

THÈSE DE DOCTORAT

Présentée et soutenue publiquement à
L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE I

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR
en Mécanique, Énergétique, Matériaux

par **Adeline Marolleau**

**Étude des mécanismes d'interaction sous-vêtement/peau pour
concevoir des textiles innovants en optimisant
le confort au porté**

Date de soutenance prévue le 6 février 2019 devant le jury d'examen

M. Fabien SALAÜN	Directeur de thèse
M. Daniel DUPONT	Co-encadrant
Mme Hayriye GIDIK	Co-encadrante
Mme Sylvie DUCEPT	Co-encadrante
Mme Margarita NEZNAKOMOVA	Rapporteur
M. Dominique ADOLPHE	Rapporteur
M. Laurent ZALEWSKI	Examineur
M. Gauthier BEDEK	Examineur

Remerciements

Tout d’abord, je souhaite remercier l’entreprise DAMART, à l’initiative du projet, pour la confiance qui m’a été accordé dans la réalisation de ces travaux de recherche. Je remercie tout particulièrement mes collègues du département de qualité pour leur très grande humanité et leur soutien sans faille face aux nombreuses interrogations suscitées pendant ces années de thèse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers le personnel et plus particulièrement les doctorants du laboratoire Génie des Matériaux Textiles (GEMTEX) sans qui ces années de doctorat n’auraient pas eu la même saveur. Les moments de convivialité partagés avec chacun de vous m’ont permis de m’enrichir professionnellement et humainement.

Je remercie chaleureusement les équipes et doctorants des laboratoires de pharmacochimie et de textile de la Haute École d’Ingénieur (HEI-Yncréa) qui m’ont accueilli les bras ouverts et soutenu dans les moments difficiles. Je les remercie d’avoir participer activement à ma culture « chimique » même si parfois nous ne parlons toujours pas le même langage.

J’exprime également ma gratitude à tous mes encadrants et notamment à mon directeur de thèse Fabien Salaün, maître de conférence HdR au GEMTEX, qui a toujours su se tenir disponible en m’apportant des conseils et une expertise précieuse pour le bon déroulement de cette thèse. Je remercie Daniel Dupont, maître de conférence HdR à HEI-Yncréa, pour son soutien technique dans les moments où plus rien ne semblait fonctionner. Une pensée également à Hayriye Gidik, docteur en mécanique énergétique matériaux, que je remercie pour son écoute chaleureuse et son investissement dans ce projet. Pour terminer, je remercie ma responsable industrielle Sylvie Ducept pour son expertise textile apportée à cette thèse, ainsi que les personnes du département de recherche et développement avec qui j’ai eu l’occasion d’échanger.

Je remercie également très chaleureusement ma famille pour leur soutien immense dans les bons comme les mauvais moments.

Acronymes

BET Brunauer-Emmet-Teller. 120–122, 128–130, 134, 147, 151–153

DVS Dynamic Vapor Sorption. 3, 66, 84, 112, 127, 130, 141, 143, 149, 151, 174, 181–184, 189, 191, 193

GAB Guggenheim-Anderson-Boer. 120–122, 128–130, 134, 147, 152, 153

HH Hailwood-Horrobin. 120, 143–147, 151–153

HR Humidité relative. 45–47, 54, 55, 62, 63, 66, 67, 73, 74, 102, 114, 119, 122, 124, 132, 136, 137, 139, 142, 143, 145, 148, 149, 151–153, 159, 160, 162, 172, 184, 186, 189–191

MMT Moisture Management Tester. 3, 53, 67, 68, 84, 101, 169, 171, 186, 188, 189, 191, 193

PEK Parallel Exponential Kinetics. 120, 123, 127, 144, 151–153

PMV Vote moyen prévisible. 81, 82, 84

PPD Pourcentage prévisible d'insatisfaits. 81, 82, 84

Symboles

A la surface du corps (m^2)	11, 80
$a_1 - a_0$ le changement de masse ($g.h^{-1}$)	59
A_{Ar} la constante d'Arrhenius	33
A_c la convection effective de la surface du corps	10
A_d la surface corporelle de DuBois	13
A_L la concentration du nombre de sites de sorption (Constante de Langmuir)	127
A_r la surface de radiation effective du corps	13
AR_{Bottom} le taux d'absorption en eau de la surface inférieure ($\%.s^{-1}$)	69
AR_{Top} le taux d'absorption en eau de la surface supérieure ($\%.s^{-1}$)	69
a_w l'activité de l'eau	121
b l'effusivité thermique ($J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$)	72
β la fraction d'humidité totale prise en multicouche	126
B_L la constante d'affinité de Langmuir	127
c_0 et k_0 les facteurs entropiques	122
C_1 et C_2 les concentrations de vapeur d'eau ($kg.m^{-3}$)	66, 74
C_e la constante d'énergie liée à la différence d'enthalpie libre	121, 122
c_{ext} la concentration de la vapeur d'eau au-dessus du textile ($g.m^{-3}$)	62
c_{int} la concentration de la vapeur d'eau en-dessous du textile ($g.m^{-3}$)	62
C_p la capacité calorifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	72
c_{pa} la capacité thermique de l'air ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	11
C_{res} les pertes convectives par respiration ($W.m^{-2}$)	11, 16
C_w la quantité totale d'eau (Modèle de Park)	127
D le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($m^2.s^{-1}$)	62
d le diamètre du pore (m)	38
δC la différence de concentration de vapeur d'eau ($g.m^{-3}$)	63, 65
$\Delta \dot{m}_w$ la quantité de vapeur d'eau transférée ($g.m^{-2}.s^{-1}$)	78

ΔH_c	le facteur correctif de la puissance de chauffe pour la R_{ct}	73
ΔH_e	le facteur correctif de la puissance de chauffe pour la R_{et}	73
$\delta_{\text{molécule}}$	le diamètre des molécules (m)	35
$\delta\Phi$	la différence d'humidité relative entre l'entrée et la sortie du gaz	65
$\Delta\Phi$	la différence d'humidité relative entre les entrées	65
δ_{pore}	le diamètre d'un pore (m)	36
ΔP_v	le gradient de pression de la vapeur d'eau (Pa)	78
d_{eq} ou R'	l'épaisseur d'air équivalente (mm)	62
D_K	le coefficient de diffusion de Knudsen ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)	36
D_v	le coefficient de diffusion moléculaire ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)	35, 36
e	l'épaisseur (m)	8, 10, 55
E_1	le module élastique du procédé rapide (GPa)	124
E_2	le module élastique du procédé lent (GPa)	124
E_a	l'énergie d'activation ($\text{J}.\text{mol}^{-1}$)	33
E_{diff}	les pertes de chaleur par diffusion naturelle à travers la peau ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	14
E_e	le flux de chaleur par évaporation ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	15
E_{max}	les pertes de chaleur cutanée maximale par évaporation ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	14, 15
$E\%$	le module d'écart moyen	127
ε	l'émissivité du corps	12
ε'	la contrainte au temps t (GPa)	123
ε_p	la porosité ouverte	30
ε_{sk}	l'émissivité de la peau	13
ε_t	la porosité totale	30
E_{res}	les pertes évaporatives par respiration ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	15, 16
E_{rsu}	les pertes de chaleur par évaporation de la sueur ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	14
E_{sk}	les pertes de chaleur cutanée par évaporation ($\text{W}.\text{m}^{-2}$)	13, 14, 16
η	la viscosité du liquide (Pa.s)	41
η_1	le module de viscosité du procédé rapide (GPa.s)	123
η_2	le module de viscosité du procédé lent (GPa.s)	123
F_{cl}	le facteur de réduction du vêtement	10, 13, 14, 17
H	la puissance fournie (W)	73, 79
h_c	le coefficient d'échange de chaleur par convection ($\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	10, 11, 15
H_{ct}	la puissance fournie pour la R_{ct} (W)	75
H_e	les pertes évaporatives de la peau vers l'environnement (W)	80

h_e	le coefficient de transfert de chaleur par évaporation ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	14, 15
H_{et}	la puissance fournie pour la R_{et} (W)	75
h_{fg}	la chaleur de vaporisation de l'eau (2423 kJ.kg^{-1})	15
H_l	l'enthalpie de sorption molaire à l'état liquide (kJ.mol^{-1})	122
H_m	l'enthalpie de sorption molaire en monocouche (kJ.mol^{-1})	122
H_n	l'enthalpie de sorption molaire en multicouche (kJ.mol^{-1})	122
H_p	le flux thermique généré par les pompes (W)	80
HR	l'humidité relative (%)	31
h_r	le coefficient d'échange de chaleur par radiation ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	12, 13
HR_{max}	la quantité d'eau prise à l'humidité relative maximale (%)	126
H_s	le flux thermique généré par les éléments chauffants du mannequin (W)	80
H_{yst}	l'hystérésis (%)	114
I_a	la résistance thermique de la lame d'air environnante ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$)	80
I_{mt}	l'indice de perméabilité	74, 183
K	la constante liée aux énergies d'interactions entre les molécules d'eau	122
k	la constante de vitesse	33
K_1	la constante d'équilibre de la monocouche	125
K_2	la constante d'équilibre entre l'eau sous forme vapeur et liquide	125
K_a	la constante d'équilibre des agrégats	127
k_B	la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$)	126
K_H	la constante de solubilité de Henry	127
K_n	le nombre de Knudsen	36
k_p	la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2)	41
K_{res}	la constante de proportionnalité ($2,58 \text{ kg.m}^2.\text{MJ}^{-1}$)	11
L	la longueur de l'échantillon (m)	32, 35, 41
λ	la conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	8, 72
λ_a	la conductivité thermique de l'air ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	9
λ_{ap}	la conductivité thermique apparente ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	9
λ_e	la chaleur issue de l'évaporation de l'eau à la température de la peau (J.g^{-1})	80
λ_f	la conductivité thermique de la fibre ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	9
λ_p	le facteur de pondération du réseau parallèle	10
λ_s	le facteur de pondération du réseau série	10
L_c	la chaleur latente de condensation de l'eau (J.g^{-1})	117
L_e	la longueur moyenne des lignes de flux (m)	32

lpm	le libre parcours moyen (m)	35, 36
LR	le coefficient de Lewis	15
M	la quantité d'eau totale ($\text{kg.kg}_{\text{solide}}^{-1} \text{ sec}$)	121, 122, 124
\dot{m}	le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	65, 66, 74
M_0	la quantité d'eau adsorbée en monocouche ($\text{kg.kg}_{\text{solide}}^{-1} \text{ sec}$)	121, 122
m_{cond}	la masse de l'échantillon conditionnée (g)	54, 55
$MC_{1,\%HR_i}$ ou MC_1	la quantité d'eau prise selon le procédé rapide (%)	122
$MC_{2,\%HR_i}$ ou MC_2	la quantité d'eau prise selon le procédé lent (%)	122
$MC_{t,\%HR_i}$ ou EMC	la quantité d'eau totale prise au temps t (%)	122
M_{desorp}	la quantité d'eau totale prise en désorption (%)	114, 126
met	l'activité métabolique	17
M_h	la quantité d'eau prise en monocouche (%)	124
m_i	les valeurs expérimentales	127
m_l	la masse d'eau liquide (kg)	30
M_m	la chaleur produite par métabolisme (W.m^{-2})	11, 16
M_{mol}	la masse molaire (g.mol^{-1})	39
M_p	la masse perdue (g)	58, 60
m_{pi}	les valeurs prédites par les modèles	127
m_{res}	le taux de respiration ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)	11
M_s	la quantité d'eau prise en multicouche (%)	124
m_s	la masse de la matrice solide (kg)	30
m_{sec}	la masse sèche en sortie d'étuve (g)	55
M_{sorp}	la quantité d'eau totale prise en sorption (%)	114, 126
$M_{\text{surfaique}}$	la masse surfaique (g.m^{-2})	54, 55
M_w	la masse moléculaire de la vapeur d'eau (g.mol^{-1})	65
m_{w1}	le taux d'humidité au sein du microclimat (g)	78
m_{w2}	le taux d'humidité après la période de transfert (g)	78
MWR_{Bottom}	le rayon de mouillure maximal de la surface inférieure (mm)	69
MWR_{Top}	le rayon de mouillure maximal de la surface supérieure (mm)	69
N	le nombre de données expérimentales	127
n	la concentration molaire (mol.m^{-3})	35
N_{AV}	le nombre d'Avogadro ($6,022 \times 10^{23} \text{ mol.m}^{-3}$)	35
OMMC	la capacité globale de diffusion d'humidité	44, 68
P_a	la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (kPa)	12, 14, 15, 73, 75, 79

P_c la pression capillaire (Pa)	38, 41
P_{ex} la pression saturante de l'air expiré (kPa)	15
P_g la pression du gaz (Pa)	39
Φ le coefficient de calibration	80
φ le temps	123
Φ_l le potentiel thermodynamique du liquide ($J.kg^{-1}$)	39
Φ_m le flux massique ($g.s^{-1}$)	35
$\frac{\varphi}{\Delta t}$ le taux d'eau fourni ($g.s^{-1}$)	80
Φ_v le potentiel thermodynamique de la phase vapeur ($J.kg^{-1}$)	39
P_l la pression de la phase liquide (Pa)	39
P_m la pression partielle saturante de vapeur d'eau (Pa)	73, 79
$P_{porosité}$ la porosité (%)	55
P_{sat} ou p_{ss} la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa)	31, 39, 65, 80
Ψ le potentiel capillaire (Pa)	38
Ψ_{air} le flux d'air ($m^3.s^{-1}$)	62
Ψ_{eau} le flux massique ($g.s^{-1}$)	62
ψ_f la fraction de surface couverte	126
$P_{sk,s}$ ou p_s la pression de la vapeur d'eau à la surface de la peau (kPa)	14, 15, 80
P_t la pression totale atmosphérique (kPa)	12, 15
P_v la pression de la vapeur d'eau (Pa)	31, 75
P_{vap} la pression de la phase vapeur (Pa)	39
Q le flux volumétrique ($m^3.s^{-1}$)	66, 74
Q_{cond} le flux de chaleur par conduction ($W.m^{-2}$)	8
Q_{conv} la densité de flux de chaleur par convection ($W.m^{-2}$)	10
Q_e la masse de vapeur d'eau passant à travers le système (g)	63
Q_l la chaleur de l'eau absorbée sous forme liquide ($J.g^{-1}$)	117
q_l la chaleur de sorption des molécules d'eau liées à la surface fibreuse ($J.mol^{-1}$)	126
Q_p la quantité d'eau perdue ($g.s^{-1}$)	80
Q_{rad} la densité de flux de chaleur par rayonnement ($W.m^{-2}$)	12
Q_s le flux volumétrique ($m^3.s^{-1}$)	65
Q_v la chaleur de l'eau absorbée sous forme vapeur ($J.g^{-1}$)	117
q_v le flux volumétrique à travers la partie supérieure ou inférieure ($m^3.s^{-1}$)	65
R l'indice de transport	39, 68, 70
r le rayon du pore (m)	36

R_a	la résistance thermique de l'air ($m^2.K.W^{-1}$)	10
$R_{a,e}$	la résistance à la vapeur d'eau de la lame d'air environnante ($Pa.m^2.W^{-1}$)	80
R_{ap}	la résistance thermique apparente ($m^2.K.W^{-1}$)	9
R_c	le rayon de courbure (m)	38
R_{cl}	la résistance thermique du vêtement ($m^2.K.W^{-1}$)	17
R_{ct}	la résistance thermique ($m^2.K.W^{-1}$)	73, 75, 79
R_{ct0}	la résistance thermique à vide ($m^2.K.W^{-1}$)	73, 79
R_{dtot}	la résistance totale à la diffusion de la vapeur d'eau ($s.m^{-1}$)	65
$R_{e,cl}$	la résistance évaporative du vêtement ($m^2.kPa.W^{-1}$)	14
R_{es}	la résistance à la vapeur d'eau de la peau ($Pa.m^2.W^{-1}$)	80
R_{et}	la résistance à la vapeur d'eau ($m^2.K.W^{-1}$)	73, 75, 79
R_{et0}	la résistance à la vapeur d'eau à vide sans textile ($m^2.K.W^{-1}$)	73
R_f	la résistance thermique de la fibre ($m^2.K.W^{-1}$)	10
R_{gz}	la constante des gaz parfait ($8,3145 J.mol^{-1}.K^{-1}$)	33, 65, 122
$R \times H_a$	l'humidité relative de l'environnement	80
ρ	la masse volumique ($kg.m^{-3}$)	35, 55, 72
ρ_l	la masse volumique de la phase liquide ($kg.m^{-3}$)	39
r_s	le rayon de l'échantillon (m)	62
R_t	la résistance à la vapeur d'eau totale ($Pa.m^2.W^{-1}$)	80
R_{tdyn}	la résistance évaporative dynamique totale ($m^2.kPa.W^{-1}$)	14
R_{th}	la résistance thermique équivalente ($m^2.K.W^{-1}$)	8
$R_{th,total}$	la résistance thermique totale ($m^2.K.W^{-1}$)	8
S	la surface de test de l'échantillon (m^2)	54, 58–60, 63, 65, 66, 73–75, 78, 79
S'	une constante ($60 Pa.K^{-1}$)	74
S_{cr}	la chaleur stockée par le corps ($W.m^{-2}$)	16
σ	la tension interfaciale ($N.m^{-1}$)	38
σ_0	la contrainte appliquée au sein de la structure fibreuse (GPa)	123, 124
σ_B	la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^8 W.m^{-2}.K^{-4}$)	12, 13
SR	le degré de saturation	31
SS_{Bottom}	la vitesse de diffusion de la surface inférieure ($mm.s^{-1}$)	69
S_{sk}	la chaleur stockée par la peau ($W.m^{-2}$)	16
SS_{Top}	la vitesse de diffusion de la surface supérieure ($mm.s^{-1}$)	69
T	la température (K)	33, 39, 122
t	le temps (h ou s)	58, 60, 63

