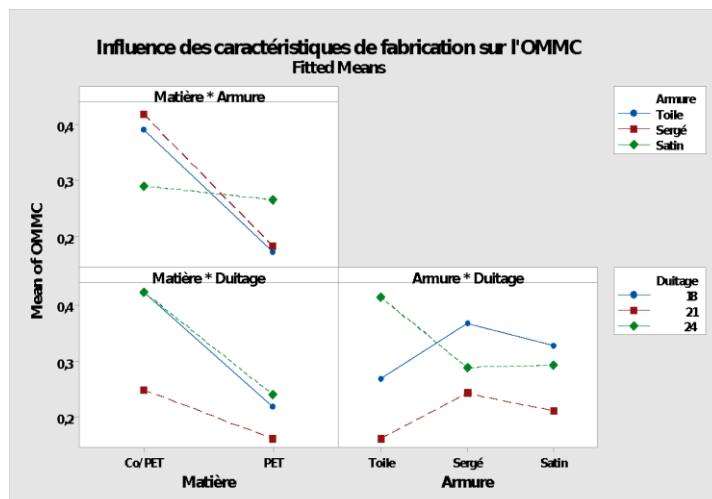


Figure IV-17: Courbes des interactions de la gestion d'humidité

D'après la Figure IV-17, nous constatons qu'il existe une interaction entre « la matière et l'armure » d'une part et entre « l'armure et le duitage » d'autre part. Cependant, il n'y a pas une interaction entre « la matière et le duitage ».

### **Conclusion :**

Dans cette première partie, nous avons essayé d'analyser et de comprendre les effets des paramètres de structures (les entrées) ainsi que leurs interactions sur les paramètres de confort. Les résultats obtenus ont permis de conclure que les paramètres de structure et leurs interactions ont une influence plus ou moins importante sur les paramètres de confort. Cependant, il est difficile d'établir des relations de causes à effets bien définies (facteurs qualitatifs comme l'armure) pour la mise en place de modèles statistiques entre les caractéristiques de confort et les paramètres de structure.

Généralement, selon l'utilisation d'un vêtement et les caractéristiques du confort désirées, il est plus facile et plus pratique de fixer et de modifier les paramètres de fabrication en lieu et place des paramètres de structure. Par exemple, pour obtenir un article confortable et léger, il est recommandé de donner une attention particulière au grammage (masse surfacique) et à l'épaisseur du tissu pour obtenir une résistance à l'évaporation adéquate. C'est pour cette raison que, dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons étudier l'influence des paramètres de structure sur les paramètres de fabrication afin d'identifier des relations de causalité entre ces derniers et les paramètres de confort.

### **III. Relation entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication**

L'objectif de cette partie est l'étude de l'influence des paramètres de structure des tissus sur les paramètres de fabrication.

Le tableau III.4 présente l'ensemble des paramètres de fabrication des échantillons étudiés. Les relations entre ces paramètres de fabrication et les paramètres de structure sont déterminés par la méthode des plans d'expériences.

#### **III.1. Étude des effets principaux des paramètres de structure sur les paramètres de fabrication**

Avant de proposer des modèles correspondant aux relations entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrications, une analyse graphique de la variation de ces derniers est réalisée.

##### **III.1.1. Influence sur le grammage**

En se basant sur la Figure IV-18, nous constatons que le changement de la matière a un effet sur la variation de la masse surfacique. Pour les tissus en Co/PET, la valeur moyenne de la masse surfacique est aux alentours de  $168 \text{ g/m}^2$  alors que pour les tissus en 100% PET, elle est plus faible  $130 \text{ g/m}^2$ , en effet le fils de polyester est plus fin  $18,8 \text{ Tex}$  alors que le mélange Coton/polyester est de  $33,5 \text{ Tex}$ . Le duitage a aussi un effet sur la valeur de la masse surfacique. En effet, l'augmentation du nombre de duites par cm entraîne une augmentation de la masse surfacique. Pour le duitage le plus faible ( $18 \text{ duites/cm}$ ), la masse surfacique est de l'ordre de  $138 \text{ g/m}^2$  et pour le duitage  $24$ , elle est de l'ordre de  $160 \text{ g/m}^2$ . Concernant l'armure, elle n'a pas d'effet significatif sur la variation de la masse surfacique.

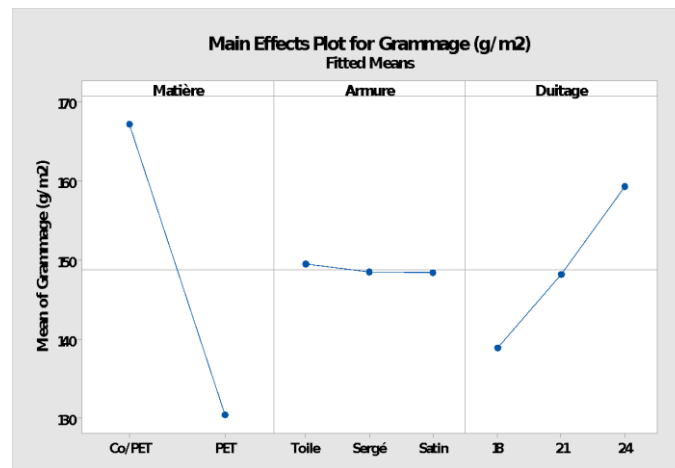


Figure IV-18: Influence des paramètres de structure sur le grammage

### III.1.2. Influence sur l'épaisseur

D'après la Figure IV-19, nous remarquons que la variation de l'épaisseur en fonction de la matière est très faible. Pour les tissus en Co/PET, la valeur moyenne de l'épaisseur est 0,48 mm et pour les tissus en PET cette valeur est de l'ordre de 0,4 mm. L'armure a un effet sur la variation de l'épaisseur. Pour l'armure toile, la valeur moyenne de l'épaisseur est 0,38 mm alors que pour les armure sergé et satin, elle est très proche entre 0,48 et 0,47 mm. Concernant le duitage, il a un faible effet sur la variation de l'épaisseur. Il varie entre 0,45 et 0,43 mm.

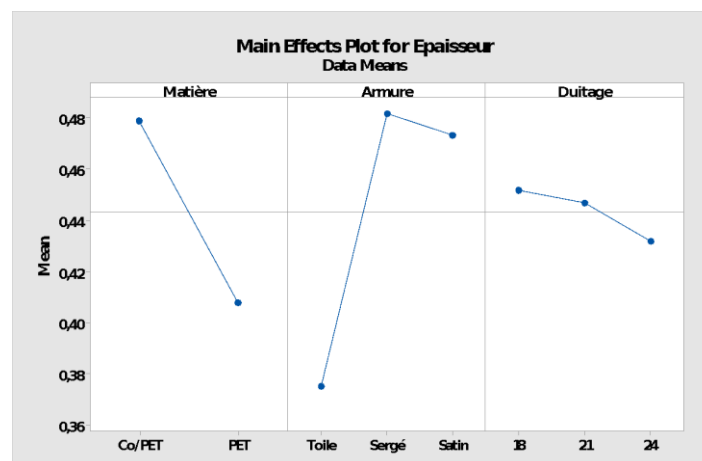


Figure IV-19: Influence des paramètres de structure sur l'épaisseur

### III.1.3. Influence sur l'embuvage et le retrait

L'embuvage et le retrait sont des rétrécissements des fils, respectivement sens chaîne et sens trame

La Figure IV-20(a) montre que la nature de la matière a un faible effet sur l'embuvage. Pour les tissus en Co/PET, la valeur moyenne de l'embuvage est 8% et pour les tissus en PET, l'embuvage est de l'ordre de 6,5%. L'armure a un effet sur la variation de l'embuvage. En effet l'armure toile a la valeur la plus élevée (11%) et pour l'armure sergé et satin, les valeurs sont très proches, respectivement 4,5% et 6%. Concernant le duitage, il n'a pas un grand effet sur la variation de l'embuvage. Pour le duitage 18, la valeur moyenne de l'embuvage est 6% et pour le duitage 21 et 24, l'embuvage est presque le même pour une valeur de 8%.

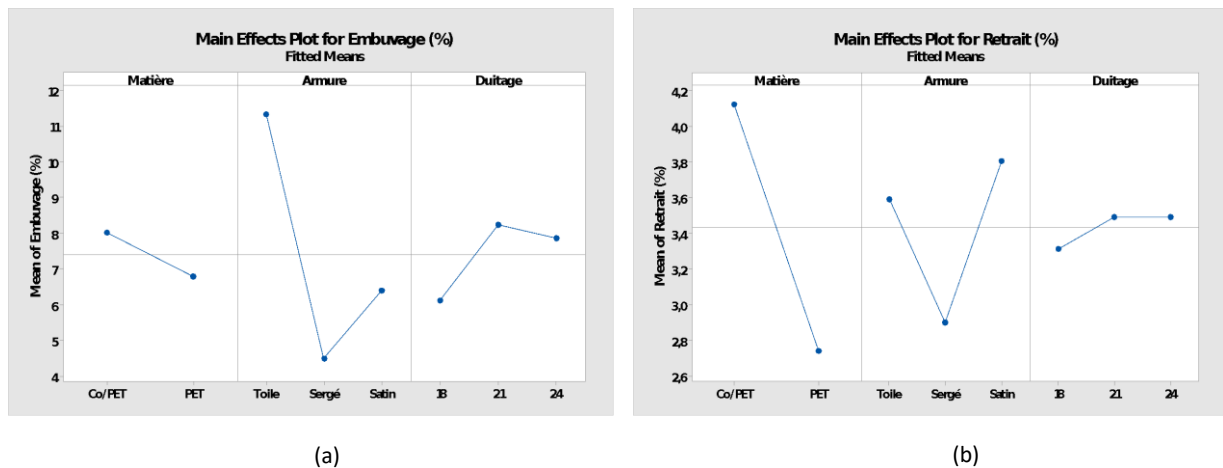


Figure IV-20: Influence des paramètres de structure; (a) sur l'embuage, (b) sur le retrait

D'après la Figure IV-20(b), nous constatons que la matière a un effet sur la variation du retrait. Pour les tissus en Co/PET, la valeur du retrait est 4,1% et pour les tissus en PET, il est de l'ordre de 2,7%. L'armure a aussi un effet sur la variation du retrait. Pour l'armure toile, la valeur du retrait est 3,6%, pour l'armure sergé, elle est 3,1% et pour l'armure satin, elle est 3,8%. Cependant, le duitage n'a pas un grand effet sur la variation du retrait. En effet, avec l'augmentation du duitage, la valeur du retrait augmente légèrement. Pour le duitage 18, le retrait est 3,1% et pour le duitage 21 et 24, il est 3,5%.

#### III.1.4. Influence sur le facteur de couverture

D'après la Figure IV-21, la matière n'a pas un effet important dans la variation du facteur de couverture.

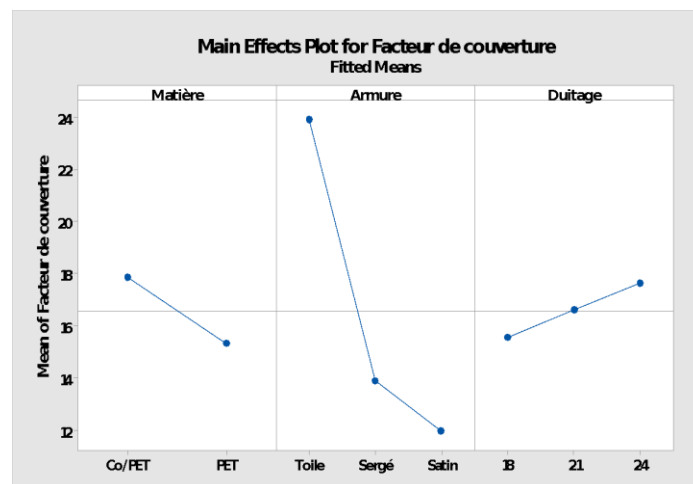


Figure IV-21: Influence des paramètres de structure sur le facteur de couverture

Pour les tissus en Co/PET, la valeur du facteur de couverture est 18 et pour les tissus en PET, elle est de l'ordre de 15. Le duitage n'a pas aussi un grand effet sur la variation du facteur de couverture. Lorsque le duitage augmente, la valeur de facteur de couverture augmente légèrement. Elle passe d'une valeur de 15 pour le duitage 18 vers la valeur de 17 pour le duitage 24. Cependant, l'armure a un effet sur la variation du facteur de couverture. En effet le facteur

de couverture définie la compacité de la structure et l'armure toile est l'armure la plus liée et par la suite elle est la plus compacte.

### III.1.5. Influence sur la porosité

En examinant la Figure IV-22, nous constatons que la matière a un effet sur la variation de la porosité à cause de la variation de la finesse des duites.

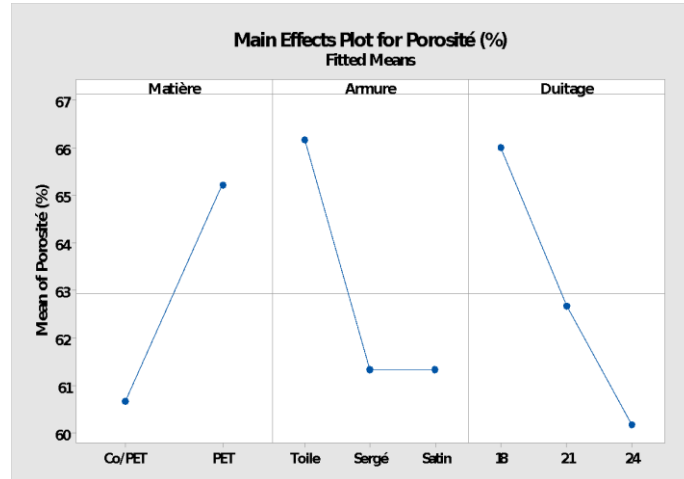


Figure IV-22: Influence des paramètres de structure sur la porosité

Pour les tissus en Co/PET, la porosité est de l'ordre de 60,5 % alors que pour les tissus en PET, elle a une valeur moyenne de 65%. L'armure a aussi un effet sur la variation de la porosité. En effet, l'armure toile a la valeur la plus élevée (66%) et les armures sergé et satin ont la même valeur de porosité (61%). Le duitage a un effet important, tel que en augmentant le duitage la porosité diminue. Pour le duitage 18 la valeur de porosité est 66% et pour le duitage 24, la porosité est de l'ordre de 60,3%.

### III.1.6. Influence sur la tortuosité

La Figure IV-23 présente l'influence des paramètres de structure sur la tortuosité. En se basant sur la Figure IV-23 nous constatons que la matière et le duitage ont un très faible effet sur la variation de la tortuosité.

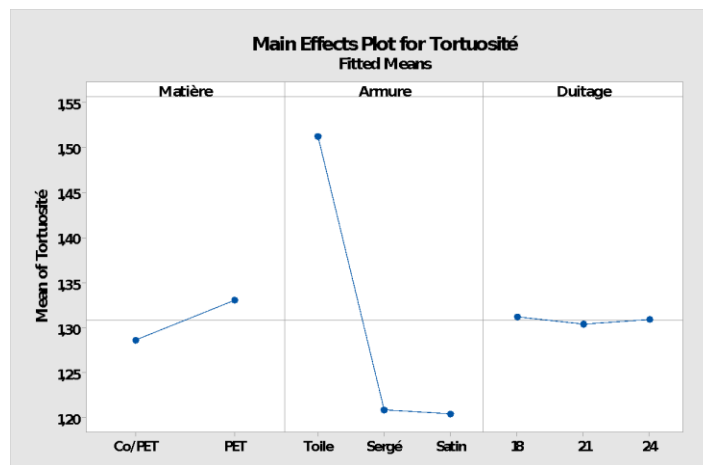


Figure IV-23: Influence des paramètres de structure sur la tortuosité

Cependant, l'armure a un effet sur la tortuosité. En effet, pour l'armure toile, la valeur de tortuosité est 1,5 alors que pour les armure sergé et satin, elle est de l'ordre de 1,2. En effet, les fils de chaîne et de trame sont plus ondulés dans le cas de l'armure toile.

### III.2. Interaction entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication

L'étude des interactions va nous permettre de déterminer l'existence ou non des interactions entre les paramètres d'entrées (paramètres de structure) et les sorties (paramètres de fabrication).

Les figures IV-24 et IV-25 présentent les différents diagrammes d'interaction entre les paramètres de structures.

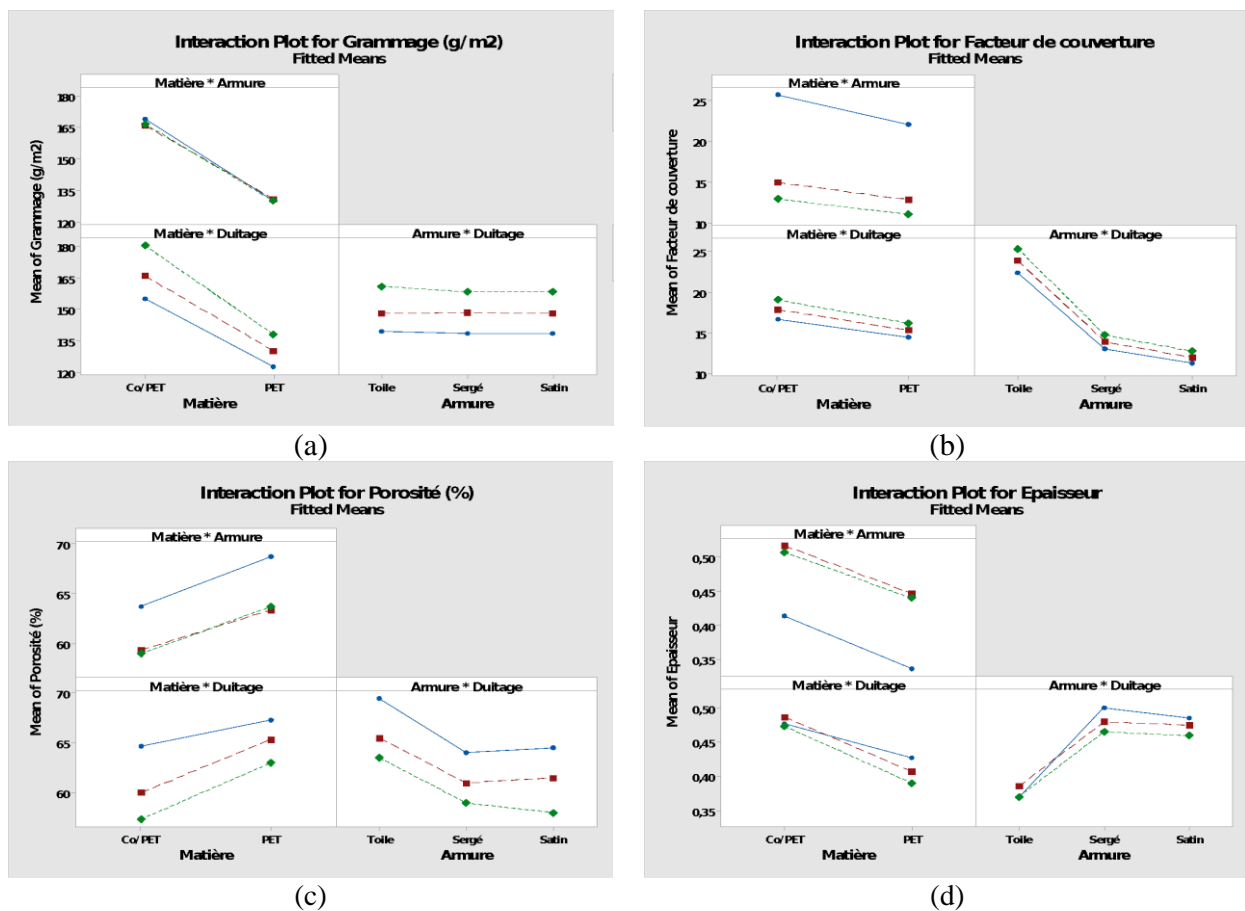


Figure IV-24: Courbes d'interactions (a) du grammage (b) du facteur de couverture (c) de la porosité (d) de l'épaisseur

La figure IV-24 présente les diagrammes d'interactions dans le cas de la masse surfacique, du facteur de couverture, de l'épaisseur et de la porosité. Ces diagrammes montrent l'inexistence d'interactions entre les différents paramètres.

Cependant, dans la figure IV-25 qui regroupe les diagrammes d'interactions dans les cas d'embuvage, de retrait et de la tortuosité, nous remarquons l'existence d'interactions entre l'armure et le duitage dans les cas d'embuvage et de retrait. Alors que l'interaction existe entre la matière et l'armure dans le cas de la tortuosité. Cette dernière n'est pas assez importante dans notre cas et elle peut être négligée.



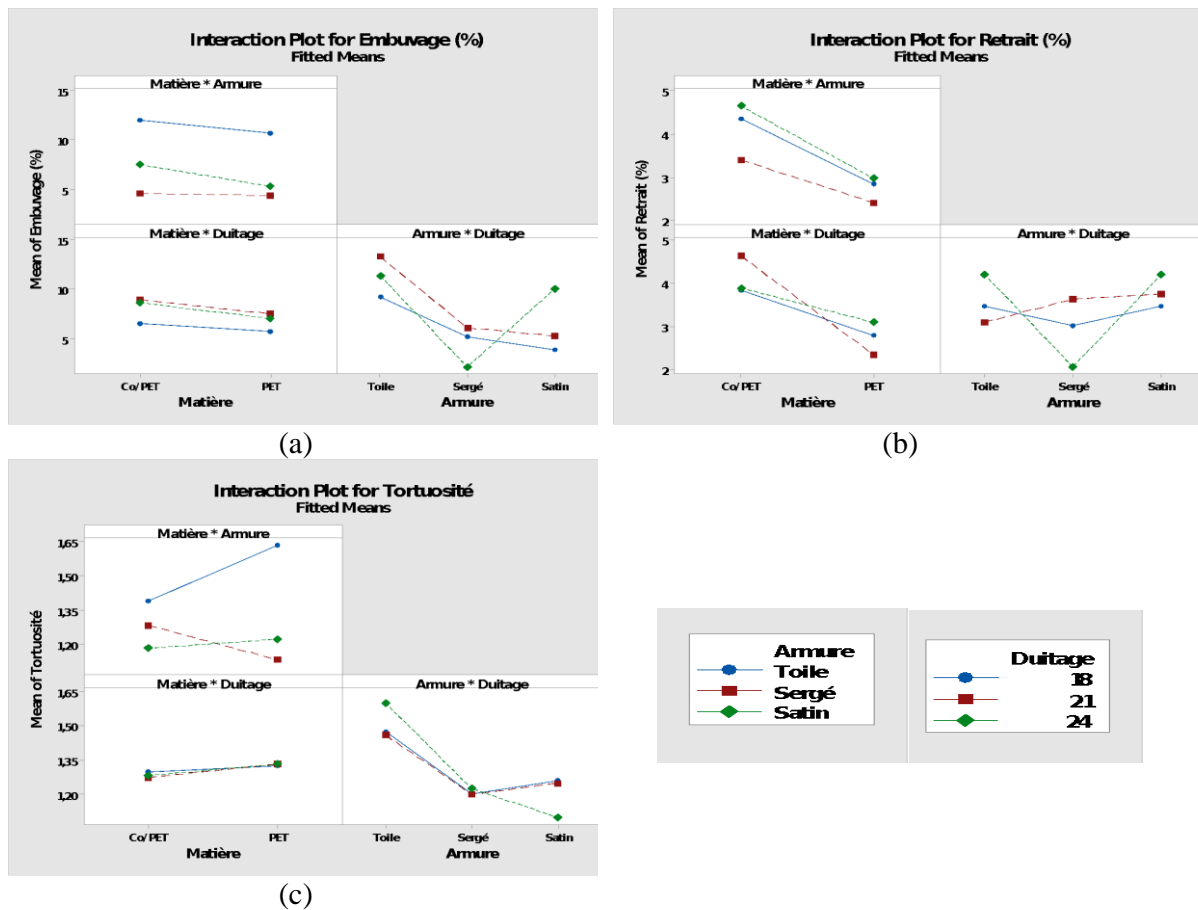


Figure IV-25: Courbes d'interactions (a) de l'embuage (b) du retrait (c) de la tortuosité

Pour conclure, d'après les différentes courbes obtenues, nous constatons que :

- La variation des paramètres de fabrication entraîne des variations des paramètres de structure par conséquent des paramètres de confort.
- Les interactions qui existent entre les différents facteurs n'ont pas une signification statistique très importante comparées aux effets principaux.

La table d'analyse de la variance est présentée ci-dessous. Elle permet de vérifier l'importance de l'influence des paramètres de structure dans la détermination des paramètres de fabrication

Tableau IV-4 : Table d'analyse de la variance

	Matière		Armure		Duitage	
	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value	F-Value	P-Value
<b>Grammage</b>	619,24	0.000	0.24	0,789	63.92	0.000
<b>Épaisseur</b>	118.15	0.000	109,64	0.000	3,38	0,069
<b>Facteur de couverture</b>	77.57	0.000	649,39	0.000	16.67	0.000
<b>Embuage</b>	1.3	0,276	13,93	0.001	1,42	0,279
<b>Retrait</b>	11,19	0,006	1,75	0,215	0,08	0,923
<b>Porosité</b>	0.48	0.504	10.01	0.003	0.01	0.994
<b>Tortuosité</b>	86,43	0.000	43,91	0.000	53,90	0.000

Les résultats obtenus par la méthode de l'analyse de la variance permettent de conclure que les paramètres de fabrication sont dépendants par au moins deux paramètres de structure. La relations de cause à effet, entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication, est statistiquement établi.

A partir de cette conclusion, nous pouvons étudier d'une manière indirecte, à partir de la méthode des plans d'expériences, l'influence des paramètres de fabrication sur les paramètres de confort.

Les effets des paramètres de fabrication sur les paramètres de confort sont présentés dans la figure suivante.

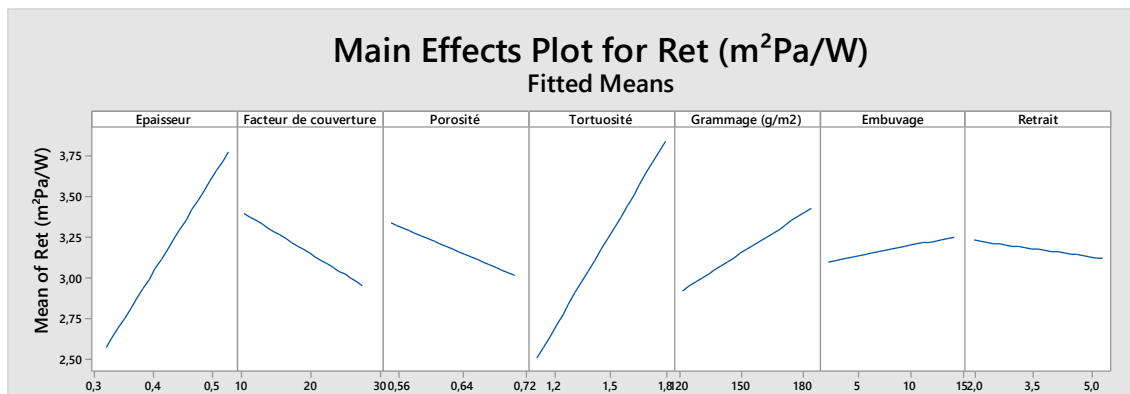


Figure IV-26: Diagrammes des effets principaux de la résistance à la vapeur d'eau Ret

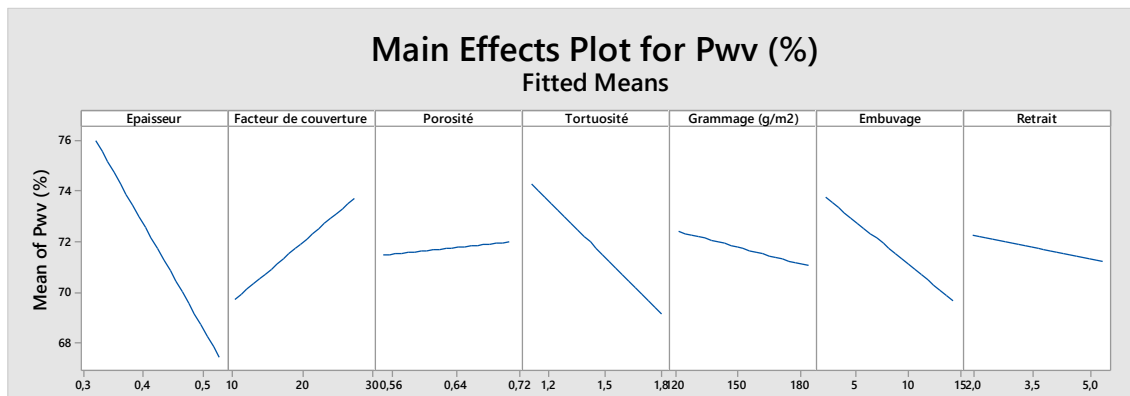


Figure IV-27: Diagrammes des effets principaux de la perméabilité à la vapeur d'eau Pwv

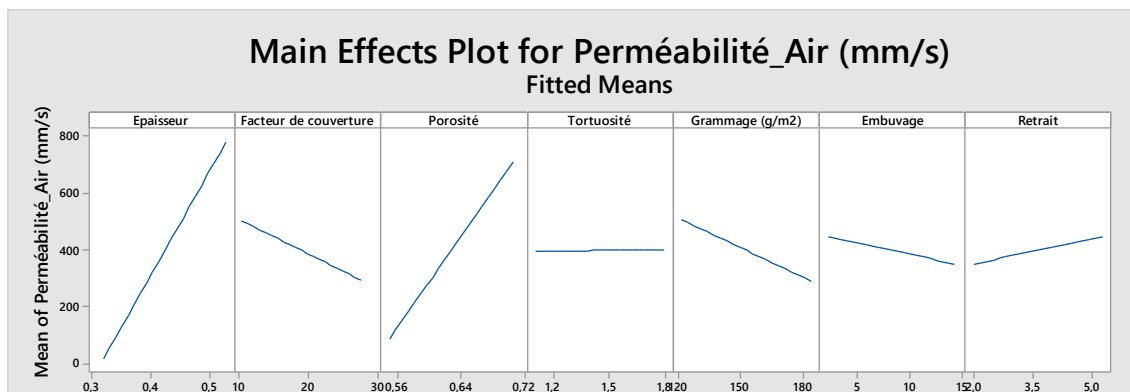


Figure IV-28: Diagrammes des effets principaux de la perméabilité à l'air

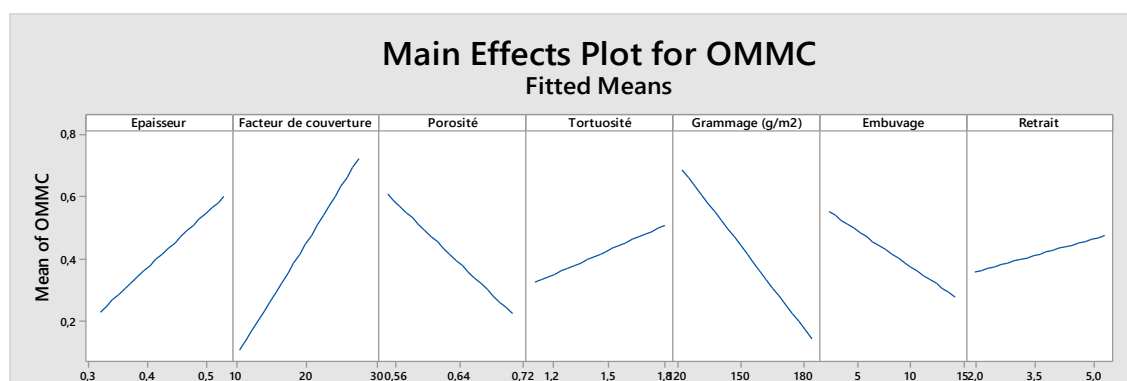


Figure IV-29: Diagrammes des effets principaux de la capacité globale de gestion d'humidité (OMMC)

Les résultats présentés dans la figure montrent que les paramètres de fabrication ont des effets plus ou moins important sur les paramètres de confort. Ce qui met en évidence l'existence des relations entre les paramètres de structure et les paramètres de confort.

Les équations de régression linéaire pour la perméabilité à l'air, la résistance à l'évaporation, la perméabilité relative à la vapeur d'eau et la capacité globale de gestion d'humidité sont présentées dans le Tableau IV-5:

Tableau IV-5: Équations de régression linéaire des paramètres du confort hydrique

Paramètres	Modèle de régression multilinéaire	R <sup>2</sup> (%)
<b>Perméabilité à l'air</b>	$Perméabilité \ à \ l'air = -2920 - 3,43 \text{ Grammage} + 3642 \text{ Epaisseur} - 12,13 \text{ Facteur de couverture} + 3941 \text{ Porosité} + 10 \text{ Tortuosité} - 7,79 \text{ Embuvage} + 28,3 \text{ Retrait}$	97,80
<b>Résistance à l'évaporation</b>	$R_{et} = -1,46 + 0,00800 \text{ Grammage} + 5,745 \text{ Epaisseur} - 0,0258 \text{ Facteur de couverture} - 2,04 \text{ Porosité} + 1,905 \text{ Tortuosité} + 0,0129 \text{ Embuvage} - 0,0932 \text{ Retrait}$	97,26
<b>Perméabilité relative à la vapeur d'eau</b>	$P_{vv} = 100,4 - 0,0216 \text{ Grammage} - 40,8 \text{ Epaisseur} + 0,232 \text{ Facteur de couverture} + 3,2 \text{ Porosité} - 7,29 \text{ Tortuosité} - 0,337 \text{ Embuvage} - 0,310 \text{ Retrait}$	84,78
<b>Capacité globale à la gestion d'humidité</b>	$OMMC = 1,5 - 0,00857 \text{ Grammage} + 1,76 \text{ Epaisseur} + 0,0359 \text{ Facteur de couverture} - 2,43 \text{ Porosité} + 0,260 \text{ Tortuosité} - 0,0224 \text{ Embuvage} + 0,0346 \text{ Retrait}$	24,27

L'analyse des équations de régression linéaire, nous permet de constater que :

- Le coefficient de corrélation de la résistance à l'évaporation, de la perméabilité à l'air et de la perméabilité relative à la vapeur d'eau sont élevés. Ils sont respectivement égaux à (97,26%, 97,8% et 84,78%). Les modèles de régression obtenus sont donc significatifs.
- Nous constatons que l'importance des paramètres de fabrication varient d'un paramètre de confort à l'autre. Le tableau IV-5 présente les résultats de l'analyse de la variance de chacun de ces paramètres.

- Le coefficient de corrélation de la capacité globale à la gestion d'humidité (OMMC) est trop faible (24,27%). Ce résultat signifie que la dépendance entre les facteurs d'entrées et de sorties est trop faible et que le modèle obtenu ne peut pas être retenu.

En conclusion, les modèles obtenus à part celui de la capacité de gestion de l'humidité expliquent les relations entre les paramètres de fabrication et les paramètres de confort hydrique et que ces modèles peuvent être retenus pour prédire les valeurs des sorties en fonction des valeurs des entrées.

Afin de chercher, pour chacune des réponses, l'intervalle de variation des paramètres d'entrée (optimisation), nous avons utilisé la méthode des surfaces de réponse qui a permis d'obtenir les résultats présentés dans le paragraphe suivant.