T_1 et T_2 les températures des deux corps (K)	12
t_1 le temps caractéristique du procédé rapide (s)	123
t_2 le temps caractéristique du procédé lent (s)	123
T_a la température de l'air (K)	10, 11, 17, 73, 75, 79, 80
τ la tortuosité	32
T_{cl} la température à la surface du vêtement (K)	17
T_e la température des conditions expérimentales (K)	126
T_{eau} le taux de reprise en eau réel (%)	55
θ_f la fraction de la quantité totale d'eau prise en monocouche	126
θ la fraction volumique	31
T_{ex} la température de l'air expiré (K)	11
T_m la température de la plaque chaude gardée transpirante (K)	73, 75
T'_m la température de la peau artificielle (K)	79
T_o la température uniforme d'une pièce imaginaire noire (K)	17
\bar{T}_r la température moyenne radiative (K)	12, 13, 17
T_s la température de référence (K)	65
T_{sk} la température de la peau (K)	8, 17, 80
\bar{T}_{sk} la température moyenne de la peau (K)	10, 13, 14
T_{solide} la température de la surface du solide en contact (K)	8
T_{vap} le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$)	78
u la fraction massique	30, 31
u_{sat} la teneur en eau à saturation	31
V_a la fraction volumique de l'air	9, 10
v_a la vitesse de l'air (m.s^{-1})	11
v_{ar} la résultante de la vitesse de l'air (m.s^{-1})	11
V_c la vitesse apparente du liquide (m.s^{-1})	41
V_f la fraction volumique de la fibre	9, 10
V_g le volume gazeux (m^3)	30
V_l le volume du liquide (m^3)	30, 31
\bar{v} la vitesse moyenne des molécules (m.s^{-1})	36
V_p le volume des pores accessibles (m^3)	30
V_t le volume total (m^3)	30, 31
W la nombre de sites de sorption libre	124
w la mouillure de la peau	13–15

W_a	le quotient d'humidité de l'environnement	11, 12, 15
W_c	la chaleur de mouillage ($J.g^{-1}$)	119
W_{ex}	le quotient d'humidité de l'air expiré	15
WT_{Bottom}	le temps de mouillure de la surface inférieure (s)	68
WT_{Top}	le temps de mouillure de la surface supérieure (s)	68
WVTR	le taux de transmission de la vapeur d'eau ($g.h^{-1}.m^{-2}$)	58–60, 66
W_w	le travail fourni par le corps ($W.m^{-2}$)	16
X	la concentration de la vapeur d'eau ($m_{eau}.m_{masse}^{-1}$)	35

Sommaire

Remerciements	iii
Acronymes	v
Symboles	vii
Sommaire	xv
Liste des tableaux	xxi
Table des figures	xxv
Introduction	1
1 Le confort	5
1.1 Définition du confort	6
1.1.1 Aspect physique	7
1.1.1.1 Conduction	8
1.1.1.2 Convection	10
1.1.1.3 Radiation	12
1.1.1.4 Évaporation	13
1.1.1.5 Bilan thermique	16
1.1.2 Aspect physiologique	17
1.1.2.1 La peau	18
1.1.2.2 Rôle de l'hypothalamus	21
1.1.2.3 Thermogenèse	23
1.1.2.4 Thermolyse	25
1.1.3 Aspect psychologique	26
1.1.3.1 Intégration et évaluation des stimuli sensorielles	27
1.1.3.2 Formulation du ressenti	28
1.1.3.3 Influence des facteurs physiques et physiologiques	28
1.2 Milieu poreux	29
1.2.1 Définition	29
1.2.2 Grandeurs caractéristiques du milieu poreux	30

1.2.3	Transferts hydriques	32
1.2.3.1	Liaisons eau-fibres	32
1.2.3.2	Types de transfert	34
1.3	Impact des fibres sur le confort	41
1.3.1	Transferts statiques	41
1.3.2	Transferts dynamiques	44
1.3.2.1	Modèle de Min	44
1.3.2.2	Modèle de Fenghzi	45
1.3.2.3	Modèle de Xu	46
1.3.3	Conclusion	48
1.4	Impact du vêtement sur le confort	48
1.4.1	Mouvement du vêtement	48
1.4.2	Caractéristiques physiques du vêtement	51
1.4.3	Conclusion	53
1.5	Évaluation du confort	54
1.5.1	Tests usuels	54
1.5.1.1	Masse surfacique	54
1.5.1.2	Épaisseur	54
1.5.1.3	Perméabilité à l'air	55
1.5.1.4	Porosité	55
1.5.1.5	Taux de reprise en eau réel	55
1.5.2	Transfert de la vapeur d'eau	55
1.5.2.1	Méthode des récipients	55
1.5.2.2	Diffusiomètre	61
1.5.2.3	Tube R	62
1.5.2.4	DMPC	63
1.5.2.5	Appareil de Huang	65
1.5.2.6	DVS	66
1.5.3	Transfert de l'eau liquide	67
1.5.4	Transfert thermique	70
1.5.4.1	Alambeta	71
1.5.4.2	Disque chaud	71
1.5.5	Transferts thermique et hydrique	72
1.5.5.1	Plaque chaude gardée transpirante (Skin Model)	72
1.5.5.2	Appareils dérivés du Skin Model	74
1.5.5.3	Mannequin transpirant mobile	79
1.5.6	Essais au porté	80
1.5.6.1	Indices PMV et PPD	81
1.5.6.2	Détermination de l'hydratation cutanée	82
1.5.7	Conclusion	84
1.6	Conclusion	84

2	Matériaux et méthodes	91
2.1	Matériaux et structures textiles utilisés	91
2.1.1	Fibres naturelles	91
2.1.2	Fibres artificielles	94
2.1.3	Fibres synthétiques	95
2.1.4	Structures textiles	99
2.2	Caractérisation des textiles utilisés	100
2.2.1	Transferts thermo-hydriques	101
2.2.2	Essais au porté	102
2.3	Évaluation de l'impact des textiles sur le confort	103
2.3.1	Influence de la structure du textile	104
2.3.2	Propriétés thermophysiques	104
2.3.3	Transferts statiques thermo-hydriques	105
2.3.4	Transfert dynamique et gestion hydrique	105
2.3.5	Conclusion	108
3	Évaluation des transferts hydriques quasi-statiques et dynamiques	111
3.1	Essais quasi-statique par DVS	112
3.1.1	Isothermes de sorption/désorption	112
3.1.1.1	Généralité	112
3.1.1.2	Phénomène d'hystérésis	114
3.1.1.3	Paramètres influençant la sorption/désorption d'eau	116
3.1.2	Modélisation des isothermes	120
3.1.2.1	Modèles de BET et BET modifié	120
3.1.2.2	Modèle de GAB	121
3.1.2.3	Modèle de PEK	122
3.1.2.4	Modèle HH	124
3.1.2.5	Modèle de Young-Nelson	125
3.1.2.6	Modèle de Park	126
3.1.2.7	Autres modèles existants	127
3.1.3	Application aux essais DVS	127
3.1.3.1	Modèles de BET, BET modifié et de GAB	128
3.1.3.2	Modèle de PEK	131
3.1.3.3	Modèle HH	143
3.1.3.4	Modèle de Young-Nelson	146
3.1.3.5	Modèle de Park	149
3.1.3.6	Conclusion	151
3.2	Réalisation d'un banc de mesure, essais en dynamique	154
3.2.1	Construction du banc de mesure	155
3.2.1.1	Réalisation du cadre	155
3.2.1.2	Instrumentation du cadre	156
3.2.2	Protocoles de caractérisation	160
3.2.2.1	Protocole 1 : transfert forcé de la vapeur d'eau	160

3.2.2.2	Protocole 2 : évaporation de l'eau liquide	162
3.2.3	Résultats et interprétation	162
3.2.3.1	Protocole 1	162
3.2.3.2	Protocole 2	173
3.2.4	Conclusion	174
3.3	Conclusion	174
4	Comparaison entre les méthodes de mesures	181
4.1	Comparaison entre le Skin Model, le DVS, le récipient renversé avec desiccant et le cadre	181
4.1.1	Comparaison des mesures avec le cadre et le DVS	182
4.1.2	Influence de la texture sur la pente, I_{mt} et W_d	183
4.1.3	Conclusion	183
4.2	Comparaison entre les essais au porté, DVS, MMT et cadre	184
4.2.1	Comparaison entre les essais au porté et le DVS en sorption	184
4.2.1.1	Première étude	184
4.2.1.2	Seconde étude	185
4.2.1.3	Conclusion	186
4.2.2	Comparaison des essais au porté avec le MMT, le cadre et le DVS	186
4.2.2.1	Comparaison entre les essais au porté et le MMT	186
4.2.2.2	Comparaison des résultats MMT avec ceux du cadre	187
4.2.2.3	Comparaison entre le cadre et le DVS en désorption.	189
4.2.2.4	Conclusion	189
4.3	Conclusion	190
	Conclusion	193
	Bibliographie	195
A	Composition, caractéristiques physiques et thermo-hydriques des textiles	207
A.1	Détail de la composition des textiles étudiés	207
A.2	Caractéristiques physiques	207
A.3	Caractéristiques thermo-hydriques	207
B	Moisture Management Tester (MMT)	211
B.1	Données numériques	211
B.2	Courbes et schémas explicatifs	213
C	Modélisation des essais DVS	219
C.1	Modèle de PEK	220
C.1.1	Contenu en eau	220
C.1.2	Temps	220
C.1.3	Module d'élasticité	220
C.1.4	Module de viscosité	220

C.1.5 Hystérésis	220
C.2 Modèle HH	220
C.2.1 Courbes du modèle HH avec PEK	220
C.2.2 Courbes de vérification des équations	220
C.3 Modèle de Young-Nelson	220
D Banc de mesure (Cadre)	233
D.1 Équations de calibration des capteurs	233
D.2 Résultats protocole 1	235
D.3 Analyse statistique	235
D.3.1 Pentes	235
D.3.2 Temps T_1	235
D.4 Régression linéaire multiple	235
D.4.1 Modèle 1	235
D.4.2 Modèle 2	235

Liste des tableaux

1.1	Fibres nerveuses associées aux différents récepteurs thermosensibles. . .	22
1.2	Évaluation de l'astreinte thermique.	28
1.3	Taille des pores.	31
1.4	Classement des matériaux poreux.	32
1.5	Conductivités thermiques des fibres.	42
1.6	Méthode du récipient droit avec l'eau.	57
1.7	Méthode du récipient droit avec desiccant.	57
1.8	Pot renversé avec desiccant.	59
1.9	Paramètre de l'échantillon de référence.	60
1.10	Méthode du plateau tournant selon la norme BS7209 :2009.	61
1.11	Notation des indices obtenus avec le MMT.	70
1.12	Échelle de sensation thermique PMV.	81
1.13	Quantité d'eau dans les différentes couches de la peau.	82
2.1	Composition de la fibre de coton	93
2.2	Résumé des propriétés des différentes fibres.	99
2.3	Composition des échantillons jersey.	100
2.4	Composition des échantillons interlock 1 × 1.	100
2.5	Caractéristiques physiques des échantillons interlock 1 × 1.	100
2.6	Caractéristiques physiques des échantillons jersey.	101
2.7	Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons jersey.	102
2.8	Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons interlock 1 × 1. .	102
2.9	Analyse de Pearson contexture interlock 1 × 1.	104
2.10	Analyse de Pearson contexture jersey.	104
3.1	Chaleur d'adsorption de différentes fibres.	118
3.2	Chaleur de mouillage pour différentes fibres.	119
3.3	Chaleur produite par 1 kg de matière pour différentes fibres.	119
3.4	Influence de l'application d'un effort mécanique axial sur la cellulose. . .	120
3.5	Composition des échantillons textiles étudiés en DVS.	128
3.6	M_0 et C_e en sorption pour les modèles de BET, BET modifié et GAB. . . .	128
3.7	M_0 et C_e en désorption pour les modèles de BET, BET modifié et GAB. . .	129
3.8	Analyse de Pearson des modèles BET, BET modifié et GAB en sorption. . .	130
3.9	Analyse de Pearson des modèles BET, BET modifié et GAB en désorption. .	130

3.10	Analyse du contenu en eau pour les textiles avec polyacrylate.	133
3.11	Analyse du contenu en eau pour les textiles avec viscose.	134
3.12	Analyse du contenu en eau pour les autres textiles.	135
3.13	Analyse du module d'élasticité pour les textiles avec polyacrylate.	137
3.14	Analyse du module d'élasticité pour les textiles avec viscose.	138
3.15	Analyse du module d'élasticité pour les autres textiles.	139
3.16	Analyse du module de viscosité pour les textiles avec polyacrylate.	140
3.17	Analyse du module de viscosité pour les textiles avec viscose.	140
3.18	Analyse du module de viscosité pour les autres textiles.	141
3.19	Aire de l'hystérésis des échantillons textiles.	143
3.20	Résultats obtenus pour le modèle HH en sorption.	145
3.21	Analyse de Pearson du modèle HH.	146
3.22	Résultats obtenus pour le modèle Young-Nelson en sorption.	147
3.23	Analyse de Pearson du modèle de Young-Nelson en sorption.	148
3.24	Paramètres extraits du modèle de Park en sorption.	149
3.25	Paramètres extraits du modèle de Park en désorption.	150
3.26	Analyse de Pearson du modèle de Park en sorption.	150
3.27	Analyse de Pearson du modèle de Park en désorption.	150
3.28	Capteur d'humidité résistif.	157
3.29	Capteur d'humidité capacitif.	157
3.30	Capteur d'humidité à conductivité thermique.	158
3.31	Résultats des pentes mesurées avec le cadre pour les textiles jersey.	163
3.32	Résultats des pentes mesurées avec le cadre pour les textiles interlock 1 × 1.163	
3.33	Résultats des temps T_1 mesurés avec le cadre pour les textiles jersey.	164
3.34	Résultats des temps T_1 mesurés avec le cadre pour les textiles interlock.	164
3.35	Résultats statistiques des pentes mesurées.	166
3.36	Résultats statistiques des temps T_1	166
3.37	Modèle 1 des mesures de pente et T_1	169
3.38	Modèle 2 des mesures de pente et T_1	170
4.1	Cadre, DVS, Skin Model et récipient renversé avec desiccant.	182
4.2	Résultats DVS en sorption comparés à la première étude DermScan.	185
4.3	Résultats DVS en sorption comparés à la seconde étude DermScan.	185
4.4	Résultats MMT des échantillons testés au porté.	186
4.5	Résultats du cadre pour les échantillons testés au porté.	188
A.1	Composition des échantillons textiles étudiés.	208
A.2	Caractéristiques physiques des échantillons textiles étudiés.	208
A.3	Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons textiles étudiés.	209
B.1	Résultats MMT des échantillons textiles étudiés.	212
C.1	Modèle de PEK : résumé de l'analyse du contenu en eau.	222
C.2	Modèle de PEK : résumé de l'analyse du module d'élasticité.	225

C.3	Modèle de PEK : résumé de l'analyse du module de viscosité.	227
C.4	Modèle HH : coefficients calculés.	227
C.5	Modèle Young-Nelson : coefficients calculés.	231
D.1	Résultats des pentes mesurées avec le cadre.	235
D.2	Résultats des temps T_1 mesurés avec le cadre.	236

Table des figures

1.1	Facteurs influençant le confort.	7
1.2	Modèle à deux nœuds.	16
1.3	Représentation schématique de la thermorégulation.	18
1.4	Structure de la peau.	19
1.5	Températures d'activation des récepteurs.	20
1.6	Comportement dynamique des thermorécepteurs.	21
1.7	Représentation schématique de l'hypothalamus.	22
1.8	Système nerveux.	23
1.9	Représentation schématique du système vasculaire.	24
1.10	Anastomoses artério-veineuses (AVA).	25
1.11	Glandes sudoripares apocrine et eccrine.	26
1.12	Aires sensibles.	27
1.13	Milieu poreux.	29
1.14	Tortuosité.	32
1.15	Représentation moléculaire de la molécule d'eau.	33
1.16	Liaisons directes et indirectes.	33
1.17	Sorption des molécules d'eau sur une fibre polymère.	34
1.18	Diffusion moléculaire.	35
1.19	Diffusion de Knudsen.	36
1.20	Diffusion de surface.	37
1.21	Transport de l'humidité par capillarité.	37
1.22	Forme de l'interface capillaire.	38
1.23	Effet de la courbure d'interface.	39
1.24	Phénomène d'évaporation et de condensation dans un pore.	40
1.25	Modèle de Fenghzi, perte de chaleur sèche et latente.	45
1.26	Modèle de Fenghzi, perte de chaleur totale.	46
1.27	Modèle de Xu, cas 1 de la température variable.	47
1.28	Modèle Xu, cas 2 de l'humidité variable.	47
1.29	Impact des lames d'air sur les résistances thermiques et hydriques.	49
1.30	Influence de la vitesse du vent sur l'isolation du vêtement.	50
1.31	Effet des mouvements de l'air et du corps sur les lames d'air.	50
1.32	Influence de la vitesse de marche et de l'air sur l'isolation du vêtement.	51
1.33	Isolation du textile en fonction de son épaisseur.	52

1.34	Méthode du récipient droit avec l'eau.	56
1.35	Méthode du récipient droit avec desiccant.	57
1.36	Méthode du récipient renversé.	58
1.37	Récipient renversé avec desiccant.	59
1.38	Représentation schématique du plateau tournant.	61
1.39	Diffusiomètre DREO.	61
1.40	Tube R.	63
1.41	DMPC.	63
1.42	Test de diffusion.	64
1.43	Test combiné de convection/diffusion.	64
1.44	Appareil de Huang.	65
1.45	Représentation schématique du DVS.	67
1.46	Principe du MMT.	67
1.47	Courbe obtenue en MMT.	68
1.48	Description de l'Alambeta.	71
1.49	Disque chaud.	71
1.50	Skin Model.	72
1.51	Appareil de Huang seconde version.	74
1.52	Permetest.	75
1.53	Description du Skin model vertical.	76
1.54	Plaque chaude gardée transpirante dynamique.	77
1.55	Évolution de l'humidité dans le microclimat.	78
1.56	Mannequin transpirant mobile.	79
1.57	Représentation graphique de PPD en fonction de PMV.	82
1.58	Principe de fonctionnement du cornéomètre.	83
2.1	Structure de la fibre de coton.	92
2.2	Formule chimique de la cellulose.	93
2.3	Sorption d'une molécule d'eau sur la cellulose.	94
2.4	Procédés de filage.	95
2.5	Représentation schématique de la fibre PET.	96
2.6	Formule chimique de l'acrylonitrile.	96
2.7	Formule chimique du polyacrylate.	97
2.9	Formule chimique du polyuréthane.	98
2.10	Contexture des textiles étudiés.	99
2.11	Résultats DermScan première étude.	103
2.12	Résultats DermScan seconde étude.	103
2.13	Schéma MMT des échantillons avec polyacrylate.	107
2.14	Schéma MMT des échantillons avec viscose.	107
2.15	Schéma MMT des échantillons avec coton.	108
2.16	Schéma MMT des échantillons avec polyester.	108
3.1	Forme des isothermes de sorption.	113
3.2	Isothermes de sorption/désorption.	113

3.3	Pore en forme de bouteille d'encre.	115
3.4	Modification de l'angle de contact par une impureté.	115
3.5	Modification de l'angle de contact en fonction du type de surface.	116
3.6	Gonflement de la fibre.	116
3.7	Influence de la température.	117
3.8	Chaleur d'adsorption.	118
3.9	Chaleur de mouillage.	118
3.10	Influence du taux d'humidité sur la masse volumique.	120
3.11	Modèle de BET.	121
3.13	Hystérésis de l'ensemble des échantillons textiles.	142
3.15	Paramètres M_h et M_s calculés et issus du modèle HH.	145
3.16	Modèle de Young-Nelson, sorption monocouche, externe et interne.	148
3.17	Mécanismes de sorption des textiles avec polyacrylate.	152
3.18	Mécanismes de sorption des textiles avec viscose.	153
3.19	Mécanismes de sorption des textiles CO _{95%} -EA _{5%} -J et PAN _{50%} -PET _{50%} -I.	154
3.20	Représentation schématique du cadre.	155
3.21	Position des capteurs à la surface de la plaque inférieure.	156
3.22	Capteur résistif de type 1.	156
3.23	Capteur résistif de type 2.	157
3.24	Capteur capacitif.	158
3.25	Capteurs d'humidité à conductivité thermique.	158
3.26	Capteur d'humidité résistif EFS-10.	159
3.27	Schéma électrique.	160
3.28	Équation de calibration du capteur HR1.	160
3.29	Schéma explicatif du protocole 1.	161
3.30	Modélisation des essais en sigmoïde.	161
3.31	Schéma explicatif du protocole 2.	162
3.32	Boîte à moustaches des pentes et temps T_1	167
3.33	Pentes mesurées inversement corrélées avec le taux de reprise en eau réel.	168
3.34	Représentation des pentes et des temps T_1 mesurés.	172
3.35	Essais PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J selon le protocole 2.	173
4.1	Résultats MMT pour les échantillons testés au porté.	187
4.2	Résultats du cadre pour les échantillons testés au porté.	188
4.3	Contribution du mécanisme rapide entre 40 et 90 %HR en désorption.	189
B.1	MMT : gestion de l'eau liquide par CO _{100%} -I.	213
B.2	MMT : gestion de l'eau liquide par CO _{95%} -EA _{5%} -J.	214
B.3	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{85%} -PAC _{15%} -I.	214
B.4	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J.	215
B.5	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I.	215
B.6	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J.	216
B.7	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J.	216
B.8	MMT : gestion de l'eau liquide par PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J.	217

B.9	MMT : gestion de l'eau liquide par PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J.	217
C.1	Modèle de PEK : contenu en eau des échantillons textiles.	221
C.2	Modèle de PEK : temps des échantillons textiles.	223
C.3	Modèle de PEK : module d'élasticité des échantillons textiles.	224
C.4	Modèle de PEK : module de viscosité des échantillons textiles.	226
C.5	Modèle de PEK : Hystérésis.	228
C.6	Comparaison modèle HH et PEK.	229
C.7	Modèle HH : comparaison avec M_h et M_s calculés.	230
C.8	Modèle de Young-Nelson.	232
D.1	Équation de calibration du capteur HR1.	233
D.2	Équation de calibration du capteur HR2.	234
D.3	Équation de calibration du capteur HR3.	234
D.4	Équation de calibration du capteur HR4.	234
D.5	Analyse statistique des pentes.	237
D.6	Analyse statistique des temps T_1	238
D.7	Droites de Henry et histogrammes des modèles 1.	239
D.8	Droites de Henry et histogrammes des modèles 2.	239

Introduction

Depuis 1953, Damart a construit son label thermolactyl sur la fibre chlorofibre, fibre PVC aux propriétés exceptionnelles, peu conductrice, hydrophobe, conférant un pouvoir isolant élevé au vêtement même en situation « humide ». L'hypothèse scientifique de ce projet repose sur l'observation que la majorité des étoffes fonctionnelles chaudes et respirantes (essentiellement 100 % synthétique) accentue la déshydratation cutanée et par cela engendre des sensations d'inconfort au toucher (picotement, irritation). Ce projet de recherche a pour but de mieux comprendre les interactions sous-vêtement (première couche de vêtement) – peau et plus précisément la gestion hydrique des étoffes afin de maintenir un seuil d'hydratation cutanée optimum.

Le confort est un paramètre important lors de la conception de tout vêtement. Il dépend notamment des conditions environnementales (température et humidité relative) et des propriétés du textile (nature, densité, épaisseur, toucher, etc.). Le confort thermique est un état de satisfaction dans les conditions ambiantes, i.e. le porteur n'a ni trop chaud ni trop froid. Des moyens de caractérisation sont développés pour une normalisation de cette notion subjective. Le port d'un vêtement, structure textile composée de fils et de fibres, modifie la sensation de confort. Il peut s'agir de tissus (entrecroisement de fils de chaîne et de fils de trame), de tricotés (entrelacement de fils par la formation de mailles) ou de non-tissés (entremêlement par une disposition aléatoire de fibres). Le confort est également gouverné par l'existence d'un microclimat, i.e. la lame d'air entre le vêtement et la peau, dans lequel se produisent les échanges de chaleur et d'humidité. Ce microclimat ainsi généré dépend de la température de l'air confiné, de son humidité relative, du temps de confinement et de son renouvellement. En effet, lors d'une activité physique, les mouvements induisent une circulation d'air dans la lame d'air. L'observation du microclimat nous permet de mieux comprendre les mécanismes de thermorégulation mis en jeu. La combinaison de différents paramètres tels que les conditions environnementales (température ambiante, humidité relative de l'air), les variables humaines comme la réponse physiologique aux variations extérieures mais aussi l'aspect psychologique de la personne, les caractéristiques du vêtement telles que les propriétés physico-chimiques de la structure textile ainsi que son style, engendre des modifications des propriétés du microclimat et donc des variations dans la sensation de confort. Cette thèse a pour but de comprendre, analyser et documenter les mécanismes d'interaction sous-vêtement/peau sous les aspects hydriques en régime transitoire afin d'optimiser la conception des textiles fonctionnels innovants et notamment en amélio-

rant sensiblement le « confort au toucher » par une gestion contrôlée de l'hydratation cutanée. Ainsi, les travaux de cette thèse s'axe sur les deux objectifs suivants.

1. Caractérisation hydrique en dynamique, modélisation des mécanismes mis en jeu et création d'un banc de mesure fiable et référent.

La caractérisation du comportement dynamique d'une étoffe en lien avec le confort thermo-hydrique est un enjeu majeur pour permettre de comprendre les phénomènes complexes s'opérant au niveau du microclimat entre la surface cutanée et le sous-vêtement. L'homme est homéotherme et pour se maintenir en vie il doit conserver une température interne stable quelles que soient les conditions thermiques du milieu dans lequel il évolue. La fonction première du vêtement est donc de nous protéger de l'environnement extérieur et de limiter les pertes calorifiques. Le confort dépend des conditions environnementales (vent, température, humidité relative), mais aussi des diverses pertes thermiques qui sont mises en jeu lors des situations du quotidien (convection, conduction, rayonnement, évaporation). Ainsi, l'importance de comprendre et d'analyser la gestion dynamique des flux hydriques de l'interface vestimentaire située entre le porteur et son environnement est d'une grande importance. Il n'existe actuellement aucun matériel fiable permettant de caractériser et de modéliser les performances hydriques des étoffes à l'interface peau/sous-vêtement en régime transitoire, ce qui représente le premier verrou technologique de cette étude. Une fois réalisé, ce banc de mesure sera utilisé pour simuler et modéliser les transferts hydriques dynamiques à travers différentes structures textiles dans le but de définir de nouveaux cahiers des charges fonctionnels et de lancer de nouveaux développements innovants.

2. Amélioration/optimisation fonctionnelle des textiles DAMART dans les contraintes industrielles.

Depuis une dizaine d'années, de nouvelles fibres permettant une gestion plus dynamique des pertes thermiques émergent. Ainsi, des fibres chargées en nanoparticules de nature organiques ou céramiques agissant sur les propriétés radiatives sont apparues sur le marché tel que la fibre EMANA® (polyamide 6/6 chargés en nanoparticule de céramique) revendiquée pour ses propriétés amincissantes, la fibre QUANTUM ENERGY® (polyester chargé en minéraux) à la capacité de « générer de la chaleur » tout en « gérant la transpiration », la fibre CELLIANT® (chargé en nanoparticules de céramique) absorbe les pertes radiatives corporelles pour procurer une isolation thermique et la fibre CERAM® (acrylique chargé en nanoparticules de céramique) permet de gérer les pertes radiatives. Par ailleurs, d'autres fibres ont la capacité de gérer les flux hydriques tel que la fibre COOLMAX® drainant l'humidité corporelle vers l'environnement, la fibre PORITY® (polyester) absorbant la transpiration, la fibre EKS® (polyacrylate) possédant une capacité d'absorption exceptionnelle et la fibre BEMBERG® (fibre entourant la graine de coton) permettant d'absorber 30 % d'humidité tout en ayant une bonne capacité à évacuer l'eau. C'est dans ce contexte d'innovation que Damart a mis au point la nouvelle génération de fibres Thermolactyl. Alors

que l'essentiel des technologies s'intéresse à l'évacuation de l'humidité corporelle, aucune ne s'intéresse à l'interaction textile – peau et à l'impact sur l'hydratation cutanée. En effet, une respirabilité améliorée et un transfert hydrique optimisé impliquent des problèmes d'inconfort liés à l'assèchement de la barrière cutanée. Sur une cible sénior (55 ans et plus), ces effets sont accentués par une plus grande sensibilité des porteurs et par un assèchement prononcé en fonction de l'âge. Il est donc important de pouvoir développer une gamme de produits capable de maintenir une hydratation cutanée optimale dans des conditions d'activité modérée.

La première partie consiste à définir la notion de confort en décrivant ses aspects physique, physiologique et psychologique. Le confort d'un individu est également impacté par la nature des fibres constituant les vêtements (naturelles, synthétiques). En fonction de leur composition chimique, définissant leur capacité à créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau, le comportement hydrique des textiles diffère lors des processus de sorption et de désorption. Le style du vêtement peut augmenter ou diminuer les échanges avec le milieu extérieur (ouvertures, taillant). Pour comprendre et optimiser le confort au porté, différentes méthodes et appareillages existent pour mesurer les transferts thermo-hydriques au sein des matériaux fibreux. La deuxième partie s'axe sur la description des fibres constituant les échantillons étudiés et les méthodes de mesures caractérisant ces étoffes. L'évaluation de l'impact des caractéristiques physiques du textile sur les transferts thermo-hydriques est évaluée selon une étude de Pearson. Cette étude permet d'étudier la corrélation linéaire existante entre deux variables. La troisième partie s'oriente vers l'étude des transferts hydriques (quasi-statique et dynamique) au sein des matériaux poreux. La sorption/désorption en vapeur d'eau des textiles est mesurée selon la méthode Dynamic Vapor Sorption (DVS). Suivant la nature des fibres contenues dans les textiles, la modélisation des données obtenues permet de distinguer des comportements hydriques différents. Les échanges dynamiques à travers les textiles sont déterminés en réalisant un banc d'essai (cadre). Ce dernier modélise l'effet du microclimat en se rapprochant des essais au porté. La vitesse de transfert des molécules d'eau lors de la désorption et le temps T_1 d'enclenchement de ce processus sont mesurés. La quatrième partie s'intéresse à mettre en relation les résultats obtenus avec le DVS, le cadre, le Moisture Management Tester (MMT), le récipient renversé avec dessicant et les essais au porté (DermScan). Les méthodes de mesure développées dans ce manuscrit, à l'échelle de la fibre (DVS), macroscopique (cadre) et de la structure textile (analyse thermo-hydrique avec Pearson), apportent des éléments pour mieux appréhender les résultats obtenus lors des essais au porté.

Le confort

1.1 Définition du confort	6
1.1.1 Aspect physique	7
1.1.1.1 Conduction	8
1.1.1.2 Convection	10
1.1.1.3 Radiation	12
1.1.1.4 Évaporation	13
1.1.1.5 Bilan thermique	16
1.1.2 Aspect physiologique	17
1.1.2.1 La peau	18
1.1.2.2 Rôle de l'hypothalamus	21
1.1.2.3 Thermogenèse	23
1.1.2.4 Thermolyse	25
1.1.3 Aspect psychologique	26
1.1.3.1 Intégration et évaluation des stimulis sensorielles	27
1.1.3.2 Formulation du ressenti	28
1.1.3.3 Influence des facteurs physiques et physiologiques	28
1.2 Milieu poreux	29
1.2.1 Définition	29
1.2.2 Grandeurs caractéristiques du milieu poreux	30
1.2.3 Transferts hydriques	32
1.2.3.1 Liaisons eau-fibres	32
1.2.3.2 Types de transfert	34
1.3 Impact des fibres sur le confort	41
1.3.1 Transferts statiques	41
1.3.2 Transferts dynamiques	44
1.3.2.1 Modèle de Min	44

1.3.2.2	Modèle de Fenghzi	45
1.3.2.3	Modèle de Xu	46
1.3.3	Conclusion	48
1.4	Impact du vêtement sur le confort	48
1.4.1	Mouvement du vêtement	48
1.4.2	Caractéristiques physiques du vêtement	51
1.4.3	Conclusion	53
1.5	Évaluation du confort	54
1.5.1	Tests usuels	54
1.5.1.1	Masse surfacique	54
1.5.1.2	Épaisseur	54
1.5.1.3	Perméabilité à l'air	55
1.5.1.4	Porosité	55
1.5.1.5	Taux de reprise en eau réel	55
1.5.2	Transfert de la vapeur d'eau	55
1.5.2.1	Méthode des récipients	55
1.5.2.2	Diffusiomètre	61
1.5.2.3	Tube R	62
1.5.2.4	DMPC	63
1.5.2.5	Appareil de Huang	65
1.5.2.6	DVS	66
1.5.3	Transfert de l'eau liquide	67
1.5.4	Transfert thermique	70
1.5.4.1	Alambeta	71
1.5.4.2	Disque chaud	71
1.5.5	Transferts thermique et hydrique	72
1.5.5.1	Plaque chaude gardée transpirante (Skin Model)	72
1.5.5.2	Appareils dérivés du Skin Model	74
1.5.5.3	Mannequin transpirant mobile	79
1.5.6	Essais au porté	80
1.5.6.1	Indices PMV et PPD	81
1.5.6.2	Détermination de l'hydratation cutanée	82
1.5.7	Conclusion	84
1.6	Conclusion	84

1.1 Définition du confort

Le confort est défini comme un état d'harmonie physique, physiologique et psychologique entre notre corps et l'environnement (SLATER 1986). Le confort peut également correspondre à une absence d'inconfort ou de désagréments (A. DAS et ALAGIRUSAMY 2010).