### **III.3. Optimisation des paramètres de confort**

Les graphiques de contour de surface permettent d'étudier les réponses en fonction des paramètres de fabrication. Ils représentent la surface de réponse avec une vue à deux dimensions où les points ayant la même réponse sont reliés pour produire des lignes de contour de réponses constantes, ce qui nous donne des intervalles de réponses qui varient selon les conditions d'exploitation. Nous pouvons prévoir par les surfaces de réponse les paramètres de confort désirés.

#### ***III.3.1. La perméabilité à l'air***

La Figure IV-30 présente le graphique de contour de la perméabilité à l'air en fonction des différents paramètres de fabrication.

Pour la perméabilité à l'air, les valeurs qui peuvent nous intéresser dépendent de l'application du vêtement tout en tenant compte des conditions environnementales (été, hiver). Par exemple, lorsque nous désirons fabriquer un article léger pour l'été, nous nous intéressons aux valeurs de perméabilité à l'air supérieures à 500 (mm/s). D'après la Figure IV-30, ces valeurs se situent dans la zone en vert foncé. La meilleure réponse est obtenue avec une épaisseur de 0.43 mm, un facteur de couverture de 25, une porosité de plus que 67% et un grammage entre 0 et 140 g/m<sup>2</sup>.

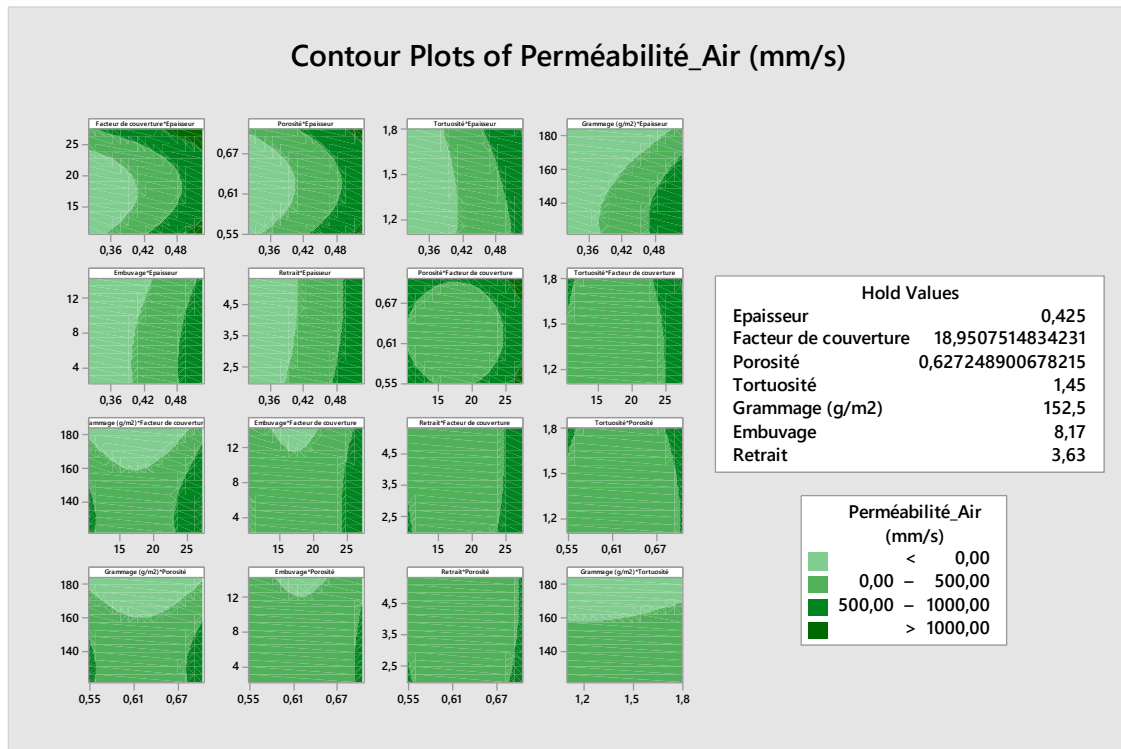


Figure IV-30: Graphique de contour de la perméabilité à l'air

### III.3.2. La résistance à l'évaporation

Le contour de la surface de réponse estimé pour la résistance à l'évaporation en fonction des différents paramètres de fabrication est donné par la Figure IV-31

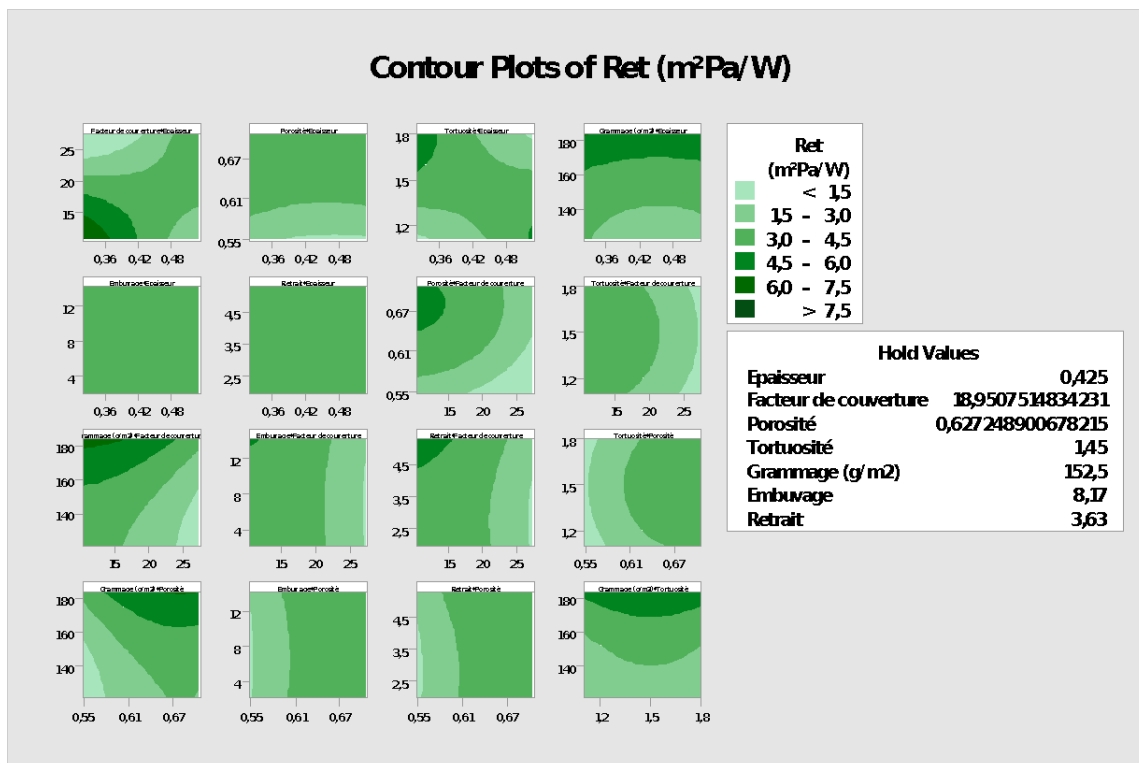


Figure IV-31: Graphique de contour de la résistance à l'évaporation

Pour le graphique de contour de la résistance à l'évaporation  $R_{et}$  et d'après le Tableau III-5, les zones qui présentent les réponses les plus intéressantes, caractérisées par des valeurs de ( $R_{et}$ ) les plus faibles que possible entre 0 et 13. Nous remarquons, dans notre cas d'étude que toutes les ( $R_{et}$ ) sont bien inférieures à 13.

Donc, dans notre cas, la combinaison de tous les paramètres de fabrication donne des valeurs de résistances à l'évaporation parfaites. Tous nos tissus sont jugés des tissus respirant et confortables.

### III.3.3. La perméabilité relative à la vapeur d'eau

La Figure IV-32 présente le graphique de contour de la perméabilité à l'air en fonction des différents paramètres de fabrication.

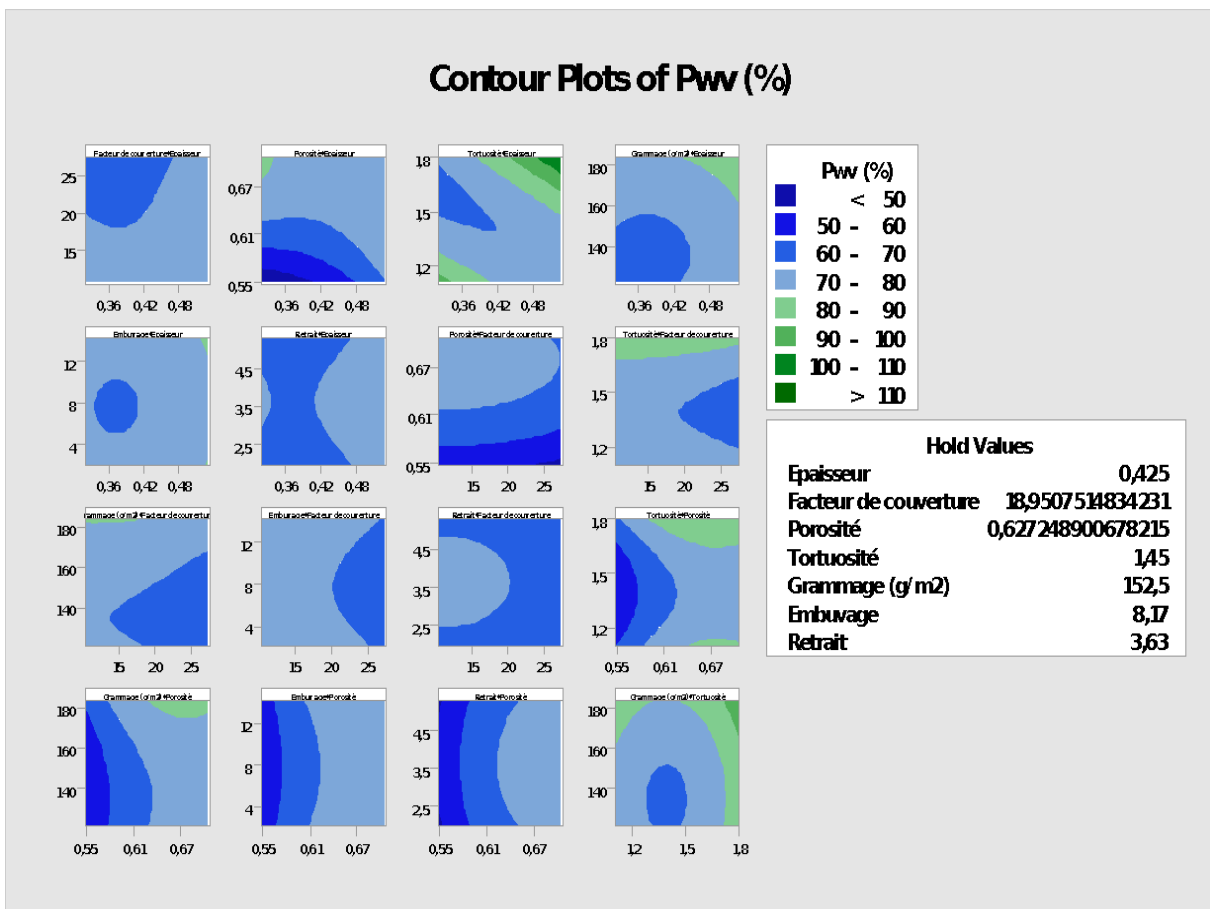


Figure IV-32: Graphique de contour de la perméabilité relative à la vapeur d'eau

La perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) est inversement proportionnelle à la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ). Par conséquent, les zones qui nous intéressent sont les zones où la réponse ( $P_{wv}$ ) est la plus élevée appartenant à l'intervalle entre 70 et 110%. La meilleure réponse est obtenue pour une porosité de 61%.

### III.3.4. La capacité globale à la gestion d'humidité

La Figure IV-33 présente le graphique de contour de la capacité globale à la gestion d'humidité en fonction des différents paramètres de fabrication.

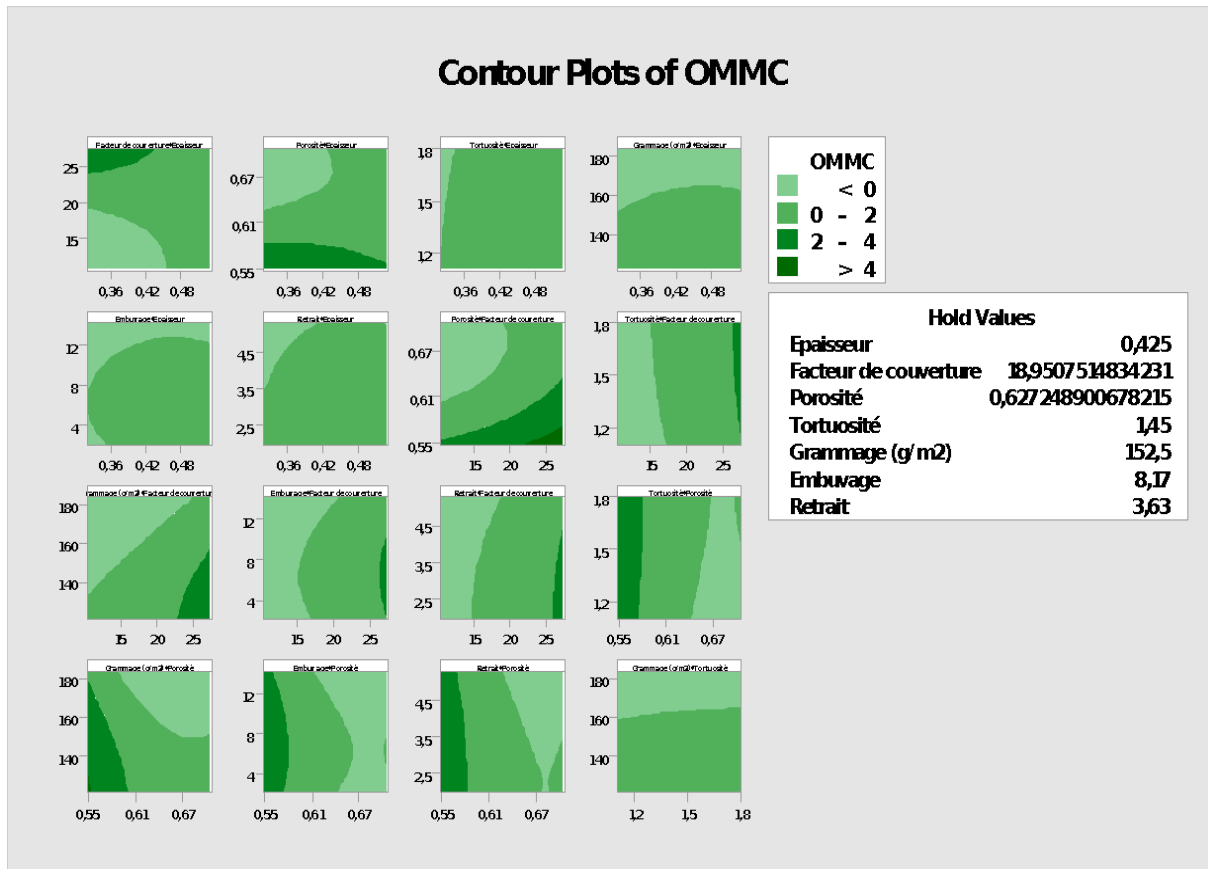


Figure IV-33: Graphique de contour de la capacité globale à la gestion d'humidité

Pour le graphique de contour de OMMC, les zones qui présentent les réponses les plus intéressantes, caractérisées par des valeurs de OMMC les plus élevées, sont les zones colorées en vert foncé.

Certaines valeurs proposées par les graphiques ci-dessus n'appartiennent pas aux intervalles des données dont on dispose. Pour cela, nous avons choisi de présenter dans le paragraphe suivant un exemple de prévision par la fonction optimisation des réponses de MINITAB.

### III.4. Optimisation du confort

Dans cette partie et à partir des résultats trouvés précédemment (analyse de variance, régression linéaire et surface de réponse), on peut prévoir les paramètres de fabrication permettant d'obtenir un textile ayant des caractéristiques de confort donné. Notre objectif est de déterminer la meilleure combinaison des paramètres de fabrication qui mènera à un confort optimal pour notre cas d'étude. Nous avons utilisé la méthode de désirabilité pour optimiser les paramètres de confort. Le logiciel MINITAB nous permet d'estimer les valeurs prédites par la valeur de variant de 0 à 1 avec des valeurs parfaites lorsque  $d=1$  et des valeurs acceptables lorsque  $d>0,7$ .

Dans notre cas, le but était de minimiser la résistance à l'évaporation  $R_{et}$ , de maximiser la perméabilité relative à la vapeur d'eau ( $P_{wv}$ ) et de maximiser la capacité globale à la gestion d'humidité OMMC. Les résultats de l'optimisation sont présentés dans la Figure IV-34.