Les facteurs influençant les sensations du confort vestimentaire sont divisés en trois

groupes (A. DAS et ALAGIRUSAMY 2010) :

- les facteurs physiques correspondent à l'interaction entre le corps, le vêtement et l'environnement extérieur ;
- les facteurs physiologiques sont liés à la réponse thermorégulatrice de l'organisme du corps en interaction avec l'environnement extérieur (HUNTER et FAN 2014) ;
- la perception psychologique résulte des relations complexes entre les différents stimuli sensoriels reçus par le cerveau. Cet aspect du confort correspond également au sentiment d'être habillé d'une manière adaptée à son statut économique, social et fonctionnel.

Ainsi, le confort vestimentaire ressenti par l'homme dépend de tous ces facteurs et de leurs interactions (figure 1.1).

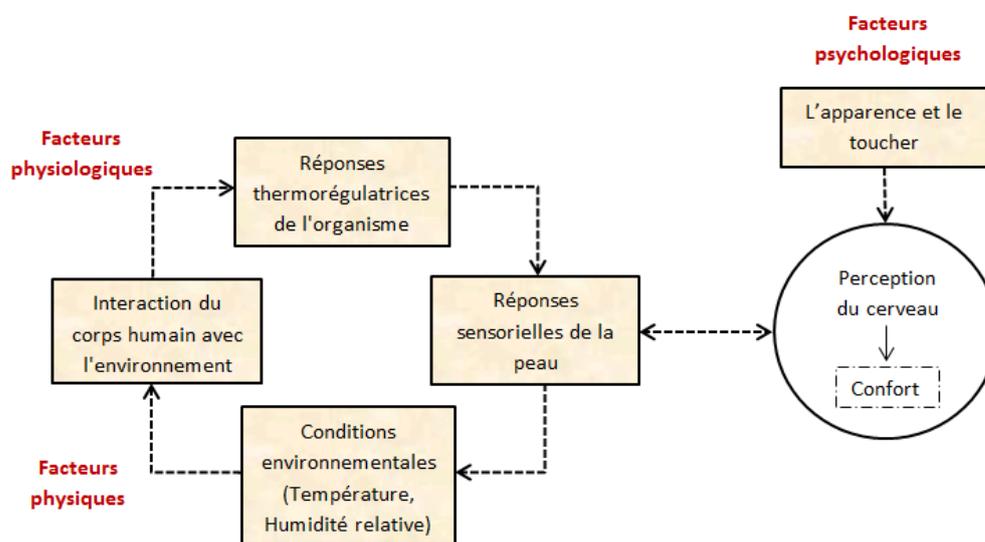


FIGURE 1.1 – Facteurs influençant le confort : physiques, physiologiques et psychologiques (adaptée de PARSONS 2014).

1.1.1 Aspect physique

L'homme est homéotherme et doit maintenir sa température interne à 37°C quelles que soient les conditions environnantes et/ou son activité physique. Le bilan thermique entre les flux produits par l'homme et ceux échangés avec l'environnement doivent être nuls pour respecter cette condition.

Les échanges de chaleur entre le corps humain et l'environnement extérieur sont « principalement » réalisés par conduction, convection, rayonnement, évaporation par voies cutanées et respiratoires (PARSONS 2014).

1.1.1.1 Conduction

Les échanges de chaleur sont rendus possible par le contact direct entre deux solides sans transfert de matière. Ce mode d'échange de la chaleur tend à une distribution homogène au sein du milieu et se produit spontanément d'un solide chaud vers celui qui est froid. Le corps humain peut gagner ou perdre de la chaleur par conduction comme le contact des pieds avec le sol, la position allongée ou assise de notre corps sur une surface de température différente. Les pertes de chaleur par conduction sont minimales et peuvent atteindre environ 3 % à 5 % de la chaleur totale dissipée (STEVENS et FULLER 2015).

La quantité de chaleur échangée par conduction dépend de plusieurs paramètres :

- la différence de gradient de température entre les deux surfaces ;
- la surface de contact (debout 3% et assise ou allongée 8 à 40%) (BEDEK 2010) ;
- la conductivité thermique des deux surfaces (facilité du transfert de chaleur à travers le solide).

L'équation 1.1 caractérisant le flux de chaleur par conduction est basée sur la loi de Fourier.

$$Q_{cond} = -\lambda \times gradT = \lambda \times grad(T_{sk} - T_{solide}) \quad (1.1)$$

Avec Q_{cond} le flux de chaleur par conduction ($W.m^{-2}$), λ la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$), T_{sk} la température de la peau et T_{solide} la température de la surface du solide en contact (K).

Conductivité thermique de solides composés

Une conductivité thermique équivalente est définie dans le cas des solides composés. La résistance thermique R_{th} est définie selon l'équation 1.2.

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda} \quad (1.2)$$

Avec R_{th} la résistance thermique équivalente ($m^2.K.W^{-1}$), e l'épaisseur (m) et λ la conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

$R_{th,total}$ la résistance thermique totale s'exprime en série et en parallèle respectivement selon les équations 1.3 et 1.4.

$$R_{th,total} = \Sigma R_{th} \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{R_{th,total}} = \Sigma \frac{1}{R_{th}} \quad (1.4)$$

Conductivité thermique apparente d'une étoffe

La conductivité thermique apparente λ_{ap} permet de déterminer la conductivité thermique d'un système hétérogène formé par les fibres et l'air. Deux types d'assemblage de fibres sont étudiés (SABRI 2000), l'assemblage parallèle et en série.

- L'assemblage parallèle

Les fibres sont disposées parallèlement à l'écoulement de chaleur, c'est-à-dire perpendiculairement au tissu. Dans ce cas, la conductivité thermique apparente s'écrit selon l'équation 1.5.

$$\lambda_{ap} = V_f \times \lambda_f + V_a \times \lambda_a \quad (1.5)$$

Avec λ_{ap} la conductivité thermique apparente, λ_a la conductivité thermique de l'air et λ_f la conductivité thermique de la fibre ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), V_a la fraction volumique de l'air et V_f la fraction volumique de la fibre.

- L'assemblage série

Les fibres sont disposées perpendiculairement à la direction d'écoulement de la chaleur, donc parallèlement au tissu. La conductivité thermique apparente est définie selon l'équation 1.6.

$$\frac{1}{\lambda_{ap}} = V_f \times \frac{1}{\lambda_f} + V_a \times \frac{1}{\lambda_a} \quad (1.6)$$

Avec λ_{ap} , λ_a et λ_f les conductivités thermiques apparente, de l'air et de la fibre ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), V_a la fraction volumique de l'air et V_f la fraction volumique de la fibre.

De manière analogue, R_{ap} la résistance thermique apparente du tissu est déterminée selon l'équation 1.7.

$$R_{ap} = \frac{e}{\lambda_{ap}} \quad (1.7)$$

Par ailleurs, les résistances thermiques de l'air et de la fibre sont exprimées selon les équations 1.8 et 1.9.

$$R_a = \frac{e}{\lambda_a} \quad (1.8)$$

$$R_f = \frac{e}{\lambda_f} \quad (1.9)$$

Avec R_a la résistance thermique de l'air et R_f la résistance thermique de la fibre ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), e l'épaisseur (m), λ_a et λ_f les conductivités thermiques de l'air et de la fibre ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Cependant dans le cas réel, un tissu est formé par les deux types d'arrangements. Dans ce cas, la conductivité thermique apparente s'écrit selon l'équation 1.10.

$$\lambda_{ap} = \lambda_p \times (V_f \times \lambda_f + V_a \times \lambda_a) + \lambda_s \times \left(\frac{\lambda_f \times \lambda_a}{V_a \times \lambda_f + V_f \times \lambda_a} \right) \quad (1.10)$$

Avec λ_{ap} , λ_a et λ_f les conductivités thermiques apparente, de l'air et de la fibre ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), V_a la fraction volumique de l'air et V_f la fraction volumique de la fibre, λ_p le facteur de pondération du réseau parallèle et λ_s le facteur de pondération du réseau série.

1.1.1.2 Convection

Les pertes par convection ont lieu au niveau de la peau et lors de la respiration.

- Pertes cutanées

Le transfert de chaleur par convection est causé par le mouvement d'un fluide (liquide ou gaz) entre différents milieux de températures différentes. Une convection élevée est obtenue pour un mouvement important. La quantité de chaleur échangée par convection dépend de plusieurs paramètres (STEVENS et FULLER 2015) :

- le gradient de température entre les deux milieux ;
- le mouvement du fluide avec lequel le corps est en contact.

Par ailleurs, les échanges sont réalisés selon deux interfaces différentes au niveau de la peau (MARTINET et MEYER 1999) :

- entre l'air ambiant et la peau ;
- entre la peau et l'air emprisonné entre la peau et le vêtement.

Dans le cas d'échanges entre l'air ambiant et la peau, le flux de chaleur par convection est donné par l'équation 1.11 (CANDAS 2003; DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010).

$$Q_{conv} = h_c \times (T_a - \bar{T}_{sk}) \times F_{cl} \times A_c \quad (1.11)$$

Avec Q_{conv} la densité de flux de chaleur par convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), h_c le coefficient d'échange de chaleur par convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), T_a la température de l'air et \bar{T}_{sk} la température moyenne de la peau (K), F_{cl} le facteur de réduction du vêtement ($F_{cl} = 1$ en l'absence d'isolation vestimentaire et $F_{cl} = 0$ pour une isolation vestimentaire importante), A_c la convection effective de la surface du corps, équivalente à la surface de DuBois A_d (ISO7933 2004).

Par ailleurs, le coefficient de convection est calculé selon le système d'équations 1.12 (ISO7933 2004; DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010; CANDAS 2003).

$$h_c = \begin{cases} 3,5 + 5,2 \times v_{ar} & \text{si } v_a \leq 1 \text{ m.s}^{-1} \\ 8,7 \times v_{ar}^{0,6} & \text{si } v_a > 1 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad (1.12)$$

Cependant, selon l'ISO 7730 :2005, h_c est défini selon l'équation 1.13 (HAVENITH, HOLMÉR et PARSONS 2002; HOLMÉR et al. 1999).

$$h_c = 12,1 \times \sqrt{v_{ar}} \quad (1.13)$$

Avec h_c le coefficient d'échange de chaleur par convection ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), v_a la vitesse de l'air (m.s^{-1}), v_{ar} la résultante de la vitesse de l'air prenant en compte la vitesse de l'air ambiant et celle due aux activités et aux déplacements de la personne (m.s^{-1}).

- Pertes respiratoires

Des échanges convectifs secs ont lieu entre le corps humain et l'environnement extérieur. Ils sont causés par l'inhalation d'air froid, par la suite réchauffés dans les poumons à la température du corps et transférés à l'environnement extérieur par l'air expiré (équation 1.14).

$$C_{res} = m_{res} \times c_{pa} \times (T_{ex} - T_a) \quad (1.14)$$

Avec C_{res} les pertes convectives par respiration (W.m^{-2}), m_{res} le taux de respiration ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$) défini selon l'équation 1.15, c_{pa} la capacité thermique de l'air ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T_{ex} la température de l'air expiré (K) décrit selon l'équation 1.16 et T_a la température de l'air (K).

$$m_{res} = K_{res} \times \frac{M_m}{A} \quad (1.15)$$

Avec m_{res} le taux de respiration ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$), M_m la chaleur produite par métabolisme (W.m^{-2}), K_{res} la constante de proportionnalité égale à $2,58 \text{ kg.m}^2.\text{MJ}^{-1}$ (ASHRAE 1997), A la surface du corps estimée à $1,8 \text{ m}^2$ (ASHRAE 1997).

$$T_{ex} = 32,6 + 0,066 \times T_a + 32 \times W_a \quad (1.16)$$

Avec T_{ex} la température de l'air expiré (K), T_a la température de l'air (K), W_a le

quotient d'humidité de l'environnement défini selon l'équation 1.17.

$$W_a = \frac{0,622 \times P_a}{P_t - P_a} \quad (1.17)$$

Avec W_a le quotient d'humidité de l'environnement, P_t la pression totale atmosphérique (kPa), P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (kPa). La valeur de la pression au niveau de la mer est utilisée pour P_t , elle est égale à 101,325 kPa (ASHRAE 1997).

C_{res} est estimé selon l'équation empirique de la norme (ISO7730 2005) (équation 1.18).

$$C_{res} = 0,00152 \times M_m \times (28,56 + 0,885 \times T_a + 0,641 \times P_a) \quad (1.18)$$

1.1.1.3 Radiation

En général, tous les corps émettent et absorbent de l'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques. Il correspond à un transfert d'énergie thermique et la capacité d'un corps à échanger; celui-ci s'appelle l'émissivité. Cette dernière et le pouvoir d'absorption d'un corps dépendent de la longueur d'onde du rayonnement émise ou reçue et des caractéristiques de celle-ci. La surface du corps participant aux échanges dépend de la posture de la personne. Ainsi, les paramètres modifiant les échanges de chaleur par rayonnement sont (STEVENS et FULLER 2015) :

- la fraction de surface radiative;
- la différence entre les températures moyennes à la surface des deux corps;
- l'émissivité, la réflexivité et l'absorbance du corps.

De manière générale, pour un corps quelconque, le flux de chaleur par rayonnement est exprimé suivant l'équation 1.19.

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma_B \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.19)$$

Avec Q_{rad} la densité de flux de chaleur par rayonnement (W.m^{-2}), ε l'émissivité du corps, σ_B la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), T_1 et T_2 les températures des deux corps (K).

Si les échanges entre le corps et l'environnement sont pris en compte, l'équation 1.20 est utilisée (CANDAS 2003; DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010).

$$Q_{rad} = h_r \times (\bar{T}_r - \bar{T}_{sk}) \times A_r \times F_{cl} \quad (1.20)$$

Avec Q_{rad} la densité de flux de chaleur par rayonnement (W.m^{-2}), h_r le coefficient d'échange de chaleur par radiation défini selon l'équation 1.21 ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), \bar{T}_r la tem-

température moyenne radiative et \bar{T}_{sk} la température moyenne de la peau (K), A_r la surface de radiation effective du corps évaluée selon l'équation 1.22, F_{cl} le facteur de réduction du vêtement.

$$h_r = 4 \times \sigma_B \times \varepsilon_{sk} \times \left(\frac{\bar{T}_r + \bar{T}_{sk}}{2} \right)^3 = 0,22 \times 10^{-8} \times \left(\frac{\bar{T}_r + \bar{T}_{sk}}{2} \right)^3 \quad (1.21)$$

Avec h_r le coefficient d'échange de chaleur par radiation ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), $\sigma_B = 5,67 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ la constante de Stefan-Boltzmann et $\varepsilon_{sk} = 0,97$ l'émissivité de la peau, \bar{T}_{sk} la température moyenne de la peau (K), \bar{T}_r la température moyenne radiative (K).

La surface de radiation effective de la peau A_r s'écrit selon l'équation 1.22.

$$A_r = \left(\frac{A_r}{A_d} \right) \times A_d \quad (1.22)$$

Avec A_r la surface de radiation effective du corps, A_d la surface corporelle de DuBois.

Le rapport $\frac{A_r}{A_d}$ est défini selon l'équation 1.23.

$$\frac{A_r}{A_d} = \begin{cases} 0,67 & \text{pour une personne accroupie.} \\ 0,70 & \text{pour une personne assise.} \\ 0,77 & \text{pour une personne debout.} \end{cases} \quad (1.23)$$

1.1.1.4 Évaporation

L'évaporation de l'eau du corps humain vers le milieu extérieur est réalisée au niveau de la peau et de l'appareil respiratoire.

Voies cutanées

L'évaporation de la sueur à la surface de la peau permet à l'être humain d'évacuer la chaleur (1 g de sueur à 35 °C absorbe 2,4 kJ). Le mécanisme d'évaporation dépend de plusieurs facteurs (STEVENS et FULLER 2015) :

- l'humidité et la vitesse de l'air ;
- la fraction de surface cutanée mouillée et de sa température ;
- le gradient de pression de la vapeur d'eau entre la peau et l'environnement.

Les pertes de chaleur cutanées par évaporation sont définies selon l'équation 1.24 (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010 ; PARSONS 2014).

$$E_{sk} = \frac{w \times (P_{sk,s} - P_a)}{R_{e,cl} + \frac{1}{F_{cl} \times h_e}} \quad (1.24)$$

Avec E_{sk} les pertes de chaleur cutanée par évaporation (W.m^{-2}), w la mouillure de

la peau, $P_{sk,s}$ la pression de la vapeur d'eau à la surface de la peau (kPa), P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (kPa), $R_{e,cl}$ la résistance évaporative du vêtement ($m^2 \cdot kPa \cdot W^{-1}$), F_{cl} le facteur de réduction du vêtement, h_e le coefficient de transfert de chaleur par évaporation ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Par ailleurs, la perte de chaleur par évaporation de la peau (équation 1.25) est également une combinaison de l'évaporation de la sueur produite lors du processus de thermorégulation E_{rsw} et de la diffusion naturelle de l'eau à travers la peau E_{diff} (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010; PARSONS 2014).

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{diff} \quad (1.25)$$

Avec E_{rsw} s'exprimant en fonction du métabolisme M_m (équation 1.26) et E_{diff} selon l'équation empirique 1.27 (HAVENITH, HOLMÉR et PARSONS 2002).

$$E_{rsw} = 0,42 \times (M_m - 58) \quad (1.26)$$

$$E_{diff} = 0,00305 \times (256 \times \bar{T}_{sk} - P_a - 3370) \quad (1.27)$$

Avec E_{rsw} les pertes de chaleur par évaporation de la sueur ($W \cdot m^{-2}$), E_{diff} les pertes de chaleur par diffusion naturelle à travers la peau ($W \cdot m^{-2}$), \bar{T}_{sk} la température moyenne de la peau (K), P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (kPa).

La valeur maximale des pertes de chaleur cutanée par évaporation E_{max} est donnée lorsque la surface de la peau est totalement mouillée ($w = 1$). Ainsi, la mouillabilité cutanée est définie comme le ratio de E_{sk} par l'évaporation maximale de la peau selon l'équation 1.28 (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010; HAVENITH, HOLMÉR et PARSONS 2002).

$$w = \frac{E_{sk}}{E_{max}} = \frac{E_{rsw}}{E_{max}} + 0,06 \quad (1.28)$$

Avec w la mouillure de la peau (sans unité), E_{sk} les pertes de chaleur cutanée par évaporation ($W \cdot m^{-2}$), E_{max} les pertes de chaleur cutanée maximale par évaporation ($W \cdot m^{-2}$) selon l'équation 1.29 d'après la norme ISO 7933 :2004, E_{rsw} les pertes de chaleur par évaporation de la sueur ($W \cdot m^{-2}$).

$$E_{max} = \frac{P_{sk,s} - P_a}{R_{tdyn}} \quad (1.29)$$

Avec E_{max} les pertes de chaleur cutanée maximale par évaporation ($W \cdot m^{-2}$), R_{tdyn} la résistance évaporative dynamique totale de la couche limite d'air et du vêtement en

prenant en compte les caractéristiques du vêtement, les mouvements du sujet et les mouvements de l'air ($\text{m}^2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{W}^{-1}$), $P_{sk,s}$ la pression de la vapeur d'eau à la surface de la peau (kPa), P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (kPa).

Dans le cas d'une peau partiellement mouillée, le flux de chaleur par évaporation est obtenu d'après l'équation 1.30.

$$E_e = w \times E_{max} \quad (1.30)$$

Avec E_e le flux de chaleur par évaporation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), w la mouillure de la peau (sans unité), E_{max} les pertes de chaleur cutanée maximale par évaporation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Par ailleurs, suivant la relation de Lewis, h_e le coefficient de transfert de chaleur par évaporation est directement proportionnel au coefficient de convection h_c selon l'équation 1.31 (BEDEK 2010).

$$h_e = LR \times h_c \quad (1.31)$$

Avec h_e le coefficient de transfert de chaleur par évaporation ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$), LR le coefficient de Lewis, h_c le coefficient d'échange de chaleur par convection ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

Voies respiratoires

Pendant le processus de respiration, l'air extérieur inhalé est humidifié jusqu'à saturation par les poumons. Lors de l'expiration, cet air humide est transféré vers l'environnement extérieur. Ces échanges correspondent aux pertes évaporatoires par respiration définis selon l'équation 1.32.

$$E_{res} = m_{res} \times h_{fg} \times (W_{ex} - W_a) \quad (1.32)$$

Avec E_{res} les pertes évaporatives par respiration ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), h_{fg} la chaleur de vaporisation de l'eau de $2423 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (ASHRAE 1997), W_a le quotient d'humidité de l'environnement, W_{ex} le quotient d'humidité de l'air expiré exprimé selon l'équation 1.33.

$$W_{ex} = \frac{0,622 \times P_{ex}}{P_t - P_{ex}} \quad (1.33)$$

Avec W_{ex} le quotient d'humidité de l'air expiré, P_{ex} la pression saturante de l'air expiré (kPa), P_t la pression totale atmosphérique (kPa).

Selon la norme ISO 7933 :2004, E_{res} peut être estimée selon l'équation empirique 1.34.

$$E_{res} = 0,00127 \times M_m \times (59,34 + 0,53 \times T_a - 11,63 \times P_a) \quad (1.34)$$

1.1.1.5 Bilan thermique

Selon le modèle à deux nœuds, le corps humain est divisé en deux compartiments thermiques concentriques, le noyau et la peau (figure 1.2).

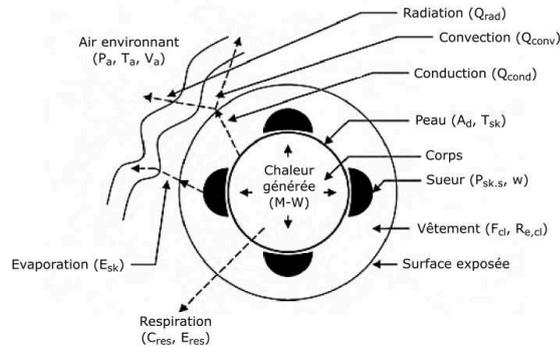


FIGURE 1.2 – Modèle à deux nœuds (adaptée de DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010).

La quantité de chaleur produite par métabolisme (M_m) au centre (noyau) est nécessaire pour réaliser les activités de la vie courante. Une portion de cette énergie produite est utilisée par les muscles (W_w). La production de chaleur dans le corps humain ($M_m - W_w$) peut également être stockée (S) pour être utilisée ultérieurement. Au niveau de la peau, la chaleur est perdue par évaporation (E_{sk}). Par ailleurs, les échanges thermiques entre le milieu extérieur et la surface de la peau (recouverte ou non par un vêtement) sont assurés par convection (Q_{conv}), rayonnement (Q_{rad}) et conduction (Q_{cond}). La chaleur est également échangée par l'intermédiaire des voies respiratoires (C_{res} , E_{res}). Ainsi, l'équation du bilan thermique du corps humain est définie selon l'équation 1.35 (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010).

$$M_m - W_w = q_{sk} + q_{res} + S = (Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (1.35)$$

Avec M_m la chaleur produite par métabolisme ($W.m^{-2}$), W_w le travail fourni par le corps ($W.m^{-2}$), Q_{cond} , Q_{conv} , Q_{rad} sont respectivement les flux de chaleur par conduction échangé avec le milieu extérieur, par convection et par radiation ($W.m^{-2}$), E_{sk} les pertes de chaleur cutanée par évaporation ($W.m^{-2}$), C_{res} les pertes convectives par respiration ($W.m^{-2}$), E_{res} les pertes évaporatives par respiration ($W.m^{-2}$), S_{sk} la chaleur stockée par la peau et S_{cr} la chaleur stockée par le corps ($W.m^{-2}$).

En se plaçant dans des conditions statiques, les effets de conduction sont négligés sur le corps humain (équation 1.36).

$$M_m - W_w = (Q_{conv} + Q_{rad} + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (1.36)$$

Dans le but de simplifier l'équation précédente, le paramètre T_o est défini comme la

température uniforme d'une pièce imaginaire noire dans laquelle une personne peut échanger la même quantité de chaleur par radiation et par convection que dans un environnement actuel non-uniforme. Ce paramètre est défini selon l'équation 1.37 (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010; SABRI 2000; PARSONS 2014).

$$T_o = \frac{(h_r \times \bar{T}_r + h_c \times T_a)}{h_r + h_c} \quad (1.37)$$

Avec T_o la température uniforme d'une pièce imaginaire noire (K), h_r et h_c les coefficients de transfert de chaleur respectivement radiatif et convectif ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), \bar{T}_r la température moyenne radiative (K), T_a la température de l'air (K).

Ainsi, la somme des échanges convectifs et radiatifs de la peau avec l'environnement est réécrite selon l'équation 1.38 (DJONGYANG, TCHINDA et NJOMO 2010; PARSONS 2014).

$$Q_{conv} + Q_{rad} = F_{cl} \times h \times (T_{cl} - T_o) \quad (1.38)$$

Avec Q_{conv} et Q_{rad} les flux de chaleur échangés respectivement par convection et radiation (W.m^{-2}), $h = h_c + h_r$ les coefficients de transferts de chaleur par convection et radiation ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_{cl} la température à la surface du vêtement (K), T_o la température uniforme (K), F_{cl} le facteur de réduction du vêtement.

Dans le cas d'une personne ayant une activité physique sédentaire, l'activité métabolique définie en « met » est comprise entre 1,0 met et 1,3 met. Ce paramètre dépend de la puissance totale du métabolisme, de la puissance musculaire produite vers l'extérieur et de la vitesse relative de l'air créée par l'activité. Dans le cas où la personne n'est pas exposée directement à la lumière du soleil et placée dans un environnement dont la vitesse de l'air est supérieure à $0,20 \text{ m.s}^{-1}$, la somme $Q_{conv} + Q_{rad}$ est définie selon l'équation 1.39.

$$Q_{conv} + Q_{rad} = \frac{\bar{T}_{sk} - T_o}{R_{cl} + \frac{1}{F_{cl} \times h}} \quad (1.39)$$

Avec \bar{T}_{sk} la température de la peau (K), T_o la température uniforme (K), R_{cl} la résistance thermique du vêtement ($\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$), F_{cl} le facteur de réduction du vêtement.

1.1.2 Aspect physiologique

L'homme est homéotherme est peut être assimilé à un noyau (représentant $\frac{2}{3}$ des tissus) entouré d'une enveloppe cutanée ($\frac{1}{3}$ des tissus). Pour stabiliser la température de son noyau suite aux changements de l'environnement, l'homme possède un système de régulation à long terme (rythmes biologiques) et d'un système de régulation à court terme (rétrocontrôle). La figure 1.3 résume les différents processus de la thermorégulation.

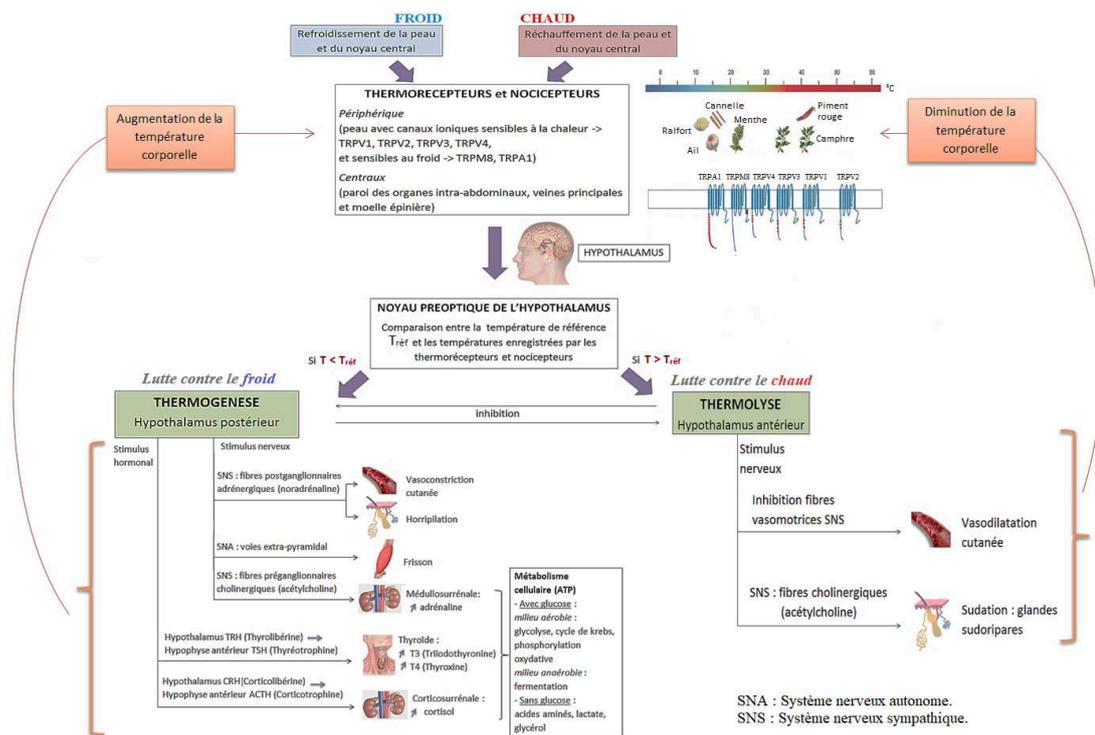


FIGURE 1.3 – Représentation schématique de la thermorégulation (adaptée de MARIËB et HOËHN 2014; PAN et GIBSON 2006; G. SONG 2011).

1.1.2.1 La peau

La variation de la température extérieure est ressentie initialement par la peau (l'enveloppe) puis par le reste du corps (noyau central). La peau est constituée de trois couches principales, l'épiderme, le derme et l'hypoderme (figure 1.4).

La couche supérieure de la peau (0,075 à 0,15 mm d'épaisseur) est un épithélium c'est-à-dire un tissu formé de cellules juxtaposées. Il ne comporte ni vaisseau capillaire et ni vaisseau lymphatique. Le derme est un tissu conjonctif jouant un rôle de nutrition et de soutien d'une épaisseur comprise entre 1 à 3 mm. Il contient des vaisseaux lymphatiques ou sanguins. Les terminaisons nerveuses sont situées à différentes épaisseurs de la peau (Merckel, corpuscules de Meissner, Pacini et de Ruffini), les ongles, le follicule pileux (ou follicule pilo-sébacé), les glandes sudoripares (eccrines et apocrines) et le système immunitaire avec les cellules dendritiques dermiques (macrophages et mastocytes). L'hypoderme est un tissu adipeux (type de tissu conjonctif) constituant une couche de gras sous-cutanée. Il est légèrement vascularisé et innervé tout en étant constitué de cellules riches en graisse, les adipocytes. Son épaisseur varie suivant les individus. Pour une personne normale son épaisseur est de 17 fois celle du derme. Elle permet d'isoler la musculature sous-jacente aux transferts de chaleur par conduction et également de stocker de l'énergie issue de la nourriture.

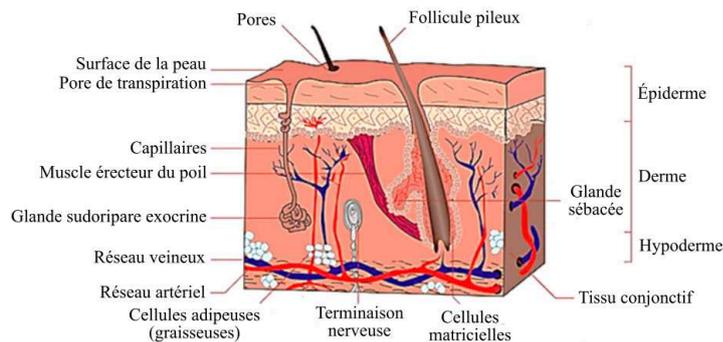


FIGURE 1.4 – Structure de la peau (adaptée de ST-JACQUES 2016).

L'innervation cutanée est assurée par deux types de structure, les terminaisons nerveuses libres et les corpuscules sensitifs.

- Les terminaisons nerveuses libres concernent les thermorécepteurs, nocicepteurs, disque de Merkel et les récepteurs des follicules pileux. Ces fibres nerveuses sont présentes dans le derme.
- Les corpuscules sensitifs, organes arrondis du derme, peuvent être entourés d'une capsule (membrane conjonctive) tels que les corpuscules de Pacini, Krause, de Golgi, de Meissner ou bien dépourvu de capsule comme les corpuscules de Ruffini et les cellules de Merckel (isolés ou regroupés en disque).

Les nerfs sensitifs formés à partir des terminaisons nerveuses libres et des corpuscules sensitifs vont constituer un plexus nerveux superficiel dans le derme puis profond dans l'hypoderme. Ces récepteurs vont convertir l'énergie associée au stimulus en signaux bioélectriques (phénomène de transduction). Ces signaux permettent de coder l'information en terme d'intensité, de durée, de position et de direction. Par la suite, ces informations sont transmises par des fibres nerveuses spécifiques jusqu'au système nerveux en passant par le ganglion rachidien sensitif de la moelle épinière. Le cerveau interprète ces signaux et réagit en conséquence à l'environnement perçu.

Propriétés des thermorécepteurs et nocicepteurs

Au moyen des thermorécepteurs et des nocicepteurs, le corps humain peut détecter différents niveaux de chaud et de froid au moyen de 4 types d'organes sensoriels : froid, chaud, douleurs au froid et au chaud. Les thermorécepteurs et nocicepteurs sont principalement présents dans la peau et l'hypothalamus. Ils se situent également dans la moelle épinière, dans la paroi des organes intra-abdominaux, autour et dans les veines principales situées dans la partie supérieure de l'abdomen et du thorax. Ces récepteurs sont localisés dans le derme à une profondeur de 0,15 à 0,17 mm (sous l'épiderme) pour les récepteurs sensibles au froid et de 0,3 à 0,6 mm (couche supérieure du derme) pour les récepteurs sensibles au chaud. Le nombre de récepteurs pour le froid est largement supérieur à celui du chaud. Ainsi, l'homme est davantage sensible au danger provenant du froid que du chaud (PAN et GIBSON 2006).