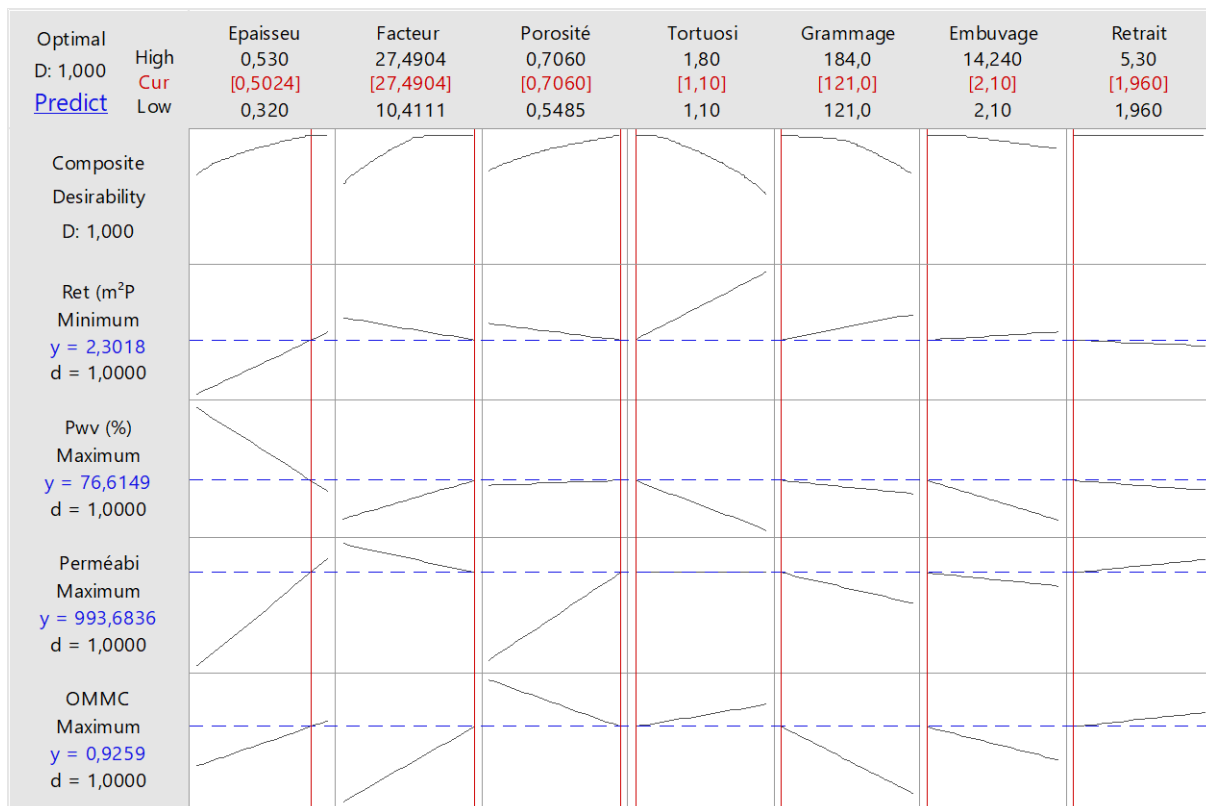


Figure IV-34: Combinaison optimale entre les paramètres de fabrication est les paramètres de confort

D'après la Figure IV-34, les conditions optimales des différents paramètres de fabrication déterminés sont les suivantes une épaisseur de 0,5024 mm, un facteur de couverture de 27,49, une porosité de 70,6%, une tortuosité de 1,1, un grammage  $121\text{g/m}^2$ , un embuvement de 2,1% et un retrait de 1,96%.

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié dans un premier lieu l'effet des paramètres de structure (la composition de la matière, l'armure et le duitage) sur les paramètres de confort. Nous avons remarqué qu'il est difficile de trouver des modèles empiriques reliant ces paramètres de structure aux caractéristiques de confort hydrique. Dans un second lieu, nous avons étudié les relations qui peuvent exister entre les paramètres de structure et les paramètres de fabrication (grammage, épaisseur, porosité, facteur de couverture, tortuosité, embuvement et retrait). L'objectif de cette dernière étude est de façonner des articles textiles à la demande (pour une sensation de confort hydrique bien déterminée, on peut fixer les paramètres de fabrication).

La combinaison des résultats des deux parties précédentes a permis de relier les paramètres de fabrication aux paramètres de confort hydrique sans la nécessité d'effectuer des essais expérimentaux supplémentaires. Cette modélisation nous a permis de prévoir les valeurs du confort hydrique (sorties).



- Les modèles obtenus semblent donner des résultats acceptables sauf pour la sortie OMMC.
- Les modèles retenus sont définis dans les plages de variations des paramètres de structure de la base de données étudiée (18 échantillons seulement).

Dans la suite, nous allons essayer de prévoir les caractéristiques de confort hydriques d'une manière plus générale (étendre la plage de variation des paramètres d'entrée).

## Chapitre V

---

---

# **Modélisation de la diffusion à la vapeur d'eau**

---

---

## Chapitre V: Modélisation de la diffusion à la vapeur d'eau

### I. Introduction

La méthode des plans d'expériences permet d'obtenir des modèles valables uniquement dans la plage de variation des caractéristiques d'entrée. Pour étendre l'étude et afin de déterminer les paramètres de confort hydriques dans des plages plus importantes, nous avons choisi de rechercher des formulations mathématiques reliant les paramètres de fabrication aux paramètres de confort hydrique. Cette partie d'étude représente l'objectif principal de ce chapitre.

Dans une première phase de cette démarche, nous nous sommes intéressés à modéliser la porosité à l'échelle de l'étoffe (échelle macroscopique pour déterminer la macro porosité) et à l'échelle des fibres (échelle microscopique pour déterminer la micro porosité). La deuxième phase de cette démarche est réservée à la modélisation de la résistance à la vapeur d'eau d'une étoffe textile tissée. Nous avons orienté cette recherche vers le développement d'un modèle de diffusion fondé sur la loi de Fick et aussi vers le développement d'un autre modèle à partir d'expérimentations selon la norme ISO 11092. Ces deux modèles nous ont permis de suivre l'évolution de la résistance à l'évaporation en fonction des paramètres de fabrication.

Nous avons enfin clôturé ce chapitre par une étude de cas pour évaluer la diffusion de la vapeur d'eau en cours d'activités.

### II. Modélisation géométrique d'un tissu

D'après le chapitre IV, la porosité et tortuosité sont des deux paramètres influençant sur la diffusion de la vapeur d'eau. Donc et avant de modéliser la diffusion à la vapeur d'eau, on a commencé par la modélisation géométrique de base d'un tissu dans le but de modéliser les deux échelles de la porosité de la structure.

Avant de modéliser la diffusion à la vapeur d'eau, on a commencé par la modélisation géométrique de base d'un tissu.

Une structure textile présente deux échelles de porosité (Benltoufa 2008):

- Porosité entre les fils ( $\epsilon_{\text{macro}}$ ) : macro pores,
- Porosité entre les fibres ( $\epsilon_{\text{micro}}$ ) : micro pores.

En effet, la porosité est le rapport entre le volume des vides et le volume apparent du milieu poreux (Bories 1995). Elle est présentée par l'équation suivante :

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_T} \tag{V-1}$$

Avec:

- $V_a$  : le volume des pores accessibles pour faire passer un fluide,
- $V_T$  : le volume total du milieu poreux.

## II.1. La Macro porosité

La Figure V-1 présente le motif élémentaire répétitif que la modélisation géométrique en sera base. La distance entre deux fils de chaîne est  $\frac{1}{Ch}$  et la distance entre deux fils de trame est  $\frac{1}{Du}$ .

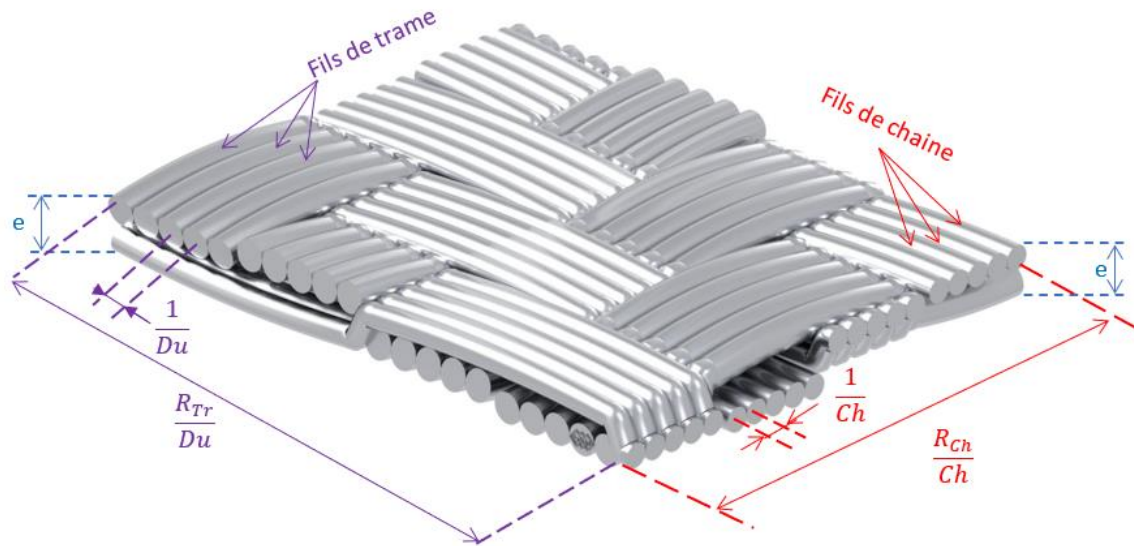


Figure V-1: Motif élémentaire répétitif

Avec :

- Ch : le compte en chaîne,
- Du : le compte en trame (duitage),
- e : l'épaisseur [m],
- R<sub>Tr</sub> : le rapport en trame,
- R<sub>Ch</sub> : le rapport en chaîne,
- $\frac{R_{Tr}}{Du}$  : le rapport d'armure en trame,
- $\frac{R_{Ch}}{Ch}$  : le rapport d'armure en chaîne,
- r(%) : Rétrécissement sens trame (retrait),
- e<sub>m</sub>(%) : Rétrécissement sens chaîne (embuvage).

A l'échelle de la structure (échelle des macro pores), la porosité est exprimée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{macro} = 1 - \frac{V_F}{V_T} \quad (V-2)$$

Nous supposons que les fils sont cylindriques. Ainsi, les volumes des fils chaînes ( $V_{F\_Ch}$ ) et des fils trames ( $V_{F\_Tr}$ ) dans le motif élémentaire sont respectivement comme suit :

$$V_{fil\_Ch} = \frac{\pi}{4} d_{F\_Ch}^2 l_{F\_Ch} n_{F\_Ch} \quad (V-3)$$

$$V_{fil\_Tr} = \frac{\pi}{4} d_{F\_Tr}^2 l_{F\_Tr} n_{F\_Tr} \quad (V-4)$$

Avec :

- $d_{F\_Ch}$  et  $d_{F\_Tr}$  : respectivement le diamètre moyen du fil chaîne et le diamètre moyen du fil trame,
- $l_{F\_Ch}$  et  $l_{F\_Tr}$  : respectivement la longueur du fil chaîne et la longueur du fil trame dans le motif élémentaire,
- $n_{F\_Ch}$  et  $n_{F\_Tr}$  : respectivement le nombre total des fils de chaîne et le nombre total des fils de trame.

Notons que dans un rapport d'armure on a :

$$n_{F\_Ch} = R_{Ch} \text{ et } n_{F\_Tr} = R_{Tr}$$

Donc,

$$V_{fil\_Ch} = \frac{\pi}{4} d_{F\_Ch}^2 \frac{R_{Tr}}{Du} \left(1 + \frac{e_m(\%)}{100}\right) R_{Ch} \quad (V-5)$$

De même,

$$V_{fil\_Tr} = \frac{\pi}{4} d_{F\_Tr}^2 \frac{R_{Ch}}{Ch} \left(1 + \frac{r(\%)}{100}\right) R_{Tr} \quad (V-6)$$

Donc le volume des fils de chaîne et des fils de trame est :

$$V_F = \frac{\pi}{4} R_{Ch} R_{Tr} \left[ \frac{d_{F\_Ch}^2}{Du} \left(1 + \frac{e_m(\%)}{100}\right) + \frac{d_{F\_Tr}^2}{Ch} \left(1 + \frac{r(\%)}{100}\right) \right] \quad (V-7)$$

Le volume total du motif élémentaire du tissu ( $V_T$ ) est :

$$V_T = \frac{R_{Ch} R_{Tr} e}{Du Ch} \quad (V-8)$$

Donc la macro porosité est définie par :

$$\varepsilon_{macro} = 1 - \frac{\frac{\pi}{4} \left[ d_{F\_Ch}^2 Ch \left(1 + \frac{e_m(\%)}{100}\right) + d_{F\_Tr}^2 Du \left(1 + \frac{r(\%)}{100}\right) \right]}{e} \quad (V-9)$$

Nous pouvons déduire que la macro porosité n'est pas fonction du rapport d'armure. Mais, elle est fonction de la compacité de la structure, c'est-à-dire les diamètres des fils de chaînes et des

duites, embuvage, retrait et aussi de l'épaisseur. Elle est inversement proportionnelle à  $d_{F\_Ch}$ ,  $d_{F\_Tr}$ , compte en chaîne, duitage, retrait et embuvage, mais proportionnelle à l'épaisseur.

## II.2. La micro porosité

En raisonnant sur le motif élémentaire, et à l'échelle du fil (échelle des micro pores), la micro porosité est exprimée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{micro} = 1 - \frac{V_{ns\_fibres}}{V_F} \quad (V-10)$$

Dans un fil, le volume moyen de  $n_s$  fibres à la section ( $V_{ns\_fibres}$ ) est :

$$V_{ns\_fibres} = n_s \frac{\pi}{4} d_{fibre}^2 l_F \quad (V-11)$$

Avec :

- $l_F$  : longueur d'un fil,
- $n_s$  : nombre moyen des fibres à la section.

Dans le cas d'un mélange de fibres, le volume moyen de  $n_s$  fibres à la section ( $V_{ns\_m\_fibres}$ ) devient de la forme :

$$V_{ns\_m\_fibres} = \left( \sum n_{si} \frac{\pi}{4} d_{fibre,i}^2 \right) l_F \quad (V-12)$$

Avec :

- $n_{si}$  : nombre de fibres de type (i) dans la section.

Dans un motif élémentaire d'un tissu de rapport en chaîne  $R_{Ch}$  et de rapport en trame  $R_{Tr}$ , le volume total des fibres est comme suit ::

$$V_{ns\_fibres} = V_{ns\_Ch} + V_{ns\_Tr} \quad (V-13)$$

$$= \frac{\pi}{4} \left[ n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2 \frac{R_{Tr} R_{Ch}}{Du} \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right) + n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2 \frac{R_{Ch} R_{Tr}}{Ch} \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right) \right] \quad (V-14)$$

$$= \frac{\pi}{4} R_{Tr} R_{Ch} \left[ \frac{n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2}{Du} \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right) + \frac{n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2}{Ch} \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right) \right] \quad (V-15)$$

Donc,

$$\varepsilon_{micro} = 1 - \frac{\frac{\pi}{4} R_{Tr} R_{Ch} \left[ \frac{n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2 \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)}{Du} + \frac{n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2 \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)}{Ch} \right]}{\frac{\pi}{4} R_{Ch} R_{Tr} \left[ \frac{d_{F-Ch}^2 \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)}{Du} + \frac{d_{F-Tr}^2 \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)}{Ch} \right]} \quad (V-16)$$

$$= 1 - \frac{\frac{\pi}{4} R_{Tr} R_{Ch} \left[ \frac{n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2 \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)}{Du} + \frac{n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2 \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)}{Ch} \right]}{\frac{\pi}{4} R_{Ch} R_{Tr} \left[ \frac{d_{F-Ch}^2 \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)}{Du} + \frac{d_{F-Tr}^2 \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)}{Ch} \right]} \quad (V-17)$$

$$= 1 - \frac{n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2 Ch \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right) + n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2 Du \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)}{d_{F-Ch}^2 Ch \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right) + d_{F-Tr}^2 Du \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)} \quad (V-18)$$

Ainsi,

$$\varepsilon_{micro} = 1 - \frac{a n_{s,Ch} d_{fibre,Ch}^2 + b n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2}{a d_{F-Ch}^2 + b d_{F-Tr}^2} \quad (V-19)$$

Avec :

$$a = Ch \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)$$

$$b = Du \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)$$

Afin de simplifier le calcul théorique, et comme cité précédemment, nous avons supposé que les fils sont cylindriques. Mais, la distribution de la taille des pores dans ces fils est variable. Il est difficile d'estimer la porosité des tissus en calculant les dimensions des pores et le diamètre du fil. En fait, dans la structure du tissu, les fils n'ont pas une surface lisse ni une construction solide car dans la structure intra-fils il y a aussi du vide.

### III. Modélisation de la diffusion à la vapeur d'eau

Tout d'abord, nous allons supposer que la vapeur d'eau passe principalement à travers les pores du tissu par diffusion de l'air d'un côté à l'autre du tissu. Vu la complexité des structures textiles, l'établissement d'une théorie exprimant la perméabilité à la vapeur d'eau d'une étoffe textile est un peu complexe. Pour ce faire, nous avons eu recours à certaines simplifications.

#### III.1. Modèle n°1

Pour modéliser la diffusion à la vapeur d'eau à travers une étoffe textile, la distribution et la taille des pores du tissu doivent être prises en considération.

Dans le processus de diffusion, le gradient de pression de vapeur d'eau agit comme une force motrice dans la transmission de l'humidité d'un côté de tissu à l'autre. La relation entre le flux de vapeur d'eau et le gradient de concentration est établi par la loi de FICK (Sachdeva 2006):

$$J_{Ax} = D \frac{dc_A}{dx} \quad (V-20)$$

Avec :

- $J_{Ax}$ : le taux de flux d'humidité ,
- $\frac{dc_A}{dx}$ : le gradient de concentration,
- $D$  : le coefficient de diffusion [ $m^2s^{-1}$ ].

La vapeur d'eau peut se diffuser à travers une étoffe textile en simple diffusion à travers les pores existant entre les fibres et les fils (Fohr 2002), (Lomax 1985).

A un gradient de concentration spécifique, le taux de diffusion à travers un matériau textile dépend de la porosité du matériau et de la diffusivité de la fibre en vapeur d'eau. La diffusion d'humidité à travers la surface supérieure (aérienne) du tissu est presque instantanée alors que l'humidité peut diffuser inter et intra-fils en raison de la plus faible humidité de diffusion de l'étoffe textile (Kothari 2000).

La diffusion de la vapeur d'eau passe de la région de forte concentration vers la région de faible concentration jusqu'à la stabilisation des concentrations (Gibson 1993).

Plusieurs modèles (Yoon 1984) montrent l'importance des paramètres structuraux des matériaux textiles sur les propriétés de transmission de la vapeur d'eau. La résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) a été décrite en fonction de l'épaisseur ( $e$ ), la porosité ( $\varepsilon$ ) et la diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air ( $D$ ) (Yoon 1984). La résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) est alors présentée comme suit :

$$R_{et} = \frac{e}{(1-\varepsilon) \frac{(D_f / D_a)}{(1-\delta) + \delta(D_f / D_a)} + \varepsilon} \quad (V-21)$$

Avec:

- $D_f$  et  $D_a$ : les coefficients de diffusion de l'humidité, respectivement, dans le tissu et dans l'air
- $\delta$ : la fraction volumique d'air dans le fil.

En cas où le tissu est composé d'un mélange de deux types de fils, la résistance à la vapeur d'eau devient :

$$R_{et} = \frac{e}{(1-\varepsilon) \left\{ (1-\delta)x \left( \frac{D_a}{D_{f_2}} \right) + (1-\delta)(1-x) \left( \frac{D_a}{D_{f_1}} \right) + \delta \right\}^{-1} + \varepsilon} \quad (V-22)$$



Cependant, le rapport  $\left(\frac{D_f}{D_a}\right)$  est généralement négligeable. Il est compris entre  $10^{-6}$  et  $10^{-8}$  (Yoon 1984). Ainsi, après simplifications, les équations (V.21) et (V.22) donnent :

$$R_{et} = \frac{e}{\varepsilon} \quad (V-23)$$

Yoon et Buckley (Yoon 1984), ont démontré dans leurs travaux l'importance des variables de construction sur les caractéristiques de transmission de la vapeur d'eau des tissus. Malgré ceci, selon l'équation V.23, la résistance à la vapeur d'eau ne dépend que de l'épaisseur et de la porosité totale. Alors que plusieurs paramètres peuvent influencer la résistance à la vapeur d'eau tel que la forme, la taille et la répartition des pores. Ajoutons à ceci la nature des fibres hydrophiles ou hydrophobes, etc. En effet, le type de fibre influe la géométrie du tissu, car chaque fibre a sa propre forme. Ce qui explique la variation du taux de transfert de la vapeur d'eau en cas de mélange. La diffusivité de la vapeur d'eau de l'air  $D_{air}$  (vitesse de l'air=0m<sup>2</sup>/s) est d'environ 0,25 cm<sup>2</sup>/s alors que la diffusivité dans le coton est d'environ  $1,25 \cdot 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s ( $\sim 0.05 \times D_{air}$ ) (Hearle, 2008).

Généralement, dans un tissu, les fibres sont perpendiculaires au trajet de la diffusion de la vapeur d'eau alors que les pores inter-fibres contribuent légèrement à la diffusion (Hearle, 2008). La diffusivité des étoffes textiles hydrophiles est d'environ  $10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s, alors que pour les étoffes hydrophobes, elle est d'environ  $10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s. Certains chercheurs (Irandoekht, 2011) ont donc proposé l'équation suivante comme forme réduite de l'équation (V.21) :

$$R_{et} = \frac{e}{D\varepsilon} \quad (V-24)$$

La diffusion de la vapeur d'eau dépend fortement de la perméabilité à l'air du tissu, qui passe principalement par les pores (Yoon, 1984). La perméabilité à l'air augmente à mesure que la porosité du tissu augmente ; ce qui entraîne également un transfert d'humidité plus élevé à travers les espaces d'air dans le tissu.

La diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air peut être donnée en fonction de la température et de la pression (Das, 2007). Elle est représentée dans l'équation (V.25):

$$D = 2.20 \times 10^{-5} \left[ \frac{T}{T_0} \right]^2 \left[ \frac{P_0}{P_{vap}} \right] \quad (V-25)$$

Avec:

- D: la diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air [m<sup>2</sup>/s],
- T: la température absolue[K],
- T<sub>0</sub>: la température standard de 273.15 K,
- P<sub>vap</sub>: la pression partielle de la vapeur d'eau [Pa],
- P<sub>0</sub> est la pression atmosphérique au sol [Pa].

Plusieurs chercheurs ont étudié l'influence de la température sur la résistance à l'évaporation (Fukazawa 1999), (Ruckman 1997), (Gibson 2000). Ils rapportent que la résistance à l'évaporation des vêtements dépend de la variation de la température. Cependant, il a été révélé

que l'effet de la pression sur la résistance à l'évaporation était plus important que celui de la température car le taux de transfert de la vapeur d'eau dépend du gradient de concentration de la vapeur d'eau et du coefficient de diffusion de l'étoffe. Par conséquent, l'effet de la température et de la pression doit être pris en compte lors de la conception d'un vêtement surtout ceux destinés pour les sports de haute performance dans les hautes altitudes parce que le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dépend de la température et de la pression.

D'après les équations V.24 et V.25, la résistance à l'évaporation est comme suit :

$$R_{et} = \frac{e \times 10^5}{2.20 \left[ \frac{T}{T_0} \right]^2 \left[ \frac{P_0}{P_{vap}} \right]} \quad (V-26)$$

Étant donné que la vapeur d'eau se diffuse suivant des trajectoires non rectilignes à travers les pores jusqu'à l'intérieur du tissu, il est alors conclu que la résistance à l'évaporation est fonction de la tortuosité  $\xi$  et l'épaisseur comme le montre l'équation suivante :

$$R_{et} = \frac{e \times 10^5 \times \xi}{2.20 \left[ \frac{T}{T_0} \right]^2 \left[ \frac{P_0}{P_{vap}} \right]} \quad (V-27)$$

La pression partielle de la vapeur d'eau peut être calculée en utilisant la relation suivante :

$$HR\% = 100 \frac{P_{vap}}{P_{sat}} \quad (V-28)$$

Et par la suite, l'équation (V.27) devient :

$$R_{et} = \frac{e \times \xi}{\varepsilon \times \varepsilon_{micro}} \times \frac{10^5 \times HR \times P_{sat}}{2,20 \left[ \frac{T}{T_0} \right] \times P_0} \quad (V-29)$$

En remplaçant la porosité totale (Équation V.9) et la micro porosité (Équation V.19) dans l'équation (V-29), on obtient la formule suivante :

$$R_{et} = \frac{e \times \xi}{\frac{e - \frac{\pi}{4} [a d_{F\_ch}^2 + b d_{F\_Tr}^2]}{e} \times 1 - \frac{a n_{s,ch} d_{fibre,ch}^2 + a n_{s,Tr} d_{fibre,Tr}^2}{a d_{F\_ch}^2 + b d_{F\_Tr}^2}} \times \frac{10^5 HR P_{sat}}{2,20 \left[ \frac{T}{T_0} \right] P_0} \quad (V-30)$$

Avec :

$$a = Ch \left( 1 + \frac{e_m(\%)}{100} \right)$$

$$b = Du \left( 1 + \frac{r(\%)}{100} \right)$$

Comme le montre l'équation (V.30), le modèle nous a donné une expression de la résistance à l'évaporation ( $R_{et}$ ) fonction d'une part des paramètres physiques et géométriques tels que l'épaisseur, la tortuosité et la porosité (dans les macro et micro pores) et d'autre part des paramètres liés aux conditions de mesure tels que l'humidité relative, la température, etc.

Pour rendre un vêtement plus confortable et perméable à la vapeur d'eau, il faut diminuer la résistance à l'évaporation. Pour se faire, on peut agir sur les paramètres physiques et géométriques en diminuant l'épaisseur et la tortuosité ou en augmentant la porosité.

En relation avec le chapitre IV (tableau IV-5), nous pouvons confirmer que l'épaisseur, la porosité et la tortuosité ont plus d'influence sur la résistance à l'évaporation comme le montre l'équation V-30.

Après avoir calculé la porosité selon les équations (V.9) et (V.19) ainsi que la résistance à l'évaporation selon l'équation (V.30), on a déterminé les valeurs théoriques de la résistance à l'évaporation.

La Figure V-2 présente les résistances à l'évaporation théoriques en fonction de celles expérimentales. Cette figure montre l'existence d'une corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de la résistance à l'évaporation. La courbe de tendance obtenue admet pour coefficient de corrélation  $R^2=0,9457$  cela signifie qu'il existe un accord entre les valeurs déterminées expérimentalement et celles prédites théoriquement par le modèle n°1.

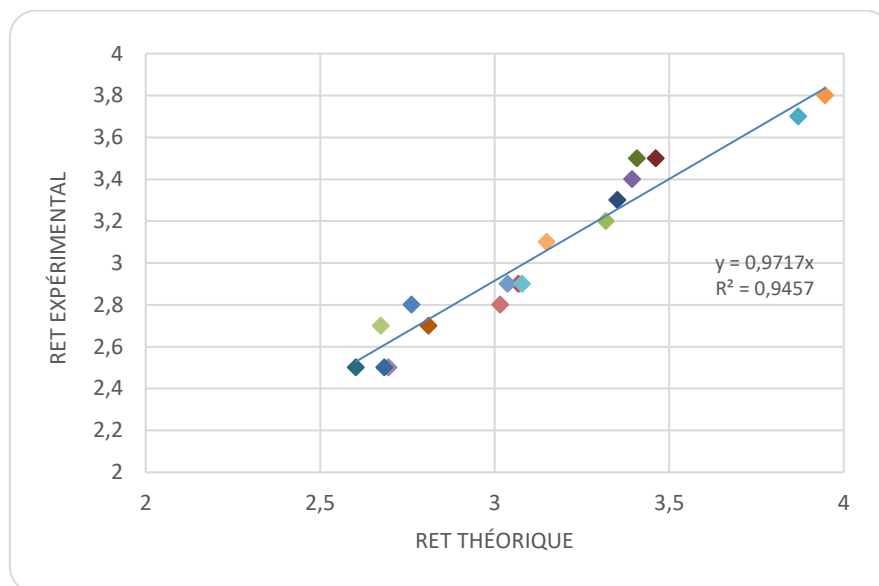


Figure V-2: Résistances d'évaporation théoriques en fonction des résistances à l'évaporation expérimentales

Malgré la forte corrélation existante entre le modèle théorique et les valeurs expérimentales, on remarque que pour calculer ( $R_{et}$ ) selon l'expression (V-30) obtenue, nous devons déterminer plusieurs paramètres liés aux fibres, fils et aux étoffes. Dans la plupart des cas, ces paramètres ne sont pas tous accessibles et demandent certains essais métrologiques de plus. Ceci peut être un handicap pour un industriel cherchant à prendre une décision plus rapide pour concevoir une étoffe avec une résistance à la vapeur d'eau désirée. Donc, pour faciliter la tâche à l'industriel

et l'aider à prendre une décision plus rapide, on a pensé à concevoir un autre modèle plus simple avec moins de variable.

### III.2. Modèle n°2

C'est vrai que le modèle n°1 nous a donné des résultats intéressants dans les conditions normales. Par contre, comme mentionné dans le paragraphe précédent, la détermination de ( $R_{et}$ ) nécessite la mesure de plusieurs paramètres. Dans un objectif de prévoir la résistance à l'évaporation avec des paramètres structuraux simple à mesurer, on a développé un second modèle en se basant sur le principe de mesure de l'appareil « Plaque chauffante » et selon la norme ISO 11092.

Les conditions standards de mesure de la résistance à l'évaporation par la méthode de la plaque chauffante sont  $T=35^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$  et  $\text{HR}= 40\% \pm 3\%$ . Dans d'autres conditions de mesure, on peut changer la température.

Selon la norme ISO 11092 : 1993, à l'équilibre la résistance à l'évaporation est comme suit :

$$R_{et} = \frac{(P_{sat,35} - P_{vap})A}{H - \Delta H} - R_{et0} \quad (\text{V-31})$$

Avec:

- $P_{sat,35}$ : la pression partielle de la vapeur saturante d'eau à  $35^{\circ}\text{C}$  [Pa],
- $P_{vap}$ : la pression partielle air /vapeur de l'air (condition d'essai) [Pa],
- $A$ : la surface de mesure [ $\text{m}^2$ ],
- $H$ : la puissance de chauffage [W],
- $\Delta H$ : la correction de puissance de chauffage (paramètre d'étalonnage) [W].

L'appareil détermine ( $R_{et}$ ) à partir d'une membrane qui simule la peau de l'être humain.

A vide (sans échantillon) la résistance à l'évaporation de la membrane ( $R_{et0}$ ) est :

$$R_{et0} = \frac{(P_{sat,35} - P_{vap})A}{H_0 - \Delta H_0} \quad (\text{V-32})$$

Le flux thermique est fourni par la plaque chaude. Il est tel que :

$$\frac{Q}{A} = \frac{H - \Delta H}{A} \quad (\text{V-33})$$

Dans les conditions de continuité et le principe de conservation de masse (le flux thermique fourni par la plaque chaude est égale au flux de l'évaporation). Nous avons aussi :

$$\frac{Q}{A} = L_{H_2O} \phi_{m_0} \quad (\text{V-34})$$

Avec:

- $L_{H_2O}$ : la chaleur latente d'évaporation [J/Kg],
- $\phi_{m_0}$ : le flux massique évaporé à l'équilibre [ $\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}$ ].

En combinant les équations (V.32), (V.33) et (V.34), on aura :

$$R_{et0} = \frac{P_{sat,35} - P_{vap}}{L_{H_2O} \phi_{m_0}} \quad (V-35)$$

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

$$\phi_{m_0} = D_{0,35} M_{H_2O} \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (V-36)$$

Avec:

- $D_{0,35}$  : le coefficient de diffusion d'eau à travers la 1<sup>ère</sup> membrane à 35°C [m<sup>2</sup>/s],
- $M_{H_2O}$  : la masse molaire de l'eau est égale 18,015 10<sup>-3</sup> Kg/mol,
- $c$  : la concentration molaire de la vapeur d'eau [mol/m<sup>3</sup>],
- $x$ : coordonnée spatiale de la concentration molaire [m].

Si nous considérons que la vapeur d'eau est un gaz parfait,  $PV = nRT$

$$\Delta c = \frac{\Delta P_{vap}}{RT_{35}} \quad (V-37)$$

Avec:

- $P_{vap}$ : la pression partielle de la vapeur d'eau [Pa],
- $R$  : la constante des gaz (8,315 10<sup>3</sup>J/Kmol K),
- $T_{35}$  : la température en [K].

Ainsi le flux massique de la vapeur d'eau est :

$$\phi_{m_0} = \frac{D_{0,35}}{e_0} \frac{P_{sat,35} - P_{vap}}{R_{H_2O} T_{35}} \quad (V-38)$$

Avec :

- $R_{H_2O}$ : la constante spécifique de la vapeur d'eau (8315)[J/Kg K],
- $e_0$  : l'épaisseur de la membrane semi perméable [m].

En remplaçant la valeur du flux massique ( $\phi_{m0}$ ) dans l'équation (V.35), nous obtenons :

$$R_{et0} = \frac{e_0}{D_{0,35}} \cdot \frac{R_{H_2O} T_{35}}{L_{H_2O}} \quad (V-39)$$

Par analogie :

$$R_{et} = \frac{e_0 + e}{D_{T,35}} \cdot \frac{R_{H_2O} T_{35}}{L_{H_2O}} - R_{et0} \quad (V-40)$$

Nous remarquons que le système se présente en série. La résistance à l'évaporation de la membrane ( $R_{et0}$ ) représente l'action d'étalonnage faite au début des mesures (sans échantillon).

Il est à noter que :

$$\frac{e_0 + e}{D_{T,35}} = \frac{e}{D_{tissu,35}} + \frac{e_0}{D_{0,35}} \quad (V-41)$$

Avec :

- $e$  : l'épaisseur du tissu [m],
- $D_{T,35}$  : le coefficient total de diffusion à  $T=35^\circ\text{C}$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],
- $D_{tissu,35}$  : le coefficient de diffusion à travers le tissu à  $35^\circ\text{C}$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Ainsi l'équation (V.40) devient :

$$R_{et} = \frac{R_{H_2O} T_{35}}{L_{H_2O}} \left( \frac{e}{D_{tissu,35}} + \frac{e_0}{D_{0,35}} \right) - R_{et0} \quad (V-42)$$

$$R_{et} = \frac{e}{D_{tissu,35}} \cdot \frac{R_{H_2O} T_{35}}{L_{H_2O}} \quad (V-43)$$

Il est à rappeler que  $R_{et0} = \frac{e_0}{D_{0,35}} \cdot \frac{R_{H_2O}}{L_{H_2O}}$

$$\frac{e}{D_{tissu,35}} = \frac{L_{H_2O}}{R_{H_2O} T_{35}} R_{et} \quad (V-44)$$

Dans les milieux poreux tels que les étoffes textiles de porosité ( $\varepsilon$ ) et de tortuosité ( $\xi$ ), le coefficient effectif de la diffusion de la vapeur d'eau est :

$$D_{issu,35} = D_{air,35} \frac{\varepsilon}{\xi} \quad (V-45)$$

Avec:

- $D_{air,35}$  : le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau à 35°C.

$$\frac{e \xi}{\varepsilon} = D_{air,35} \frac{L_{H_2O}}{R_{H_2O} T_5} R_{et} \quad (V-46)$$

$$R_{et} = \frac{e \times \xi}{\varepsilon} \times \frac{R_{H_2O} T_{35}}{D_{air,35} L_{H_2O}} \quad (V-47)$$

Ce modèle est aussi fonction d'une part des paramètres physiques et géométriques (l'épaisseur, la tortuosité et la porosité globale) et les paramètres liés aux conditions d'essai (température et humidité).

En remplaçant la formule de la porosité dans l'équation (V-47) devient :

$$R_{et} = \frac{e^2 \times \xi}{e - \frac{\pi}{4} [a d_{F\_ch}^2 + b d_{F\_Tr}^2]} \times \frac{R_{H_2O} T_{35}}{D_{air,35} L_{H_2O}} \quad (V-48)$$

Nous remarquons que la formulation de ( $R_{et}$ ) selon l'équation (V-48) est plus simple que celle trouvée par l'équation (V-30).