- Température d'activation

Chaque récepteur est stimulé dans une plage de température spécifique. Par exemple, à haute température, les récepteurs de la douleur au chaud vont réagir tandis que ceux du froid sont inhibés (figure 1.5). Pour un récepteur au froid la plage de température se situe entre 20 et 30 °C, tandis que pour les récepteurs au chaud celle-ci est comprise entre 37 et 47 °C. Si la température est constante et stable, alors l'impulsion est statique (PAN et GIBSON 2006).

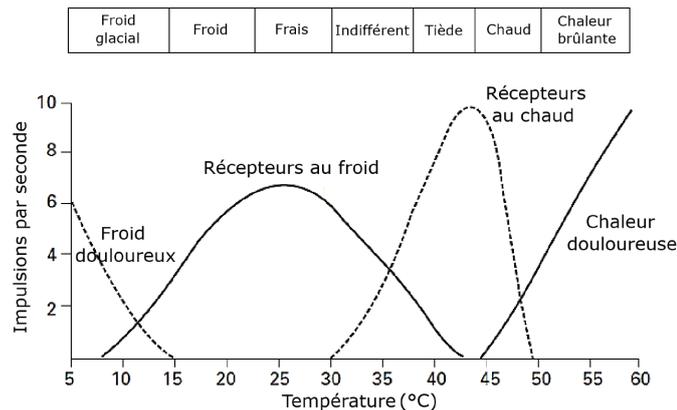


FIGURE 1.5 – Températures d'activation des récepteurs (adaptée de PAN et GIBSON 2006).

- Réponse dynamique des récepteurs

Les thermorécepteurs sont capables de s'adapter aux changements brutaux de températures. En effet, au début ils sont fortement stimulés et des impulsions rapides à hautes fréquences sont envoyées. Elles diminuent rapidement pendant la première minute jusqu'à progressivement se stabiliser. Sur la figure 1.6, l'augmentation brutale de la température de T_1 à T_2 déclenche la décharge du récepteur au chaud ce qui stoppe la décharge de celui qui est sensible au froid. Après quelques secondes à la température T_2 , la fréquence d'impulsion du récepteur au chaud ralentit tandis que celle du récepteur au froid augmente de nouveau progressivement. Lors d'une diminution brutale de la température (T_2 à T_1), les réponses des récepteurs sont opposées aux précédentes. Le récepteur au chaud s'arrête brutalement alors que la fréquence d'impulsion du récepteur au froid augmente fortement (PAN et GIBSON 2006).

Canaux TRP (Transient Receptor Potential)

D'un point de vue moléculaire, les terminaisons libres sont constituées de capteurs appelés TRP (Transient Receptor Potential). Ce sont des canaux ioniques thermosensibles. Ils sont au nombre de 9 mais uniquement 6 détectent les variations de température. Les canaux ioniques TRPV1 (≥ 43 °C), TRPV2 (≥ 52 °C), TRPV3 (≥ 32 à 39 °C) et TRPV4 (entre 27 et 42 °C) sont sensibles au chaud. Les canaux TRPM8 (entre 8 et 25 °C) et TRPA1 (≤ 17 °C) sont stimulés aux températures froides. Par ailleurs, différents compo-

sés peuvent également activés ces canaux (piment pour TRV1, menthe pour TRPM8). Lorsque ces canaux ioniques s'ouvrent, un stimuli sensoriel est transformé en potentiel d'action, transmis au cerveau en passant par la moelle épinière. Les keratinocytes, cellules présentes au niveau de l'épiderme de la peau, sont également sensibles aux variations de températures en influençant la communication avec les fibres nerveuses. Pour ces cellules, le mécanisme de transduction de l'information est cependant encore inconnu (ABEGG 2009).

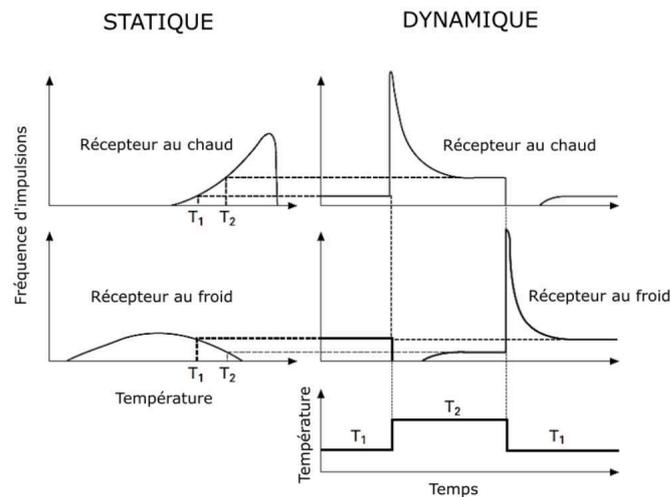


FIGURE 1.6 – Comportement dynamique des thermorécepteurs (adaptée de PAN et GIBSON 2006).

Fibres nerveuses

Le signal bioélectrique obtenu par les récepteurs est relayé au système nerveux par l'intermédiaire des fibres nerveuses. Elles sont divisées en plusieurs catégories, les fibres A_β , A_δ et les fibres C. Les fibres A_β sont fortement myélinisées ce qui signifie que la vitesse de diffusion du potentiel d'action est importante ; celle-ci est comprise entre 35 et 75 m.s^{-1} . Pour les fibres A_δ légèrement myélinisées, la vitesse est définie entre 5 et 30 m.s^{-1} , tandis que pour les fibres C celle-ci est faible de 0,5 à 2 m.s^{-1} .

Chaque récepteur thermosensible transmet les informations obtenues aux différentes fibres spécifiques (tableau 1.1) (ABEGG 2009).

1.1.2.2 Rôle de l'hypothalamus

L'hypothalamus est le centre de la thermorégulation du cerveau, il a un rôle d'intégrateur (figure 1.7). Noyau de faible dimension situé sous le thalamus, il est constitué d'une multitude d'autres petits noyaux de cellules grises qui se prolongent vers le bas pour rejoindre l'hypophyse. A partir des informations reçues, les températures cutanées des thermorécepteurs périphériques et des températures sanguines (thermorécepteurs centraux), il va réguler la température interne du corps pour la maintenir à 37°C.

Récepteurs	Type de fibres
TRPV1	A_δ et C
TRPV2	A_δ et A_β
TRPV3	C
TRPV4	A_δ et C
TRPM8	C
TRPA1	A_δ et C

TABLEAU 1.1 – Fibres nerveuses associées aux différents récepteurs thermosensibles (adaptée de ABEGG 2009).

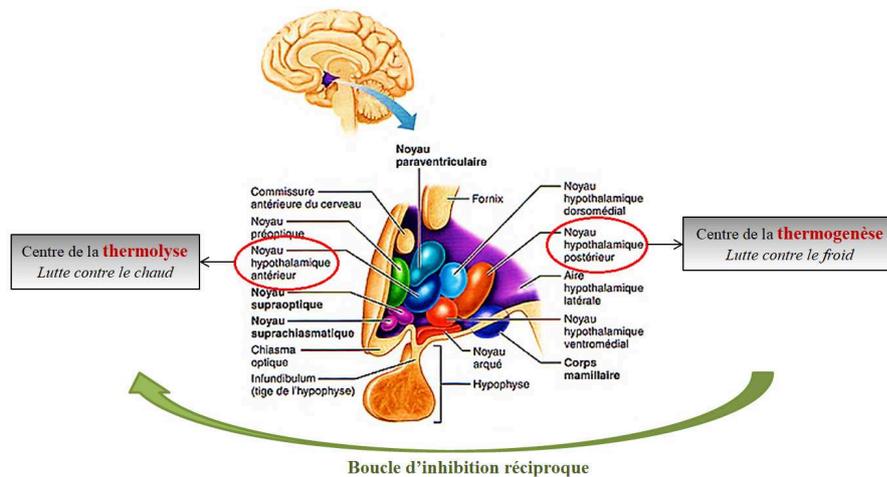


FIGURE 1.7 – Représentation schématique de l'hypothalamus (adaptée de PARSONS 2014).

Les noyaux hypothalamiques antérieur et postérieur jouent des rôles distincts dans la thermorégulation (G. SONG 2011 ; LEHOUELLEUR 2010).

- Le noyau hypothalamique antérieur met en place les mécanismes de la lutte contre le chaud lorsque la température mesurée dépasse la zone de consigne.
- Le noyau hypothalamique postérieur déclenche les mécanismes de la lutte contre le froid lorsque la température mesurée par les thermorécepteurs est trop faible.

Ces deux noyaux ont une action d'inhibition réciproque pour stopper les mécanismes mis en place par l'un ou l'autre si les conditions extérieures changent (cas de la sudation avec l'inhibition de l'action de la zone antérieure par la postérieure). Ainsi, l'hypothalamus (système nerveux central) transmet les ordres aux effecteurs par le biais du système nerveux périphérique commandant les voies motrices efférentes. Ce dernier se décompose en deux sous-systèmes, les systèmes nerveux somatique et autonome (figure 1.8).

Le système nerveux autonome (SNA) se compose de neurones innervant les muscles cardiaques, les muscles lisses (dans les artères, tube digestif, appareil respiratoire) et les glandes. Deux sous-systèmes le compose, les systèmes nerveux sympathique et parasympathique (MARIEB et HOEHN 2014).

- Le système nerveux sympathique (SNS) prépare notre corps à la fuite ou à la lutte. Il se manifeste lorsque nous sommes excités, effrayés ou menacés.
- Le système nerveux parasympathique est associé au repos, aux fonctions digestives et permet de réduire la consommation d'énergie tout en accomplissant les activités banales.

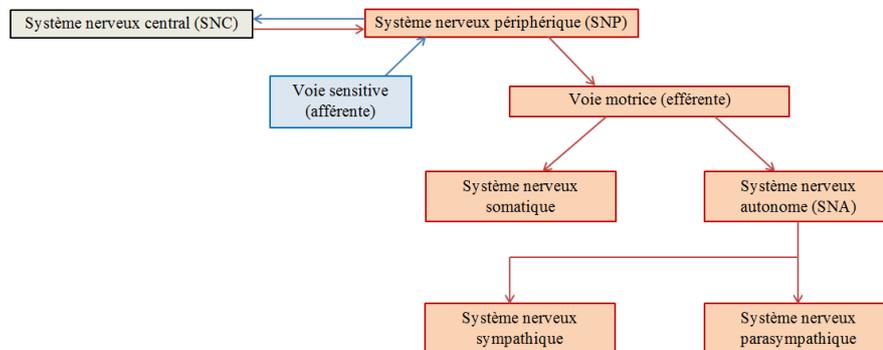


FIGURE 1.8 – Système nerveux (adaptée de MARIEB et HOEHN 2014).

L'action des systèmes sympathique et parasympathique sont antagonistes. Si par exemple l'un provoque la contraction de certains muscles ou la sécrétion d'une glande alors l'autre système inhibe cette action. Ainsi, en se rapportant à la figure 1.3, la différence de température ressentie entre l'environnement extérieur et notre corps est transmise à l'hypothalamus par l'intermédiaire des thermorécepteurs et nocicepteurs. Par la suite, les informations sont analysées en comparant la température mesurée avec une température interne moyenne auquel notre corps doit se maintenir pour survivre, c'est-à-dire 37°C. Si la température est inférieure à la température de référence alors notre corps va mettre en place des mécanismes physiologiques permettant de lutter contre le froid (thermogenèse). Dans le cas contraire, si la température ressentie est plus importante que la température de consigne alors les mécanismes de lutte contre le chaud sont actionnés (thermolyse).

1.1.2.3 Thermogenèse

Vasoconstriction cutanée

La première fonction du système vasculaire est de délivrer les nutriments et l'oxygène aux tissus et organes. Il est composé de vaisseaux sous-cutanés, d'un plexus dermique profond, d'un plexus dermique superficiel et d'un système papillaire (figure 1.9a). Des artères en provenance du cœur montent vers la surface de la peau en diminuant leur diamètre et elles se divisent en artérioles (diamètre inférieur à 20 μm). Elles sont situées dans le plexus dermique profond (figure 1.9b) et vont par la suite se dissocier en méta-artérioles puis en capillaires (diamètre compris entre 4 et 9 μm). De plus, des anastomoses présents au niveau du derme permettent de réaliser des « court-circuits » entre les artérioles pré-capillaires et les veinules post-capillaires. Le débit sanguin du

système vasculaire varie généralement de $0,5 \text{ L.min}^{-1}$ au repos et de 7 L.min^{-1} lors d'une activité intense (BIGOURET 2012).

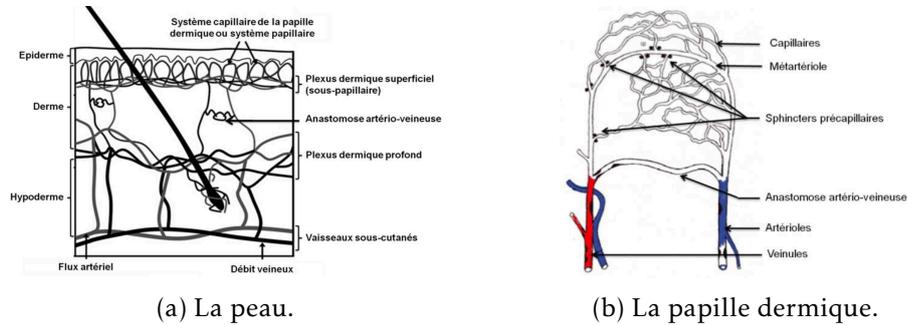


FIGURE 1.9 – Représentation schématique du système vasculaire pour la peau et la papille dermique (LEAHY et al. 2007).

Le réseau veineux (système papillaire) situé dans le tissu sous-cutané affecte fortement le transfert de chaleur de la peau vers l'environnement. Il est alimenté en sang par des artérioles (petites artères) qui se dilatent ou se rétractent (G. SONG 2011). Dans le cas particulier de la thermogénèse, le mécanisme permettant de conserver la chaleur est appelé la vasoconstriction. Celle-ci est contrôlée par le système nerveux autonome est en particulier le système sympathique (SNS). Il agit en activant les fibres postganglionnaires adrénérgiques par la sécrétion de noradrénaline. Le diamètre des vaisseaux sanguins diminuent (contraction) et la conductance est plus faible en limitant la transmission de chaleur du corps vers le milieu extérieur. Le débit sanguin est alors réduit à une valeur très faible entre 30 mL.min^{-1} et 450 mL.min^{-1} . La conductivité thermique de la peau dans cette situation est comprise entre $0,2$ et $0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (BIGOURET 2012).

Les parties du corps tels que les doigts, les mains, les pieds et les oreilles ont un système de contrôle vasculaire supplémentaire, les anastomoses artério-veineuses (AVA). Elles sont présentes dans ces zones en très grand nombre. L'ouverture de leurs valves permet de raccourcir le parcours normal du sang partant des petites artères pour alimenter le réseau veineux (figure 1.10). Dans ce cas, la circulation du sang permet d'éviter le transfert de chaleur vers l'extérieur lorsque les valves sont ouvertes. Le diamètre des AVA est de 20 à $150 \mu\text{m}$.

Horripilation

L'horripilation, c'est-à-dire le redressement des poils à la surface de la peau, est contrôlé par les mêmes voies que la vasoconstriction. Cette pilosité permet de préserver la chaleur en créant une couche isolante. Cependant, ce phénomène a peu d'impact sur la thermogénèse car l'Homme est de moins en moins poilu (G. SONG 2011).

Frisson

Dans le cas d'un abaissement de la température important, si le corps n'arrive pas à augmenter sa température par la vasoconstriction, il va produire de la chaleur en contractant

involontairement ses muscles squelettiques (frissonnement). Ce mécanisme accroît la température corporelle efficacement car l'activité musculaire dégage de grandes quantités de chaleur. Ce phénomène est causé par le système extra-pyramidal (motricité involontaire). Il représente l'ensemble du système nerveux central, contrôle les postures du corps et les mouvements par le biais du système nerveux autonome. L'information est transmise par les neurones moteurs (PAN et GIBSON 2006).

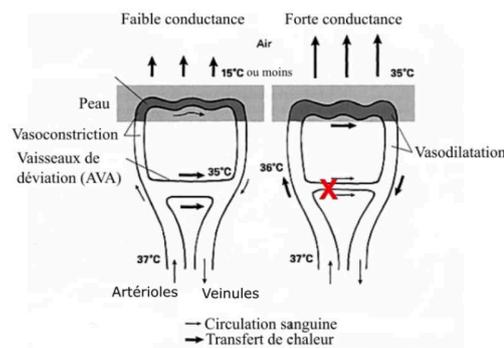


FIGURE 1.10 – Anastomoses artériovoineuses (AVA) (adaptée de LAROUSSE 2016).

Métabolisme cellulaire

Pour lutter contre le froid, le corps a besoin de produire de l'énergie pour assurer le fonctionnement normal de notre organisme. Différents organes permettent de stimuler ce métabolisme comme les glandes médullosurrénales sécrétant de l'adrénaline, les glandes corticosurrénales synthétisant la cortisol, la thyroïde avec la production de triiodothyronine (T3) et de thyroxine (T4).

Les différentes réactions chimiques engendrées (glycolyse, cycle de Krebs, phosphorylation oxydative, fermentation, néoglucogène) permettent de produire de l'énergie par la production d'ATP.