La Figure V-3 illustre l'évolution des résistances à l'évaporation théoriques en fonction de celles expérimentales.

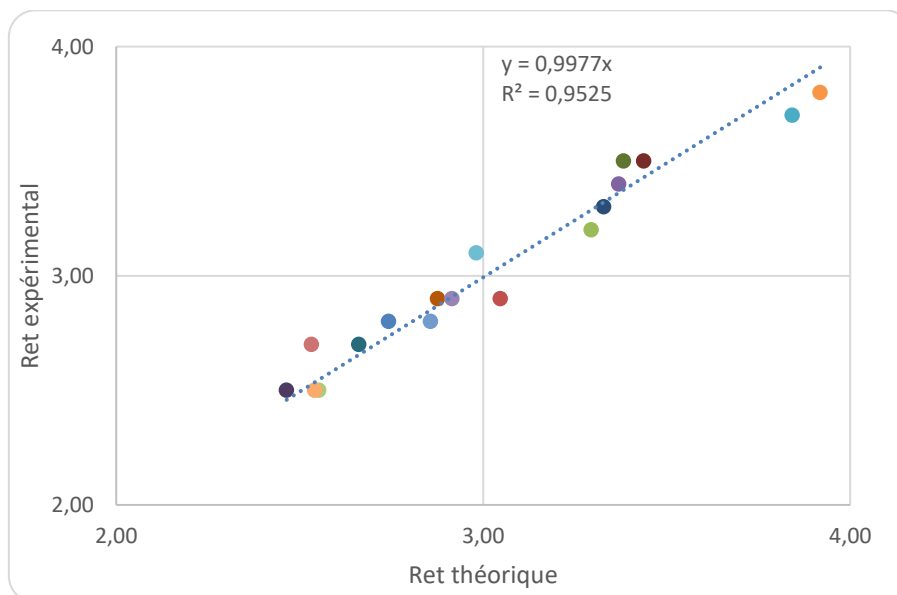


Figure V-3: Évolution des résistances à l'évaporation théoriques en fonction des résistances à l'évaporation expérimentales

D'après la Figure V-3, nous pouvons confirmer que le modèle n°2 proposé est en accord avec les résultats expérimentaux. En effet, il présente une valeur de  $R^2=0,9525$ . Le modèle n°2 colle bien avec les résultats expérimentaux mesurés.

Bien que les deux modèles développés soient basés sur deux principes différents, mais ils sont en accord avec les résultats expérimentaux déterminés. Et ils sont fonction des paramètres physiques et géométriques de porosité, épaisseur et tortuosité.

Nous avons aussi testé le modèle 2 avec des échantillons utilisés dans les travaux de Varshney et al. (Varshney,2010) et de Nazir et al. (Nazir, 2016). Ces échantillons sont composés de tissus différents. Les premiers sont des tissus simples. Ils présentent des armures sergées de 3 à effet trame cote Z, avec des fils de chaîne et de trame simples et rotors et des grammages allant de 210 à 225 g/m<sup>2</sup>. Leurs porosités varient entre 69% et 82%. Le second type d'échantillons renferme des tissus double couches avec une armure en toile pour la couche supérieure et deux variantes d'armures pour la couche inférieure. La première armure de la couche inférieure est un sergé de 4 et la seconde est un sergé composé de 2. Les grammages de ces échantillons varient entre 170 et 182 g/m<sup>2</sup>. Leurs porosités varient entre 77 et 80%. Il est à noter que les échantillons en double couches dans ce cas d'étude sont des structures légères et aérées permettant d'avoir des résistances à la vapeur d'eau entre 2,2 et 2,7 m<sup>2</sup>Pa/W.

La Figure V-4 présente la relation entre les valeurs expérimentales trouvées dans les travaux de Varshney et al, Nazir et al. et les valeurs obtenues par le modèle 2 proposé.

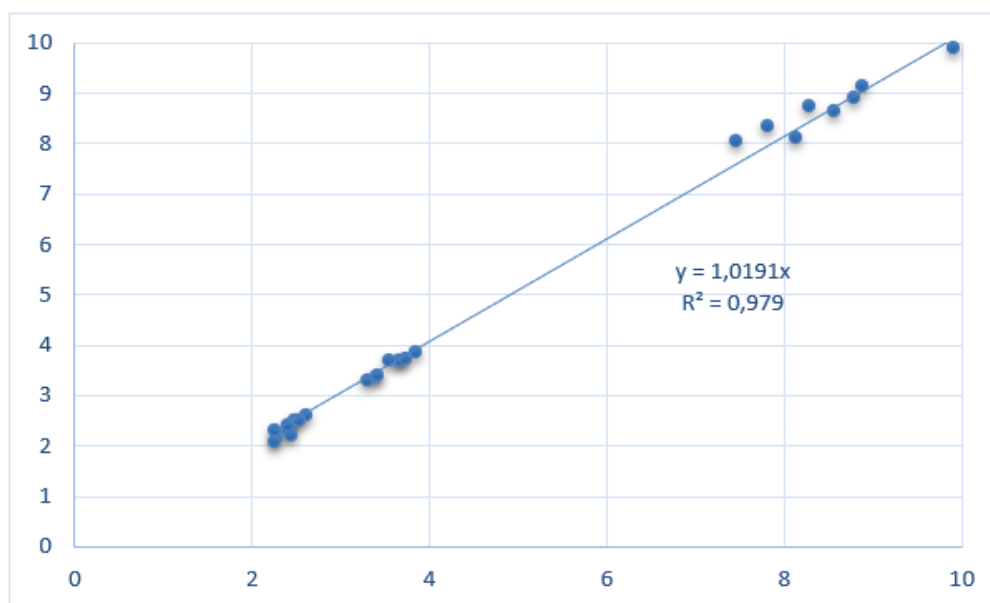


Figure V-4: Validation du modèle 2 sur des valeurs expérimentales d'autres échantillons selon Varshney et al. des tissus simple (Varshney,2010) et selon Nazir et al. des tissus double couches (Nazir, 2016)

D'après l'équation de régression linéaire présentée par la figure V-4, nous pouvons noter que le modèle est fiable et présente des résultats prometteurs.



## IV. Transfert de la vapeur d'eau à l'état mouillé

Les méthodes de mesure actuelle de la diffusion de la vapeur d'eau ainsi que les modèles qu'on vient de présenter ne sont valide que pour l'état sec. Ainsi, pour mieux évaluer les performances des étoffes textiles de point de vue diffusion de la vapeur d'eau, il faut évaluer cette propriété à l'état mouillé aussi.

En effet, lorsque l'individu porte un vêtement, le confort sera le résultat de l'équilibre thermique entre la production de chaleur et la perte de chaleur du corps humain. La production de chaleur est affectée par le niveau de l'activité physique, elle peut varier de 80W (en cas de sommeil) jusqu'à 1000W (en cas d'effort très intense) (Matusiak and Sikorski 2011). Dans la majorité des cas, l'activité physique est accompagnée par la perspiration (sensible ou/et insensible), qui provoque la mouillure des vêtements portés et par conséquent, il y aura un changement des transferts de chaleur et d'humidité au niveau de l'étoffe textile, qui va surement affecter négativement le confort thermo-physiologique.

Etant donné que dans la plupart des cas, le porteur est confronté à une situation où le microclimat présente un état mouillé, nous allons dans ce qui suit déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau à l'état mouillé.

### IV.1. Les hypothèses théoriques

Les recherches sur l'étude de la perméabilité à la vapeur d'eau lorsque le vêtement est mouillé sont rares (Boguslawska-Baczek 2013), (Boughattas, HES et al. 2018). Le cheminement du raisonnement est décrit dans ce qui suit.

Le refroidissement du corps humain par le flux de chaleur généré par l'évaporation de la sueur provoque une perte de chaleur. Cependant, l'effet du refroidissement affecte également le flux de chaleur en raison de l'évaporation de l'humidité de la surface du tissu (Figure V-5).

Cet effet de refroidissement peut ne pas refroidir suffisamment le corps, car le flux de chaleur causé par la chute de température à la surface du tissu est réduit par l'effet de la résistance thermique du tissu et de la résistance thermique de l'espace d'air entre le tissu et la peau. Dans cette étude, l'effet de la résistance thermique de contact est négligé. Le modèle de la résistance évaporative totale ( $\text{Pa}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ ) peut être représenté comme la somme de trois résistances évaporatives ( $R_{a,\text{confiné}}$ ,  $R_{et}$  et  $R_{e,\text{limite}}$ ) réduisant le flux de chaleur ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), causé par l'évaporation de la sueur dans l'environnement. Comme le montre la Figure V-6, le flux de chaleur total ( $q_{\text{total}}$ ) transféré à travers la couche limite à la surface du tissu est donné par la somme du flux de chaleur passant de la peau à travers le tissu et du flux de chaleur causé par le gradient de température entre la peau et surface du tissu, qui est refroidie par évaporation de l'eau de la surface du tissu :

$$q_{\text{total}} = \underbrace{\frac{P_{\text{sat}} - P_{\text{air}}}{R_{a,\text{confiné}} + R_{et} + R_{e,\text{limite}}}}_{\text{Flux de chaleur passant de la peau à travers l'étoffe}} + \underbrace{q_{\text{tissu},w,\text{peau}}}_{\text{Flux de refroidissement à la surface de l'étoffe}} \quad (\text{V-49})$$

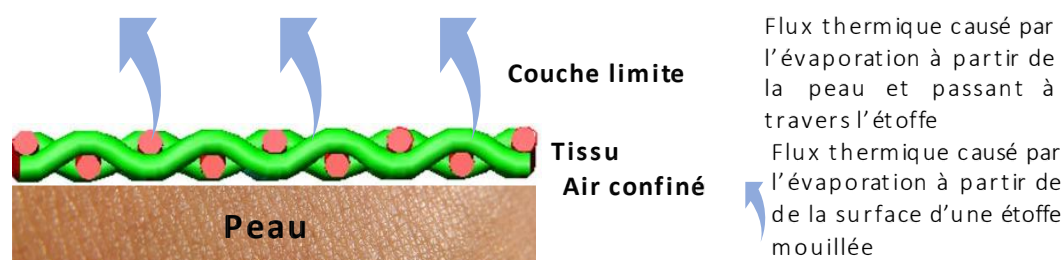


Figure V-5: Flux thermique généré par l'évaporation de la sueur à partir de la peau et flux thermique libéré l'évaporation à partir de la surface d'un tissu mouillé.

La densité du flux thermique généré par l'évaporation de la sueur détermine la chaleur perdue par le corps et a un effet rafraîchissant sur celui-ci. La densité de flux de chaleur a également un effet sur le refroidissement dû à l'humidité qui s'évapore à partir de la surface du tissu (Figure V-6). Cependant, cet effet de rafraîchissement ne peut pas refroidir suffisamment le corps car la densité de flux thermique provoquée par la chute de température à la surface du tissu est réduite par l'effet de la résistance thermique du tissu et par celle de la couche d'air entre le tissu et la peau (Boguslawska-Baczek 2013), (ISO11092, 1993). Dans cette étude, l'effet de la résistance thermique de contact est négligé. La Figure V-6 montre toutes les résistances évaporatives ( $R_{et}$ ) en [Pa.m<sup>2</sup>/W] (Résistance à l'évaporation de la couche d'air confiné, résistance à l'évaporation du vêtement et la résistance à l'évaporation de la couche limite) lors du passage de la densité du flux thermique provoqué par l'évaporation de la sueur vers l'extérieur.

La perte de chaleur par le corps crée l'effet de refroidissement dû au flux de chaleur généré par l'évaporation de la sueur. Cependant, cette sensation de froid affecte également le flux de chaleur évaporé de la surface du tissu à cause de la présence de l'humidité comme le montre la Figure V-6 (Boughattas, HES et al. 2018).

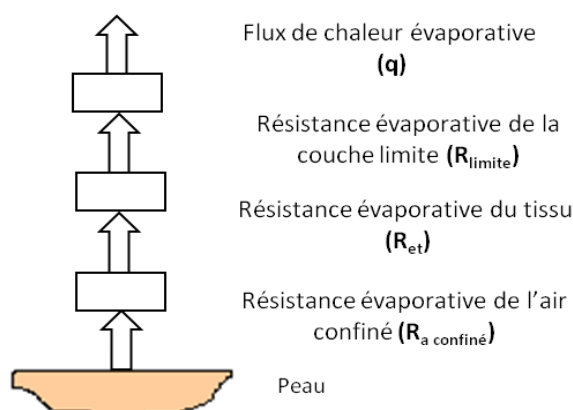


Figure V-6: Schéma de la connexion en séries des résistances évaporatives durant un flux de chaleur par évaporation passant de la peau à travers le tissu

Dans un premier temps, l'effet du refroidissement cutané provoqué par l'évaporation de la vapeur d'eau de la surface du tissu a été analysé. Malgré l'hypothèse de conditions isothermes,

le tissu humide devient plus froid que l'air environnant car la surface du tissu n'est pas maintenue à la température de la surface de mesure de l'instrument (Skin model) en raison de l'effet de la résistance thermique du tissu. La densité du flux thermique, causée par le transfert de masse par convection depuis la surface du tissu ( $q_{tissu,w}$ ), peut être décrite par l'équation (V.50), à condition que la surface du tissu soit recouverte d'un film d'eau continu (Hes 2010):

$$q_{tissu,w} = L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air}) \quad (V-50)$$

Avec :

- $L$  : chaleur latente de l'évaporation de l'eau [ $W.s. Kg^{-1}$ ],[ $J.Kg^{-1}$ ]
- $\beta_p$  : coefficient de transfert de masse [ $Kg m^{-2} Pa^{-1} s^{-1}$ ],
- $q_{tissu,w}$  : flux de chaleur causé par le transfert de mass par convection de la surface de tissu [ $W m^{-2}$ ],
- $P_{sat,tissu}$  et  $P_{sat}$  : respectivement la pression de vapeur d'eau saturante dans la surface de tissu et la peau [Pa],
- $P_{air}$  : pression de la vapeur d'eau de l'air [Pa].

La force qui provoque le transfert de vapeur d'eau peut être exprimée comme la différence des pressions partielles de la vapeur d'eau, ou comme la différence des concentrations de vapeur d'eau. Dans les sciences ergonomiques, l'utilisation de pressions partielles de vapeur d'eau (équation V-50) est plus courante (Gibson, 1993), (Frydrych, 2002), (Bivainyté, 2011). Un film d'eau continu est présent à n'importe quel niveau d'humidité du tissu sauf dans le cas d'étoffe sèche. On l'appelle la période de vitesse de séchage constante et de température constante de la surface du tissu. Pendant cette période, la pression partielle de vapeur d'eau à la surface de la peau atteint la saturation. La densité de flux thermique ( $q_{tissu,w}$ ) doit être en équilibre avec les pertes thermiques par convection vers l'air extérieur ( $\alpha\Delta T_{air}$ ) et conduction thermique vers la peau (causé par la résistance thermique de l'étoffe mouillée et celle en série de l'air confiné):

$$q_{tissu,w} = L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air}) = \alpha\Delta T_a + \frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} \quad (V-51)$$

Avec :

- $\alpha$ : Coefficient de transfert convectif [ $W m^{-2} K^{-1}$ ],
- $\Delta T_a$ : Différence de température [ $^{\circ}K$ ],
- $R_{a,confiné}$ : Résistance à l'évaporation de l'air confiné [ $K m^2 W^{-1}$ ],
- $R_{ctw}$ : Résistance thermique du tissu mouillé [ $K m^2 W^{-1}$ ].

$$q_{tissu,w} = \alpha \Delta T_a \left( 1 + \frac{1}{\alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné}} \right) \quad (V-52)$$

$$q_{tissu,w} = \frac{\alpha \Delta T_a}{\alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné}} \left( 1 + \alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné} \right) \quad (V-53)$$

$$q_{tissu,w} = \frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} \left( 1 + \alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné} \right) \quad (V-54)$$

Ainsi,

$$q_{tissu,w} = L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air}) = \frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} \left( 1 + \alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné} \right) \quad (V-55)$$

Donc,

$$\frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} = \frac{L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air})}{\left( 1 + \alpha R_{ctw} + \alpha R_{a,confiné} \right)} \quad (V-56)$$

La résistance thermique du tissu à l'état mouillé ( $R_{ctw}$ ) peut être exprimée en fonction linéaire de la teneur en eau dans le tissu ( $U$ ) et la résistance thermique du tissu sec ( $R_{ct}$ ) par la formule suivante (Rogankov, 2016) :

$$R_{ctw} = (1 - kU) R_{ct} \quad (V-57)$$

Avec ( $k$ ) est une constante déterminée expérimentalement et caractérisant la diminution de la résistance thermique provoquée par l'augmentation de la teneur en eau ( $U$ ) dans le tissu.

En remplaçant l'expression de la résistance thermique du tissu à l'état mouillé ( $R_{ctw}$ ) selon l'équation V-57 dans l'équation V-56 on obtient l'expression suivante :

$$\frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} = \frac{L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air})}{\left( 1 + \alpha (1 - kU) R_{ct} + \alpha R_{a,confiné} \right)} \quad (V-58)$$

D'après l'équation V-58, une augmentation de teneur de la vapeur dans une étoffe fait diminuer sa résistance thermique, ce qui provoque un effet rafraîchissant à la suite de l'évacuation du flux de chaleur de la peau. Cette explication peut être simplifiée : l'augmentation de la teneur de la vapeur d'eau d'un tissu sera également suivie par une augmentation de transfert de masse.

La densité de flux de chaleur provoquant le refroidissement de la peau, suite à la chute de la température à la surface supérieure du tissu (en contact avec l'air ambiant) et causé par l'évaporation de la surface de l'étoffe mouillée est fonction de la résistance thermique de l'étoffe mouillée ( $R_{ctw}$ ) et celle de l'air confiné ( $R_{a,confiné}$ ) :

$$q_{tissu,w,peau} = \frac{\Delta T_a}{R_{ctw} + R_{a,confiné}} \quad (V-59)$$

En utilisant les équations V-49, V-58 et V-59, le flux de chaleur total ( $q_{total}$ ) devient :

$$q_{total} = \frac{P_{sat} - P_{air}}{R_{a,confiné} + R_{et} + R_{e,limite}} + \frac{L\beta_p (P_{sat,tissu} - P_{air})}{(1 + \alpha(1 - kU)R_{ct} + \alpha R_{a,confiné})} \quad (V-60)$$

La résistance à l'évaporation de la couche d'air confiné (relativement étroite) ( $R_{a,confiné}$ ) sans effet de la convection libre (ISO11092, 1993) (à ce niveau nous n'avons pas de mouvement d'air) peut être décrite comme suit:

$$R_{a,confiné} = \frac{e}{D_p} \quad (V-61)$$

Avec :

- e: épaisseur de l'air confiné entre la surface de mesure et le tissu [m],
- $D_p$ : coefficient de diffusion relié à la pression partielle de vapeur d'eau et le flux de chaleur [ $W.Pa^{-1}.m^{-1}$ ].

La résistance à l'évaporation de la couche limite ( $R_{e,limite}$ ) est exprimée par l'équation suivante :

$$R_{e,limite} = \frac{1}{L\beta_p} \quad (V-62)$$

#### IV.2. La détermination de la perméabilité effective à la vapeur d'eau

Dans cette partie, nous allons déterminer la perméabilité effective à la vapeur d'eau ( $P_{wv,eff}$ ) des tissus humides. En effet, le flux de refroidissement total ( $q_{total,tissu,w}$ ) transféré à travers la couche limite de la surface du tissu mouillé est exprimé par la somme du flux de chaleur de refroidissement passant de la peau à travers le tissu perméable ( $q_{tissu,w}$ ) et le flux de chaleur relatif ( $q_{tissu,surf}$ ) provoqué par le gradient de température entre la peau et la surface de tissu, qui est refroidi par évaporation de l'eau de la surface du tissu.

$$q_{total,tissu,w} = q_{tissu,w} + q_{tissu,surf} \quad (V-63)$$

Donc,

$$q_{tissu,w} = q_{total,tissu,w} - q_{tissu,surf} \quad (V-64)$$

Avant de procéder aux mesures, nous avons suivi le protocole expérimental décrit précédemment. Pour déterminer la perméabilité effective à la vapeur d'eau ( $P_{wv,eff}$ ) en utilisant le PERMETEST, il faut nécessairement déterminer deux mesures sur le même échantillon

mouillée. Dans un premier temps, nous mesurons le flux de chaleur de refroidissement total ( $q_{total,tissu,w}$ ) équation V-60 passant à travers l'étoffe mouillée et aussi le flux de refroidissement généré par la surface de l'échantillon mouillé. Dans un deuxième temps, la tête de mesure de l'instrument PERMETEST est couverte par un film plastique (imperméable), qui va stopper le flux de refroidissement effectif ( $q_{tissu,w}$ ) à travers l'étoffe mouillée. Par conséquent, dans cette étape, nous allons mesurer le flux de refroidissement relatif ( $q_{tissu,surf}$ ) uniquement de la surface du tissu mouillée.

Nous avons:

$$P_{wv} = 100 \times \frac{q_{tissu}}{q_0} \tag{V-65}$$

Où  $q_{tissu}$  est le flux de chaleur mesuré par le PERMETEST lorsque la tête de mesure est couverte par le tissu sec. La perméabilité relative à la vapeur d'eau de ce tissu représente le flux de refroidissement relatif traversant le tissu sec multiplié par 100. De même, la perméabilité à la vapeur d'eau effective ( $P_{wv,eff}$ ) est définie comme "100 fois le flux de chaleur relatif passant par la peau à travers le tissu perméable ( $q_{tissu,w}$ )".

Donc d'après les équations V-64 et V-65, nous obtenons:

$$P_{wv,eff} = 100 \times \frac{q_{tissu,w}}{q_0} = 100 \times \frac{(q_{total,tissu,w} - q_{tissu,surf})}{q_0} \tag{V-66}$$

### IV.3. Étude de cas

Les caractéristiques des échantillons utilisés dans cette étude sont données dans le Tableau V-1. On a utilisé 6 échantillons fabriqués de deux types de fibres (Co/PET et 100% PET) et réalisés avec trois armures différentes. On a choisi un duitage fixe (21 duites/cm) et un compte chaîne fixe (24 fils/cm) pour les 6 échantillons.

Les conditions de mesures sont 20-22°C en température et 50-55% en humidité.

Tableau V-1: Caractéristiques des tissus utilisés

Composition	N° de l'échantillon	Compte chaîne	Duitage	Armure	Ret (sec)
Co/PET	1	24	21	Toile	2,9
	2			Sergé	3,7
	3			Satin	3,5
PET	4			Toile	2,8
	5			Sergé	2,9
	6			Satin	2,5

Vu que la détermination de la perméabilité à la vapeur d'eau à l'état mouillé n'est pas une mesure directe, un protocole expérimental spécifique a été proposé et suivi. Ce dernier est décrit avec détail dans le chapitre III.

La stratégie de l'étude à l'état mouillé est que : le transfert de vapeur d'eau doit être limité dans la structure mouillée d'une étoffe textile lorsqu'il crée un film partiellement continu. Les

résultats des mesures de la perméabilité relative à la vapeur d'eau à travers un tissu mouillé sont présentés dans les figures suivantes.

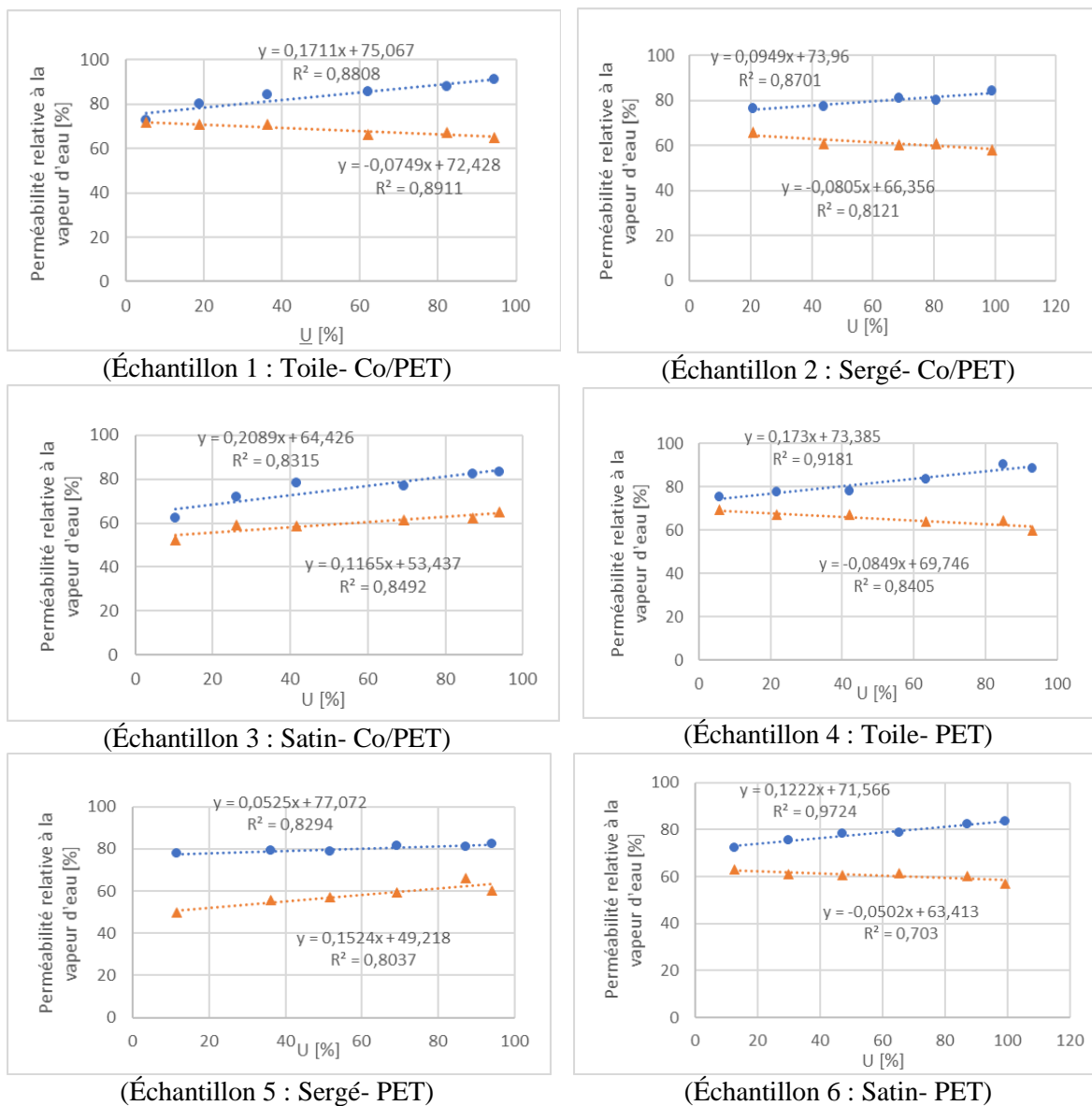


Figure V-7 : Les résultats des mesures de la perméabilité relative à la vapeur d'eau à travers un tissu mouillé

Les figures ci-dessus (Figure V-7) présentent le flux de chaleur de refroidissement total (ligne bleue) et le flux de chaleur de refroidissement relatif uniquement de la surface mouillée (ligne orange). Nous constatons qu'avec l'augmentation de l'humidité contenue dans les tissus, la perméabilité relative de la vapeur d'eau augmente, aussi. Dans tous les tissus testés, ces dépendances étaient linéaires, ce qui a confirmé la fiabilité des mesures

Par conséquent, pour déterminer la perméabilité effective à la vapeur d'eau qui représente réellement la vraie ou à peu près la perméabilité d'une étoffe mouillée, on calcule la différence entre les deux courbes (comme décrit en détail dans le chapitre III dans le protocole expérimental).

La figure suivante présente la perméabilité effective à la vapeur d'eau des 6 tissus étudiés pour un teneur d'eau de 50%. Nous constatons que les valeurs de la perméabilité relative à la vapeur d'eau à l'état mouillée sont très faibles par rapport à celle à l'état sec, et c'est tout à fait logique car en absorbant de l'humidité, les fibres vont gonfler (cas des fibres hydrophile) et elles vont diminuer la taille des pores et par la suite il y aura une difficulté au passage de l'humidité. C'est pour cette raison que les tissus en mélange Co/PET ont les valeurs de perméabilité effective à la vapeur d'eau les plus basse. Cependant, l'échantillon 5 (armure sergé) présente la perméabilité à la vapeur d'eau la plus élevée vu la présence des flottés qui facilite le passage de l'humidité.

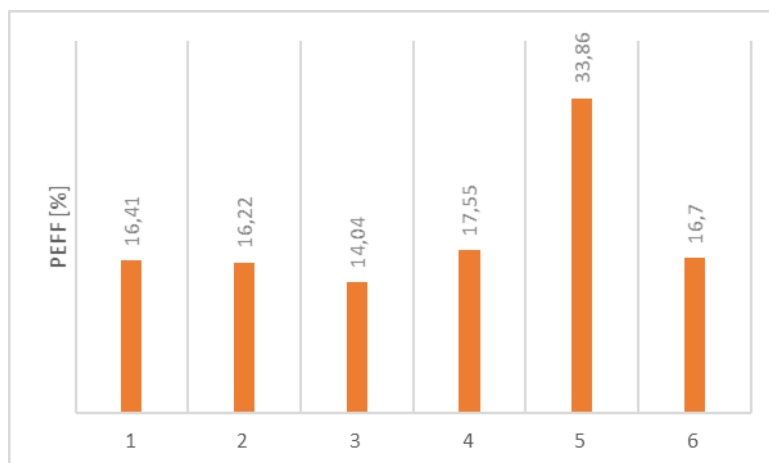


Figure V-8: la perméabilité effective à la vapeur d'eau des 6 échantillons étudiés

La détermination de la perméabilité effective à la vapeur d'eau est une mesure très intéressante et utile vu qu'elle nous donne une idée sur le comportement des tissus lorsqu'ils sont mouillés et par la suite on peut savoir, par exemple, pour un vêtement qui va être porté lors d'une activité nécessitant un travail métabolique élevé ou dans des conditions climatiques (comme la pluie, etc) comment ce vêtement va réagir face à la présence de la sueur ou/et pluie.

## V. Conclusion

La modélisation de la résistance à la vapeur d'eau est introduite avec deux modèles :

- Le premier en se basant sur la cinétique de la diffusion de la vapeur avec la loi de Fick,
- Le second modèle en se basant sur le protocole expérimental et le principe de fonctionnement de la plaque chaude gardée selon la norme ISO11092.

Les deux modèles mathématiques ont été validé par des résultats expérimentaux. Il est à noter aussi que dans les deux modèles on a fait intervenir des paramètres liés aux conditions d'essais tel que la température et l'humidité, des propriétés intrinsèques de la vapeur d'eau et aussi les paramètres structuraux de l'étoffes textile à savoir : l'épaisseur, la tortuosité et la porosité.

Afin d'évaluer les performances des étoffes textiles dans des conditions réelles : saturation de l'étoffe, on a proposé une nouvelle démarche et modélisation mathématique pour évaluer la perméabilité de la vapeur d'eau au mouillé.



---

---

## **Conclusion Générale**

---

---

## Conclusion générale

Cette étude est une contribution à la compréhension et à la modélisation des transferts hydriques d'eau et leurs effets sur le confort thermo-physiologique. En particulier, elle porte sur le transfert de la vapeur d'eau à l'état sec et au mouillé à travers des structures textiles. L'un des problèmes majeurs des industriels textiles est de choisir les paramètres structuraux permettant d'avoir les valeurs souhaitées des grandeurs physiques liées au confort hydrique.

A l'issue d'une étude bibliographique nous avons constaté que la diffusion de la sueur à travers un vêtement est un facteur déterminant du confort hydrique. La sueur doit être transmise de la surface de la peau à celle du vêtement. Le tissu devrait évacuer la vapeur contenue dans l'atmosphère afin de réduire l'humidité à la surface de la peau.

La porosité des structures textiles tissées influence certaines propriétés physiques telles que la capacité d'absorption d'humidité, le transfert de masse et la perméabilité à la vapeur d'eau etc.

La diffusion de la vapeur d'eau à travers une étoffe textile est principalement affectée par les caractéristiques des pores des tissus. En effet, les dimensions et la distribution des pores sont fonction de la structure géométrique des étoffes textiles. Le diamètre du fil, la densité des fils de chaîne et de trame par centimètre et le type d'armure sont les principaux facteurs affectant la porosité d'un tissu.

Dans ce travail de recherche, une série de 18 échantillons a été tissé avec variation des valeurs de duitage ; 18, 21 et 24 duites/cm pour deux types de trame. Les structures tissées sont conçues à partir des trois armures de bases à savoir la toile, le sergé de 3 à effet trame cote Z et le satin turec effet trame. Ce choix a été fixé pour tenir compte d'un maximum de variation des paramètres explicatifs du confort hydrique.

L'étude expérimentale des paramètres de confort hydrique a permis d'évaluer la diffusion de la vapeur d'eau à travers les tissus étudiés en utilisant l'appareil PERMETEST. Le transfert des liquides a été évalué en utilisant l'appareil MMT. Les méthodes d'analyses statistiques ont permis de trouver des prédictions entre les paramètres structuraux des tissus (armure, duitage et matière) et les paramètres de confort hydrique. Cependant, ces résultats restent à caractère général et ne permettent pas de relier les paramètres de fabrication (épaisseur, masse surfacique, etc) aux paramètres du confort hydrique.

Pour optimiser cette modélisation, nous avons procédé à l'étude des relations entre les paramètres de fabrication et les paramètres structuraux et leurs interactions. Les résultats montrent qu'il existe des dépendances entre ces paramètres (fabrication et structure).

Nous avons ensuite proposé des modèles de prédiction des paramètres de confort hydrique en fonction des paramètres de fabrication avec des significations statistiques intéressantes. D'autre part, les équations de régression linéaires trouvées ont montré que l'épaisseur, la porosité et la tortuosité sont les paramètres de structures les plus pertinents. Nous avons établi une prévision

des paramètres hydriques étudiés par la méthode des surfaces des réponses permettant ainsi de fixer les intervalles de variation des paramètres de fabrication pour des valeurs de confort visées. Ces prévisions sont valables dans les intervalles de variation des paramètres de structure étudiés.

Pour affiner la prévision des paramètres de confort et afin d'élargir les intervalles de validité de nos prévisions, nous avons introduit deux modèles mathématiques de calcul de la résistance à l'évaporation. Le premier modèle est basé sur le mécanisme de transfert de la vapeur d'eau avec la loi de Fick et le second modèle se base sur le principe de fonctionnement de la plaque chaude gardée et le protocole expérimental de la norme ISO11092. Les deux modèles mathématiques ont été validés par des résultats expérimentaux. Il est à noter aussi que dans les deux modèles, nous avons fait intervenir des paramètres liés aux conditions d'essais tel que la température et l'humidité, des propriétés intrinsèques de la vapeur d'eau et aussi les paramètres structuraux de l'étoffes textile à savoir : l'épaisseur, la tortuosité et la porosité. Ces derniers paramètres seront utiles pour l'amélioration et l'optimisation de la diffusion de la vapeur d'eau en manipulant les réglages techniques et les processus de fabrication.

L'ensemble des résultats obtenus sont certes prometteurs. Cependant, sur le plan application et en perspectives, ces résultats nécessitent une validation sur d'autres types de structures textiles telles que les étoffes multiples liées. L'étude des différentes échelles de porosité peut être appliquée pour la conception des imper-transpirants. Notamment autres types de fils techniques peuvent être utilisé pour valider les modèles proposés dans cette thèse.