1.1.2.4 Thermolyse

Vasodilatation cutanée

Dans le cas de la thermolyse, le mécanisme permettant de libérer l'excès de chaleur produit par le corps humain s'appelle la vasodilatation. Ce mécanisme est contrôlé par l'inhibition des fibres vasomotrices (celles excitées lors du phénomène de vasoconstriction) du système nerveux sympathique.

La vasodilatation permet d'augmenter le diamètre des vaisseaux et par conséquent celui du débit sanguin en le multipliant par 10. L'excès de chaleur est transmis à la peau par conductance et la conductivité thermique de celle-ci est comprise entre $0,4$ et $0,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (BIGOURET 2012; G. SONG 2011).

Sudation

Les glandes sudoripares permettent de sécréter la sueur soit en moyenne de $0,6$ à $1,5 \text{ L}$

par jour avec un maximum de 10 L par jour dans des conditions extrêmes. Elles sont de deux types, les glandes apocrines et eccrines (figure 1.11).

- Les glandes sudoripares apocrines sont positionnées dans les zones anales, génitales et sous les aisselles. Leur canal excréteur est situé au niveau du follicule pileux (poil) où elles y sont rattachées. Ces glandes permettent l'évacuation de la sueur apocrine, visqueuse laiteuse et d'odeur particulière, ainsi qu'une partie du matériel cellulaire qui est proche du canal excréteur de la glande. Leur sécrétion dépend de l'adrénaline circulant causé par des stimuli psychiques comme les émotions et le stress.
- Les glandes sudoripares eccrines, majoritaire par rapport aux glandes apocrines, sont positionnées sur l'ensemble de la peau et de manière plus importante au niveau de la paume des mains et de la plante des pieds. Le canal excréteur des glandes débouche à la surface par un pore. Cette sueur (claire et fluide) est composée de 99 % d'eau, de chlorure de sodium (sel), d'acide lactiques, urée, d'acides aminés. Elle est antibactérienne et antifongique (pH acide). Les glandes permettent de réguler la température du corps car par exemple dans le cas d'une hausse de température (chaleur ou effort musculaire), le système nerveux autonome sympathique commande la sécrétion de cette sueur dont son évaporation va permettre de refroidir le corps. Ces glandes sont stimulées par le stress et la libération de substances chimiques tels que l'acétylcholine (neurotransmetteurs) et leur sécrétion est inhibée par l'atropine. Quand la température du corps augmente, les glandes sudorales de la peau sont stimulées et ouvrent leurs pores pour évacuer le fluide du corps (G. SONG 2011 ; LAROUSSE 2016).

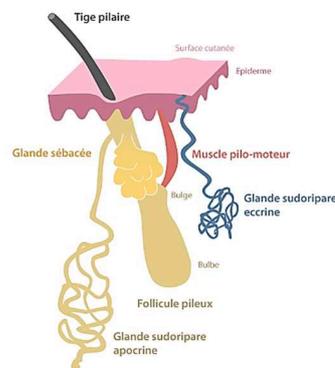


FIGURE 1.11 – Glandes sudoripares apocrine et eccrine (COSMETICOFFICINE 2016).

1.1.3 Aspect psychologique

Le confort psychologique est défini suivant une succession de processus, i.e (i) la réception des stimuli sensoriels individuels par le cerveau, (ii) l'évaluation de ses sensations et l'identification de leur importance, (iii) la formulation subjective de la perception générale du confort. Pour terminer, un jugement est porté sur l'état de confort

et les préférences en prenant en compte les expériences passées.

1.1.3.1 Intégration et évaluation des stimuli sensorielles

La voie spinothalamique amène les informations issues des stimuli aux aires sensorielles du cortex cérébral. Les informations passent par la moelle épinière lombaire et cervicale puis par le bulbe rachidien et terminent leur parcours au niveau du thalamus situé dans le cerveau. Les régions reliées à la conscience des sensations sont situées dans les lobes pariétal, temporal et occipital (figure 1.12). Le phénomène psychologique se forme dans les aires somato-sensitives, situées dans le lobe pariétal. Les lobes temporal et occipital traitent respectivement les informations auditives et visuelles.

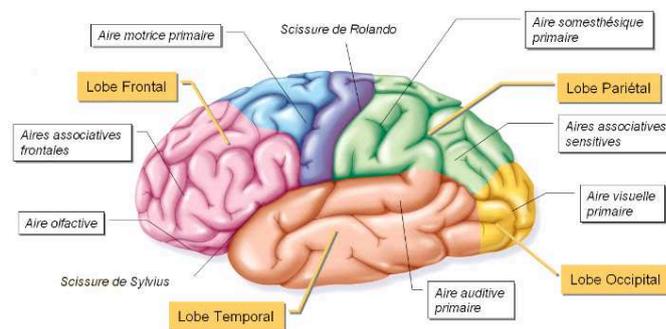


FIGURE 1.12 – Aires sensorielles (UKONDAYANGA 2017).

Le cortex somesthésique primaire, se situant dans le lobe pariétal, reçoit des informations provenant des récepteurs somatiques de la peau et des propriocepteurs (récepteurs sensibles à la locomotion, à la position spatiale et au tonus musculaire) des muscles squelettiques, des articulations et des tendons. Le degré de sensibilité d'une région du corps (nombre de récepteurs qu'elle renferme) va définir la surface du cortex somesthésique réservée à cette perception sensorielle. Les informations issues du cortex somesthésique primaire (température, pression, etc.) sont intégrées par le cortex somesthésique associatif situé à l'arrière de ce dernier dans le lobe pariétal. Cette étape permet d'extraire une signification globale de ces informations. Par la suite, les fibres de neurones des lobes pariétal et temporal dirigent les informations vers les lobes frontaux impliqués dans la formation de souvenir, de la mémoire et du langage (aire de Broca) (PARSONS 2014).

La perception consciente est possible lorsque les sensations, projetées sur le champ de la conscience, ont été confrontées à la mémoire, aux expériences antérieures, à l'état physiologique et psychologique de l'individu. Elle correspond alors au processus par lequel la personne acquiert une connaissance consciente du monde extérieur à partir de son activité sensorielle. Le ressenti thermique est possible à partir d'un certain seuil défini comme la plus petite température nécessaire pour engendrer l'expression d'une perception au chaud ou au froid.

1.1.3.2 Formulation du ressenti

Quand la perception de variation de température est nette, alors celle-ci peut être évaluée au moyen d'échelles de jugements. Les réponses verbales sont formulées par l'aire de Broca située à l'avant du cortex moteur correspondant au centre du langage transformant les pensées en mots (PARSONS 2014). Pour effectuer un jugement de l'astreinte thermique, plusieurs échelles ont été mises en place par la norme ISO 10551 (ISO10551 1995). Les trois échelles doivent être utilisées dans l'ordre suivant pour décrire le ressenti thermique, i.e les échelles perceptives, évaluative et préférentielle. Suite aux jugements précédents, les personnes expriment l'acceptabilité ou le rejet de l'astreinte thermique ainsi que leur tolérance à cette dernière. Les différentes échelles sont citées par la norme ISO 10551 (tableau 1.2).

	1	2	3	4	5
Type de jugements	Jugements perceptifs	Jugements évaluatifs affectifs	Jugements de préférence thermique	Jugements d'acceptabilité personnelle	Jugements de tolérance personnelle
Contenu des jugements	État thermique personnel			Ambiance thermique	
Formulation	« Comment vous sentez-vous (en ce moment précis?) » 7 ou 9 degrés de très (ou extrêmement) FROID à très (ou extrêmement) CHAUD	« Trouvez-vous cela...? » 4 ou 5 degrés, de CONFORTABLE à très (ou extrêmement) INCONFORTABLE	« Veuillez indiquer comment vous préféreriez être maintenant » 7 (ou 3) degrés, de (beaucoup) PLUS FROID à (beaucoup) PLUS CHAUD	« Comment jugez-vous cet environnement (climat local) d'un point de vue personnel? » 2 catégories PLUTÔT ACCEPTABLE, PLUTÔT INACCEPTABLE	« Est-ce....? » 5 degrés, de parfaitement TOLÉRABLE à IMPOSSIBLE A TOLÉRER

TABLEAU 1.2 – Évaluation de l'astreinte thermique (adaptée de ISO10551 1995).

1.1.3.3 Influence des facteurs physiques et physiologiques

L'acclimatation

L'acclimatation du sujet dans un environnement donné a un effet sur sa perception du ressenti thermique. En effet, quand un individu est soumis à une simulation thermique appartenant à la zone appelée « zéro physiologique » ou zone « neutre » comprise entre 30 et 36 °C, la sensation thermique disparaît après une certaine durée de simulation (NARÇON 2001). Au-delà de cette zone, la sensation de chaud (au-delà de 36 °C) ou de froid (en-dessous de 30 °C) va persister. Ce phénomène d'adaptation à notre environne-

ment est possible par la capacité des thermorécepteurs à réagir dynamiquement lors d'un stimuli thermique.

L'âge

L'augmentation de l'âge a pour effet d'augmenter le seuil de ressenti thermique c'est-à-dire de diminuer la capacité de l'organisme à détecter de faibles variations de températures. Ainsi, en vieillissant la tolérance à l'inconfort devient plus importante.

L'éthnicité

Ce paramètre influe sur les seuils thermiques des individus. En effet, des personnes vivant par exemple dans des zones tropicales sont moins sensibles lors de la détection des seuils au chaud que celles situées dans des zones tempérées.

1.2 Milieu poreux

Les substrats textiles tels que les fibres, tricots et vêtements sont des matériaux dits poreux. Les grandeurs caractéristiques de ce milieu, ainsi que les transferts hydriques y sont définis.

1.2.1 Définition

Un milieu poreux (figure 1.13) est un milieu qui se compose d'une phase solide appelée également matrice solide, et d'un espace poreux qui peut être occupé par une ou plusieurs phases fluides (liquide, vapeur) susceptibles d'échanger entre elles et avec la matrice solide de la matière et de l'énergie (IssAADI 2015). La matrice solide est formée d'un réseau de « pores capillaires » de géométries et de tailles variables. On distingue deux types de porosités, i.e., la porosité ouverte et fermée. La porosité dite ouverte représente l'ensemble des pores connectés formant un réseau complexe et tortueux. Ils communiquent entre eux et avec l'extérieur du matériau pour assurer un transfert de masse à travers celui-ci. La porosité fermée, quant à elle, est constituée de pores isolés ou de réseaux n'admettant aucune ouverture vers l'extérieur. La phase liquide est généralement constituée d'eau contenue dans l'espace poreux. La dernière phase en présence dans cette espace est la phase gazeuse constituée de vapeur d'eau et d'air sec (MCHIRGUI 2012).

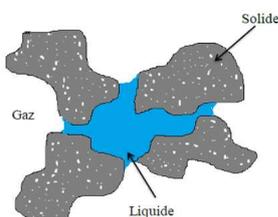


FIGURE 1.13 – Milieu poreux (MCHIRGUI 2012).

Le milieu poreux est donc un ensemble macroscopiquement hétérogène et anisotrope. Il peut être décrit par des grandeurs caractéristiques comme la porosité, la surface spécifique, la teneur en eau, le degré de saturation, l'humidité relative, la taille des pores et la tortuosité.

1.2.2 Grandeurs caractéristiques du milieu poreux

Porosité

Ce paramètre correspond à la fraction volumique occupée par les pores. La porosité totale du milieu poreux est alors définie comme le rapport entre le volume de fluide $V_f = V_l + V_g$ et le volume total V_t selon l'équation 1.40 (MCHIRGUI 2012).

$$\varepsilon_t = \frac{V_l + V_g}{V_t} \quad (1.40)$$

Avec ε_t la porosité totale (sans unité), V_l le volume du liquide (m^3), V_g le volume gazeux (m^3), V_t le volume total (m^3).

Pour les pores isolés n'ayant aucune influence sur les phénomènes de transport, le paramètre ε_p représente la porosité ouverte prenant en compte uniquement le volume des pores accessibles V_p selon l'équation 1.41.

$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_t} \quad (1.41)$$

Avec ε_p la porosité ouverte (sans unité), V_p le volume des pores accessibles (m^3), V_t le volume total (m^3).

Surface spécifique

La surface spécifique représente la surface porale interne par unité de masse du matériau ou du volume, accessible aux molécules. Un matériau dont la surface spécifique est élevée comporte des pores de faibles dimensions (ABELÉ et al. 2009; ISSAADI 2015).

Teneur en eau

Cette grandeur physique permet de quantifier la quantité d'eau (massique ou volumique) présente dans un milieu donné. La fraction massique est définie comme le rapport entre la masse d'eau liquide m_l et la masse de la matrice solide m_s (MCHIRGUI 2012) selon l'équation 1.42.

$$u = \frac{m_l}{m_s} \quad (1.42)$$

Avec u la fraction massique (sans unité), m_l la masse d'eau liquide (kg), m_s la masse

de la matrice solide (kg). Le rapport entre le volume du liquide V_l et le volume total V_t représente la fraction volumique θ_l selon l'équation 1.43.

$$\theta_l = \frac{V_l}{V_t} \quad (1.43)$$

Avec θ_l la fraction volumique (sans unité), V_l le volume du liquide (m^3), V_t le volume total (m^3).

Degré de saturation

Il est défini comme le rapport entre la teneur en eau du matériau à un état donné et sa teneur en eau à saturation u_{sat} obtenu quand tous les pores du matériau sont totalement remplis (équation 1.44). Le degré de saturation (SR) est compris entre 0 et 1 (MCHIRGUI 2012).

$$SR = \frac{u}{u_{sat}} \quad (1.44)$$

Avec SR le degré de saturation (sans unité), u la fraction massique du matériau à un état donné (sans unité), u_{sat} la teneur en eau à saturation (sans unité).

Humidité relative

Elle correspond au rapport (équation 1.45) entre la pression de vapeur p_v et la pression de vapeur saturante $p_{v,sat}$ à la même température (MCHIRGUI 2012).

$$HR = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (1.45)$$

Avec HR l'humidité relative(%), P_v la pression de la vapeur d'eau (Pa) et P_{sat} la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa).

Taille des pores

Les pores sont classés par taille (ROUQUEROL et al. 1994) selon le tableau 1.3.

Micropores	Mésopores	Macropores
Taille inférieure à 2 nm	Taille entre 2 et 50 nm	Taille au-delà de 50 nm

TABLEAU 1.3 – Taille des pores.

Par ailleurs, les matériaux poreux sont généralement séparés en deux catégories selon le tableau 1.4 (QUÉNARD 1989).

Matériau hygroscopique	Matériau non-hygroscopique
Rayon des pores < 100 nm	Rayon des pores > 100 nm
Sorption et condensation capillaire importante	Sorption et condensation capillaire faible
Diffusion de Knudsen	Diffusion moléculaire libre

TABLEAU 1.4 – Classement des matériaux poreux.

Tortuosité

La tortuosité est définie comme le rapport entre la longueur moyenne des lignes de flux L_e et la longueur L du matériau (ISSAADI 2015) selon l'équation 1.46 (Figure 1.14).

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (1.46)$$

Avec τ la tortuosité (sans unité), L_e la longueur moyenne des lignes de flux (m), L la longueur de l'échantillon (m).

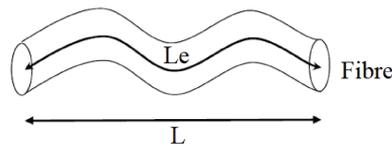


FIGURE 1.14 – Tortuosité (adaptée de ISSAADI 2015).

1.2.3 Transferts hydriques

1.2.3.1 Liaisons eau-fibres

Propriétés moléculaires de l'eau

La molécule d'eau est composée d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogènes reliés entre eux par une liaison covalente. L'oxygène possède deux doublets non liants et dans ce système tétraédrique, la molécule est dite coudée avec un angle formé de $104,5^\circ$. L'eau est une molécule dite polaire, c'est-à-dire qu'elle forme un dipôle dû à la charge négative de l'atome d'oxygène et de la charge positive de l'atome d'hydrogène. L'oxygène capte plus facilement les électrons que l'hydrogène, ainsi deux molécules d'eau proches auront tendances à s'attirer dû à l'électrostatisme entre l'atome d'oxygène, capteur, et l'atome d'hydrogène, donneur, en formant une liaison hydrogène (figure 1.15).

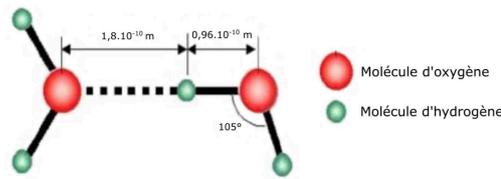


FIGURE 1.15 – Représentation moléculaire de la molécule d'eau (adaptée de HAMOUCHE 2012).

Liaisons directes et indirectes

La première molécule d'eau, rencontrant la surface de la fibre ou du polymère, est adsorbée directement sur les groupements hydrophiles de celui-ci par liaisons hydrogènes. La liaison de cette molécule d'eau avec la fibre est dite « directe » (figure 1.16). Ces molécules d'eau forment l'eau dite « liée » avec la fibre polymère. Pour les suivantes, elles sont attirées par les autres groupements hydrophiles situés à côté (liaison directe), ou autrement elles peuvent se placer au-dessus des molécules déjà adsorbées à la surface de la fibre pour former des liaisons dites « indirectes » avec celle-ci (HEARLE et MORTON 2008). Ces molécules d'eau, accumulées au-dessus des précédentes, forment l'eau dite « non liée » ou « libre ». Au sein des pores de la fibre pour une humidité importante, la pression partielle de vapeur d'eau étant trop élevée, l'énergie de liaison entre la fibre et l'eau est rendue si faible que les liaisons entre les molécules d'eau se rompent et forment une simple condensation capillaire au sein des pores. Elles forment l'eau dite « capillaire ».