Nous pouvons aussi par les méthodes d'intelligences artificielles proposer des indices de confort en combinant les différents paramètres de confort hydrique étudiés.

---

---

## **Références bibliographiques**

---

---

---

## Références bibliographiques

Achour, NS. (2016). "Contribution à la modélisation de l'écoulement de la matière à travers les structures textiles tricotées." Thèse de doctorat.

Azeem, M., Boughattas, A., Wiener, J., & Havelka, A. (2017). "Mechanism of liquid water transport in fabrics; a review." *Fibres and Textiles, Vlákna a textil*(4): 58.

Baghdadi, R., Alibi, H., Fayala, F., & Zeng, X. (2016). Investigation on air permeability of finished stretch plain knitted fabrics. I. Predicting air permeability using artificial neural networks. *Fibers and Polymers*, 17(12), 2105-2115.

Bakkevig M.K., N. R. (1994). "The impact of activity level on sweat accumulation and thermal comfort using different underwear." *Ergonomics* 36: 787-800

Bartels, V. (2005). *Physiological comfort of sportswear*. Textiles in sport, Elsevier: 177-203.

Bedek, G., et al. (2011). "Evaluation of thermal and moisture management properties on knitted fabrics and comparison with a physiological model in warm conditions." 42(6): 792-800.

Benltoufa, S. (2013). "Étude de l'écoulement et des transferts de masse dans les matériaux textiles." Thèse de doctorate.

Benltoufa, S., Fayala, F., & BenNasrallah, S (2008). "Capillary Rise in Macro and Micro Pores of Jersey Knitting Structure." *Journal of Engineered Fabrics & Fibers (JEFF)* 3(3).

Berglund, L. G. and R. R. Gonzalez (1977). "Evaporation of sweat from sedentary man in humid environments." *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 42(5): 767-772.

Bhourri, N. (2006). "Comportement thermodynamique et dimensionnel des matériaux textiles soumis à des variations des conditions climatiques." Thèse de doctorat.

Boguslawska-Baczek, M., & Hes, L (2013). "Effective water vapour permeability of wet wool fabric and blended fabrics." *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.

Bories, S., Mojtabi, A., Prat, M., & Quintard, M (1995). "Transferts de chaleur dans les milieux poreux." Ed. Techniques Ingénieur.

Boughattas, A., et al. (2018). "Thermo-physiological properties of woven structures in wet state." *Industria Textila* 69(4): 298-303.

Bivainytė, A. and D. J. P. Mikučionienė (2011). "Investigation on the air and water vapour permeability of double-layered weft knitted fabrics." 8: 29.

Cimilli, S., Nergis, B. U., Candan, C., & Özdemir, M. (2010). A comparative study of some comfort-related properties of socks of different fiber types. *Textile Research Journal*, 80(10), 948-957.

D.M. Scheurell, S. M. S., N.R.S. Hollies (1985). "Dynamic surface wetness of fabrics in relation to clothing comfort." *Textile Research Journal* 55: 767-772.

Das, B., Araujo, M., Kothari, V. K., Fanguiero, R., & Das, A (2012). "Modeling and Simulation of Moisture Transmission through Fibrous Structures Part I: Water Vapour Transmission." *Journal of Fiber Bioengineering & Informatics* 5(4): 359-378.

Das, B., et al. (2007). "Moisture transmission through textiles. Part I: Processes involved in moisture transmission and the factors at play." *AUTEX Research Journal* 7(2): 100--110.

Das, B., Das, A., Kothari, V. K., Fanguiero, R., & Araujo, M. D. (2007). "Moisture transmission through textiles. Part I: Processes involved in moisture transmission and the factors at play." *AUTEX Research Journal* 7(2): 100-110.

Ding, D., et al. (2011). "Characterizing the performance of a single-layer fabric system through a heat and mass transfer model-Part I: Heat and mass transfer model." *Textile Research Journal* 81(4): 398-411.

docteurclic. "www.docteurclic.com", consulté le 12/11/2020.

Dubrovski, P. D. (2010). "Woven fabric engineering." 172-174.

EN12127 (1998). "Textiles. Determination of mass per unit area using small samples "

EN1049-2 (1993). "Textiles. Woven fabrics construction. Methods of analysis. Determination of number of threads per unit length."

Enveho "Environnement vestimentaire autour de l'Homme, disponible à partir du lien." <http://enveho.com/> consulté le 04/12/2019.

Fanaei, A. E. (2012). "Caractérisation expérimentale des écoulements capillaires dans les renforts fibreux à double échelle de porosité." (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).

Fanger, P. O. (1973). "Assessment of man's thermal comfort in practice." *Br J Ind Med* 30(4): 313-324.

- Figueiredo, A. (2021). "Resampling methods in ANOVA for data from the von Mises-Fisher distribution." *Communications in Statistics-Simulation and Computation*: 1-15.
- Fohr (2002). "Dynamic heat and water transfer through layered fabrics." *Textile Research Journal* 72(1): 1-12.
- Fourt L, H. N. R. S. (1970). "Clothing: Comfort and Functions, Marcel Decker Inc., New York."
- Frydrych, I., et al. (2002). "Comparative analysis of the thermal insulation properties of fabrics made of natural and man-made cellulose fibres." *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 10(4): 40-44.
- Fukazawa, T., Kawamura, H., & Tamura, T (1999). "Water vapour resistance of hydrophobic microporous membranes under reduced pressures at a constant temperature." *Journal of the Textile Institute* 90(4): 602-615.
- Gibson, P., Kendrick, C., Rivin, D. and Sicuranza, L (1995). "An automated water vapour diffusion test method for fabrics, laminates, and films." *Journal of Coated Fabrics* 24(4): 322-345.
- Gibson, P. W. (1993). "Factors influencing steady-state heat and water vapor transfer measurements for clothing materials." *Textile Research Journal* 63(12):749-764.
- Gibson, P. W. (2000). "Effect of temperature on water vapor transport through polymer membrane laminates." *Polymer Testing* 19(6): 673-691.
- Gibson, P. W., Kendrick, C. E., Rivin, D., & Charmchi, M (1997). "An automated dynamic water vapor permeation test method." *Performance of Protective Clothing: Sixth Volume ASTM International*.
- Goldstein, B., Smith, H., and Herbert, W (1980). "Lower limits of low weight pick up finishing." *Textile Chemistry Color* 12 (3) 49-54.
- Guo, Y. L., Y. Tokura, H (2008). "Impact of fabric moisture transport properties on physiological responses when wearing protective clothing." *Textile Research Journal* 78 (12): 1057-1069.
- Guyton, A. C. a. H., J.E (2002). "Précis de physiologie médicale. Deuxième édition française, traduction de la dixième édition américaine, chapter 73- Régulation de la température et fièvre." 875-886.
- Hatch (1993). "Textile Science, West Publishing Co., Minneapolis, MN, USA."
- Havenith, G. (2002). "Interaction of clothing and thermoregulation." *Exogenous Dermatology* 1(5): 221-230.

Hes, L., & de Araujo, M (2010). "Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow." *Textile Research Journal* 80(14): 1488-1497.

Hes L, D. I. (2003). "A New Portable Computer-Controlled Skin Model for Fast- Determination of Water Vapour and Thermal Resistance of Fabrics." *Asian Textile Conference (ATC 7)*, New Delhi.

Hes L, D. I. (2007). "Precise measurement of water vapour permeability of wet fabrics." *Proc. of the AUTEX International Textile Conference*, Tampere, Finland.

Hes L (2002). "The Effect of Planar Conduction of Moisture on Measured Water Vapour Permeability of Thin Woven Fabrics." *Fall Fiber Society Conference*, Lake Tahoe.

Hes L (2006). "Alternative Methods of Determination of Water Vapour Resistance of Fabrics by Means of a Skin Model." *European Conference on Protective Clothing*, Gdynia.

Hong, K., Hollies, N. R. S. and Spivak, S. M (1988). "Dynamic moisture vapour transfer through textiles." *Textile Research Journal* 12: 697-706.

Hsieh, Y. L. (1995). "Liquid transport in fabric structures." *Textile Research Journal* 65(5): 299-307.

Hu J, L. Y., Yeung K-W (2005). "Moisture Management Tester: A Method to Characterize Fabric Liquid Moisture Management Properties." *Textile Research Journal* vol.75(issue 1): 57-62.

Irاندوکht, S., & Irاندوکht, A (2011). "Development of the predictive models for the fabric water vapor resistance." *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 6(2).

Ishtiaque, S. M. (2001). "Engineering comfort." *Asian Textile Journal* 10(11): 36-39.

ISO 5084. (1996). "Textiles.- détermination de l'épaisseur des textiles et produits textiles."

ISO2060 (1994). "Textiles. Fils sur enroulements- Détermination de la masse linéique (masse par unité de longueur) par la méthode de l'écheveau."

ISO9237 (1995). "Textiles. Determination of permeability of fabric to air. International standards organisation."

ISO11092 (1993). "Textiles – Physiological effects – Measurement of Thermal and Watervapour Resistance Under Steady-state Conditions (Sweating Guarded-hotplate Test)."

Kim, J. O. (1999). "Dynamic moisture vapour transfer through textiles, Part III: Effect of film characteristics on micro climate moisture and temperature." *Textile Research Journal* 69 (3) 193-202.



Kissa, E. (1981). "Capillary sorption in fibrous assemblies." *Journal of Colloid and Interface Science* 83(1): 265-272.

Kissa, E. (1996). "Wetting and wicking." *Textile Research Journal* 66(10): 660-668.

Kothari, V. K. (2000). "Quality control: Fabric comfort." *Indian Ins. of Tech., Delhi, India.*

Kumar, S., et al. (2021). "Comparative Analysis on Thermo-physiological Behavior of Eri Silk, Wool and Bamboo Knitted Fabrics Toward Sportswear." 1-12.

Hes L. (1993). "Water Vapour Permeability of Wool Blended Fabrics." *International Conference on Textile Science, Liberec.*

Hes, L. (2002). "The Effect of Planar Conduction of Moisture on Measured Water Vapour Permeability of Thin Woven Fabrics." *Fall Fiber Society Conference, Lake Tahoe.*

Hes, L. (2006). "Alternative Methods of Determination of Water Vapour Resistance of Fabrics by Means of a Skin Model." *European Conference on Protective Clothing, Gdynia.*

Law, Y. M. M. (1988). *A study of water transport through clothing fabrics, University of Leeds.*

Li Y, Y. K.-W. (2000). "Moisture management of textiles " *US Patent 6,499,338 B2.*

Li, Y., Zhu, Q (2003). "Simultaneous heat and moisture transfer with moisture sorption, condensation and capillary liquid diffusion in porous textiles." *Textile Research Journal* 73 (6) 515-524.

Li, Y., Zhu, Q., & Yeung, K. W. (2002). "Influence of thickness and porosity on coupled heat and liquid moisture transfer in porous textiles." *Textile Research Journal* 72(5): 435-446.

Liu, X., Li, Y., Hu, J., Jiao, J., & Li, J (2014). "smart moisture management and thermoregulation properties of stimuli-responsive cotton modified with polymer brushes." *RSC advances* 4(109): 63691-63695.

Lomax, G. R. (1985). "The design of waterproof, water vapour-permeable fabrics" *Journal of coated fabrics* 15(1): 40-66.

Mairiaux P, M. J. (1990). "Le travail en ambiance chaude." *Masson ed., Paris: 172-196.*

Masoodi, R. e. P., K. M (2010). "Darcy law-based model for wicking in paper-like swelling porous media." *AIChE journal* 56(9): 2257-2267.

Matusiak, M. and K. Sikorski (2011). "Influence of the structure of woven fabrics on their thermal insulation properties." *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 19(5): 88.

McCullough, E. A. (1993). "McCullough, E. A. (1993). Factors affecting the resistance to heat transfer provided by clothing." *Journal of Thermal Biology* 18(5-6): 405-407.

Miller, B. (2000). "Critical evaluation of upward wicking tests." *International Nonwovens Journal*(9): 35-40.

Morel, A. (2014). "Gestion des transferts thermiques et hydriques au sein d'une structure multicouche textile: développement d'une membrane pour application EPI (Doctoral dissertation, Lille 1).".

Nazir, M. U., Shaker, K., Nawab, Y., Fazal, M. Z., Khan, M. I., & Umair, M. (2017). Investigating the effect of material and weave design on comfort properties of bilayer-woven fabrics. *The Journal of the Textile Institute*, 108(8), 1319-1326.

Okur, E. Ö. A. (2014). "Thermophysiological comfort properties of selected knitted fabrics and design of T-shirts." *The Journal of The Textile Institute*.

Olshen, R. A. (1973). "The conditional level of the F—Test." *Journal of the American Statistical Association* 68(343): 692-698

Ostwald, W. (1891). "Solutions." New York: Longmans, Green, And Co.

Özkan, E. T. and B. Meriç (2015). "Thermophysiological comfort properties of different knitted fabrics used in cycling clothes." *Textile Research Journal* 85(1): 62-70.

P.O.Fanger (1970). "Thermal Comfort." inter alia McGraw Hill Book Company, New york.

Pan N, G. P. (2006). "Thermal an moisture transport in fibrous materials, The skin's role in human thermoregulation and comfort." ed Pan N and Gibson P: 560-602.

Parsons, K. (2003). *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*, Taylor & Francis.

Parsons, K. C. (2002). "The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort." *Energy and Buildings* 34(6): 593-599.

Peirce, F. T. (1937). "The geometry of cloth structure." *Journal of the Textile Institute Transactions* 28(3): 45-96.

Pezron, I., Bourgain, G., & Quéré, D (1995). " Imbibition of a fabric." *Journal of Colloid and Interface Science* 173(2): 319-327.

Reljić, M., Stepanović, J., Lazić, B., Ćirković, N., & Cerović, D (2016). "The change of water vapour resistance of materials used for the clothing production during exploitation." *Advanced Technologies* 5(2): 73-78.

Rogankov, O. V., Shvets, M. V., & Rogankov, V. B (2016). "Alternate basic l/b-model of effective porosity created for hydrophilic (l) and/or hydrophobic (b) moist textile materials." *Fibres & Textiles in Eastern Europe*.

Ruckman, J. E. (1997). "Water vapour transfer in waterproof breathable fabrics: Part 3: under rainy and windy conditions." *International Journal of Clothing Science and Technology*.

Sachdeva, R. C. (2006). "Fundamentals of Engineering Heat and Mass Transfer (SI Units)." New Age International Publishers.

Salaun, F. (2004). "Conception, élaboration de textiles réactifs: application à la thermorégulation." PhD thesis, université de Lille.

Saltin, B. and A. P. Gagge (1971). "Sweating and body temperatures during exercise." *Int J Biometeorol* 15(2): 189-194.

Sampath, M., et al. (2012). "Analysis of thermal comfort characteristics of moisture management finished knitted fabrics made from different yarns." 42(1): 19-33

Senecot, J. M. (2002). "Etude de l'imprégnation capillaire de tissus de verre (Doctoral dissertation, Université de Haute Alsace-Mulhouse)."

Shaid A, F. M., Wang L (2014). "Thermophysiological comfort analysis of aerogel nanoparticle incorporated fabric for fire fighter's protective clothing." *Chemical and Materials Engineering* 2(2): 37-42.

Skenderi Z, C. I. S., Srdjak M (2009). "Water vapour resistance of knitted fabrics under different environmental conditions." *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2 (73): 72-75.

Slater, K. (1985). "Human comfort." Thomas Publisher: 4.

Smith, C. J. and G. Havenith (2011). "Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia." *Eur J Appl Physiol* 111(7): 1391-1404.

Spencer-Smith, J. (1976). "The physical basis of clothing comfort. Part 1: General review." *Clothing Research Journal* 4(3): 126-138.

- Suprun, N. (2003). "Dynamics of moisture vapour and liquid water transfer through composite textile structures." *International Journal of Clothing Science and Technology* 15 (3/4) 218-223.
- Tagaya, H., et al. (1987). "Measurement of capillary rise in fabrics by electric capacitance method." *Sen'i Gakkaishi* 43(8): 422-430.
- Theulier, F. (1989). "Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III)."
- Threlkeld, J. L. (1970). "Thermal environmental engineering." Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Vol. 424.
- Varshney, R. K., Kothari, V. K., & Dhamija, S. (2010). A study on thermophysiological comfort properties of fabrics in relation to constituent fibre fineness and cross-sectional shapes. *The Journal of The Textile Institute*, 101(6), 495-505.
- Wang F, Z. X. a. W. S. (2009). "Development processes and property measurements of moisture absorption and quick dry fabrics." *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2 (73): 46-49.
- Wang, J. H., & Yasuda, H (1991). "Dynamic Water Vapor and Heat Transport Through Layered Fabrics: Part I: Effect of Surface Modification." *Textile Research Journal* 61(1): 10-20.
- Williams, J. T. (2009). *Textiles for cold weather apparel*, Elsevier.
- Yang, Y., et al. (2021). "Effect of knitting structure and yarn composition on thermal comfort properties of bi-layer knitted fabrics." 91(1-2): 3-17.
- Yao B, L. Y., Hu Y (2006). "An Improved Test Method for Characterizing The Dynamic Liquid Moisture Transfer in Porous Polymetric Materials " *Polymer Testing* 25: pp.677-689.
- Yoon, H. N., & Buckley, A (1984). " Improved comfort polyester: Part I: Transport properties and thermal comfort of polyester/cotton blend fabrics." *Textile Research Journal* 54(5): 289-298.
- Zhong, W., et al. (2006). "Textiles and human skin, microclimate, cutaneous reactions: an overview." *Cutan Ocul Toxicol* 25(1): 23-39.
- Zhuang, Q., Harlock, S. C., & Brook, D. B. (2002). "Longitudinal wicking of weft knitted fabrics: Part I: The development of an automatic wicking test method using image analysis." *Journal of the Textile Institute* 93(1): 88-96.