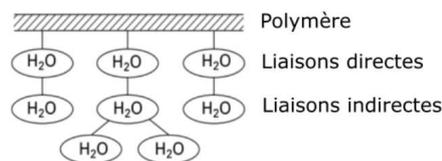


FIGURE 1.16 – Liaisons directes et indirectes de la molécule d'eau avec la fibre (adaptée de HEARLE et MORTON 2008).

Les molécules adsorbées peuvent passer d'un site à un autre site voisin en franchissant une barrière énergétique caractérisée par la loi d'Arrhenius (DAIAN 1986) selon l'équation 1.47.

$$k = A_{Ar} \times e^{\frac{-E_a}{R_{gz} \times T}} \quad (1.47)$$

Avec k la constante de vitesse, A_{Ar} la constante d'Arrhenius, E_a l'énergie d'activation (J.mol^{-1}), R_{gz} la constante des gaz parfait ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T la température (K).

D'après la figure 1.17, dans le cas particulier des groupements OH présentant la plus forte affinité avec l'eau, les liaisons directes entre les molécules d'eau et le polymère ont

lieu au niveau de la surface extérieure de la fibre (1), dans les régions amorphes (2), à la surface interne des espaces vides (trous et cavités) (3) et des cristallites (4). Les liaisons indirectes, quant à elles, ont lieu à la surface des molécules d'eau liées directement avec la fibre. Les mécanismes d'adsorption rapides tels que les liaisons directes prédominent sur les mécanismes d'adsorption lents comme les liaisons indirectes. Par ailleurs, à faible humidité, les molécules d'eau sont adsorbées prioritairement sur les surfaces externes et les régions amorphes désordonnées de la fibre (BELBEKHOUCHE et al. 2011 ; PAN et GIBSON 2006 ; OKUBAYASHI, GRIESSER et BECHTOLD 2004).

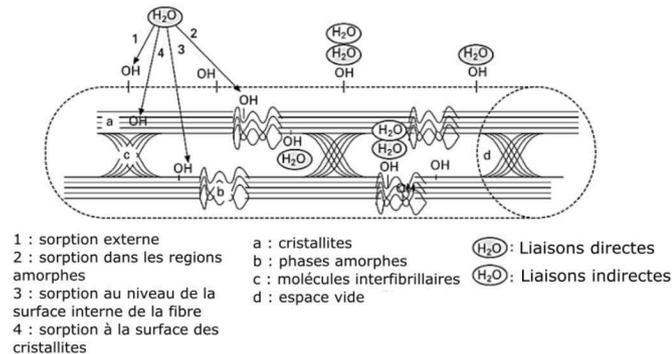


FIGURE 1.17 – Sorption des molécules d'eau sur une fibre polymère (adaptée de OKUBAYASHI, GRIESSER et BECHTOLD 2004).

Régions cristallines et amorphes

Dans les régions cristallines, les molécules sont positionnées les unes à côté des autres selon un schéma régulier et les groupements actifs forment des liaisons transversales entre celles-ci. Les groupements chimiques de la fibre ont une mobilité très réduite et dans ce cas il est difficile pour les molécules d'eau de s'y insérer, le seul moyen est de rompre les liaisons transversales pour libérer les groupements actifs. Dans les régions amorphes, les molécules d'eau pénètrent facilement à l'intérieur de la structure fibreuse en écartant les chaînes macromoléculaires (HEARLE et MORTON 2008). Ainsi, les fibres présentant des zones cristallines importantes vont absorber moins d'eau que celles constituées essentiellement de zones amorphes. Ce phénomène est mis en avant dans une étude comparative des capacités de sorption et de désorption en eau entre une fibre de coton et de lyocell (OKUBAYASHI, GRIESSER et BECHTOLD 2004). Le lyocell présente un degré de cristallinité plus faible (régions cristallines peu présentes) que celui du coton et va par conséquent être capable de stocker une quantité plus importante d'eau au sein de sa structure.

1.2.3.2 Types de transfert

Les transferts d'humidité en milieu poreux ont lieu par diffusion, capillarité, évaporation-condensation et écoulement de l'eau liquide.

Diffusion

Les processus de diffusion sont de plusieurs types, i.e., la diffusion moléculaire, la diffusion de Knudsen et la diffusion de surface. Les deux premières sont gouvernées par la taille des pores et le libre parcours moyen. Tous ces procédés ne sont pas dissociés et se produisent en même temps au sein du matériau.

- Libre parcours moyen

Le libre parcours moyen (lpm) est la distance parcourue par la vapeur d'eau entre deux chocs moléculaires. Il dépend du nombre de molécules en présence dans le milieu et par conséquent de la pression totale du gaz (DUFORSTEL 1992). Il est défini selon l'équation 1.48 (GIDIK 2015).

$$lpm = \frac{1}{\pi \times \sqrt{2} \times n \times N_{AV} \times \delta_{\text{molécule}}^2} \quad (1.48)$$

Avec lpm le libre parcours moyen (m), n la concentration molaire (mol.m^{-3}), $n \times N_{AV}$ la concentration moléculaire (m^{-3}), N_{AV} le nombre d'Avogadro, $\delta_{\text{molécule}}$ le diamètre des molécules (m).

- Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire a lieu dans des pores de rayon supérieur au libre parcours moyen où les contacts entre les molécules sont plus fréquents que ceux avec la paroi du pore (figure 1.18). Ce phénomène se produit sous l'effet d'un gradient de pression partielle de vapeur d'eau (EL-CHAKAR 1994; SAHA et GRAPPE 2017).

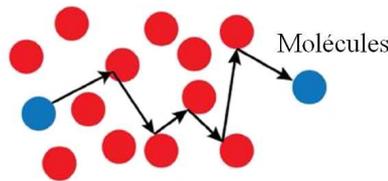


FIGURE 1.18 – Diffusion moléculaire (adaptée de ABELÉ et al. 2009).

Ce phénomène est décrit ci-dessous par la loi de Fick (ABELÉ et al. 2009) selon l'équation 1.49.

$$\Phi_m = -\rho \times D_v \times S \times \frac{\Delta X}{L} \quad (1.49)$$

Avec Φ_m le flux massique (g.s^{-1}), ρ la masse volumique (g.m^{-3}), D_v le coefficient de diffusion moléculaire ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), S la surface (m^2), X la concentration de la vapeur d'eau ($\text{m}_{\text{eau}}.\text{m}_{\text{masse}}^{-1}$), L la longueur de l'échantillon (m).

Le coefficient de diffusion D_v dépend de la pression totale et de la température, il est défini dans la littérature selon l'équation 1.50 (DAIAN 1986).

$$D_v = \frac{1}{3} \times lpm \times \bar{v} \quad (1.50)$$

Avec D_v le coefficient de diffusion moléculaire ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), lpm le libre parcours moyen (m), \bar{v} la vitesse moyenne des molécules ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

- Diffusion de Knudsen

Dans les pores de rayon inférieur au libre parcours moyen, le transfert de vapeur a lieu selon la diffusion de Knudsen (figure 1.19). Dans ce cas, les chocs des molécules contre les parois du pore sont plus fréquents qu'entre les molécules elles-mêmes (ABELÉ et al. 2009; SAHA et GRAPPE 2017).

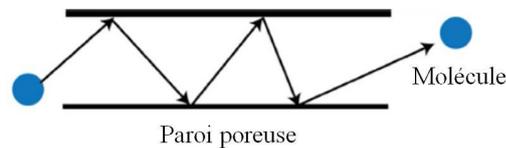


FIGURE 1.19 – Diffusion de Knudsen (adaptée de ABELÉ et al. 2009).

Ce phénomène, comme pour la diffusion moléculaire, est également gouverné par la loi de Fick (DAIAN 1986) selon l'équation 1.51.

$$D_K = \frac{2}{3} \times r \times \bar{v} \quad (1.51)$$

Avec D_K le coefficient de diffusion de Knudsen ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), r le rayon du pore (m), \bar{v} la vitesse moyenne des molécules ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Le nombre de Knudsen (équation 1.52), exprimé en fonction du libre parcours moyen et du diamètre du pore, est égal ou supérieur à 1 lorsque le transfert de vapeur est réalisé selon la diffusion de Knudsen (ZHANG 2014).

$$K_n = \frac{lpm}{\delta_{\text{pore}}} \quad (1.52)$$

Avec K_n le nombre de Knudsen (sans unité), lpm le libre parcours moyen (m), δ_{pore} le diamètre d'un pore (m).

- Diffusion de surface

Initialement, les molécules sont adsorbées directement à la surface des pores et elles forment un film monocouche, par la suite, les suivantes s'accumulent les unes sur les autres quand les sites d'adsorption sont tous occupés. Les molécules

plus faiblement liées avec le matériau, c'est-à-dire celles situées sur les couches supérieures, peuvent se déplacer d'un site d'adsorption à un autre pour diffuser vers les régions de plus faible concentration en vapeur d'eau. Ce phénomène est appelé diffusion de surface (SAHA et GRAPPE 2017; ZHANG 2014), Il est représenté selon la figure 1.20.

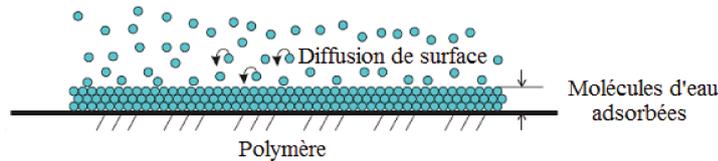


FIGURE 1.20 – Diffusion de surface (adaptée de ZHANG 2014).

Capillarité

Le transport de l'humidité dans les pores est gouverné par un gradient de pression capillaire. Les molécules d'eau s'adsorbent à la surface jusqu'à former une monocouche (figure 1.21). Les molécules suivantes s'accumulent par-dessus celles-ci jusqu'au moment où les molécules adsorbées aux deux parois se rejoignent pour former un pont capillaire (FOURMENTIN 2015). Les lois de Laplace et de Kelvin décrivent cette interface moléculaire.

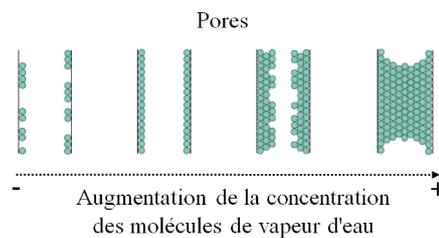


FIGURE 1.21 – Transport de l'humidité par capillarité (adaptée de FOURMENTIN 2015).

Par ailleurs, la phase liquide présente au sein du matériau remplit totalement certains pores du milieu en formant des amas plus ou moins étendus. Elle est définie comme l'eau capillaire (HERNANDEZ 2002).

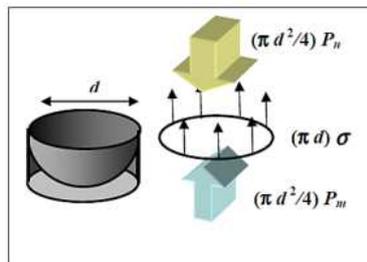
- Loi de Laplace

Pour une humidité relative importante, au sein d'un pore, les couches plurimoléculaires de molécules d'eau s'accumulent et même se rejoignent si le diamètre des pores est suffisamment petit. Ainsi, au sein du matériau, deux phases sont en équilibre, liquide et gazeuse. Cet équilibre mécanique est rendu possible sous l'effet des forces de tension interfaciale s'exerçant sur son périmètre et par celles agissant de part et d'autre de sa surface (LELIÉVRE 2015). Ainsi, une interface capillaire se dessine entre la phase liquide et la phase gazeuse. Elle peut être de forme hémisphérique en s'appuyant tangentiellement sur un pore cylindrique ou de forme cylindrique en s'appuyant tangentiellement sur les parois d'une fissure

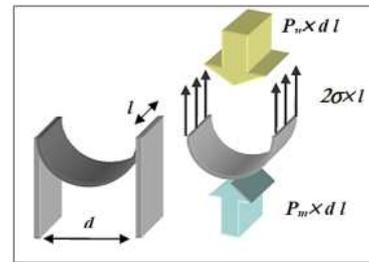
à parois planes parallèles (figure 1.22). La pression régnant dans le fluide non mouillant (phase gazeuse) d'indice n est supérieure à celle du fluide mouillant (phase liquide) d'indice m . La loi de Laplace traduit ce phénomène (DAIAN 2010) (équation 1.53).

$$P_c = -\Psi = P_n - P_m = \frac{\sigma}{R_c} \quad (1.53)$$

Avec P_c la pression capillaire (Pa ou $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$), σ la tension interfaciale ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$), R_c le rayon de courbure (m), Ψ le potentiel capillaire (Pa).



(a) Interface sphérique, $R_c = \frac{d}{4}$.



(b) Interface cylindrique, $R_c = \frac{d}{2}$.

FIGURE 1.22 – Forme de l'interface capillaire (DAIAN 2010).

Le rayon de courbure pour une interface sphérique est de $R_c = \frac{d}{4}$. Dans ce cas, la loi de Laplace s'écrit selon l'équation 1.54.

$$P_c = \frac{\sigma}{R_c} = \frac{4 \times \sigma}{d} \quad (1.54)$$

Avec d le diamètre du pore (m).

Si l'interface est de forme cylindrique, le rayon de courbure d'un cylindre de diamètre d est $R_c = \frac{d}{2}$. L'influence de la courbure de l'interface de forme sphérique sur la pression capillaire est représentée à 25 °C ($\sigma = 0,072 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) (figure 1.23).

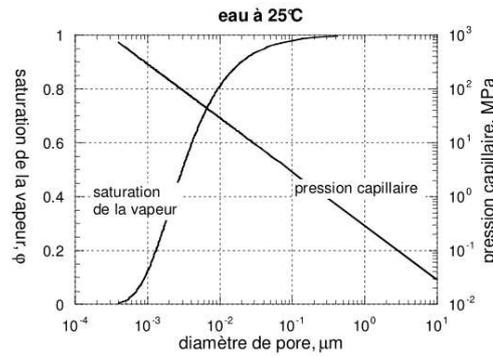


FIGURE 1.23 – Effet de la courbure d’interface ($R_c = \frac{d}{4}$) sur la pression capillaire (Loi de Laplace) et sur le taux de saturation de la vapeur (Loi de Kelvin) (adaptée de DAIAN 2010).

- Loi de Kelvin

La courbure des interfaces capillaires et l’abaissement de la pression dans la phase liquide a tendance à modifier les conditions d’équilibre avec la vapeur. La relation entre la pression capillaire et le taux de saturation de la vapeur s’obtient en exprimant l’égalité des potentiels thermodynamiques. Le potentiel thermodynamique d’un corps à l’état liquide, de masse volumique invariable ρ_l , est donné d’après l’équation 1.55 (DAIAN 2010).

$$\Phi_l = \frac{P_l - P_{sat}}{\rho_l} \quad (1.55)$$

Avec Φ_l le potentiel thermodynamique du liquide (J.kg^{-1} ou $\text{Pa.m}^3.\text{kg}^{-1}$), P_l la pression de la phase liquide (Pa), P_{sat} la pression de saturation de la vapeur d’eau (Pa), ρ_l la masse volumique de la phase liquide (kg.m^{-3}).

Le potentiel thermodynamique de la vapeur, composant des gaz parfaits, est exprimé selon l’équation 1.56.

$$\Phi_v = \frac{R_{gz} \times T}{M_{mol}} \times \ln\left(\frac{P_{vap}}{P_g}\right) \quad (1.56)$$

Avec Φ_v le potentiel thermodynamique de la phase vapeur (J.kg^{-1}), P_{vap} la pression de la phase vapeur (Pa), P_g la pression du gaz (Pa), R_{gz} l’indice de transport ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T la température (K), M_m la masse molaire (kg.mol^{-1}).

En exprimant l’égalité des potentiels, la loi de Kelvin est décrite selon l’équa-

tion 1.57.

$$\Phi_l = \Phi_v = P_g - P_l = -\frac{\rho_l \times R \times T}{M_{mol}} \times \ln\left(\frac{P_{vap}}{P_{sat}}\right) \quad (1.57)$$

Ainsi, la loi de Laplace et la loi de Kelvin peuvent être mises en relation (équation 1.58). A une humidité relative donnée, il est possible de déterminer quels pores (forme sphérique) peuvent se remplir d'eau liquide.

$$P_c = P_g - P_l = -\frac{\rho_l \times R \times T}{M_{mol}} \times \ln\left(\frac{P_{vap}}{P_{sat}}\right) = \frac{\sigma}{R_c} = \frac{4 \times \sigma}{d} \quad (1.58)$$

Pour une humidité relative donnée, tous les pores de rayon R_c vérifiant l'équation 1.59 sont saturés d'eau capillaire (DUFORSTEL 1992).

$$R_c < -\frac{\sigma \times M_{mol}}{\rho_l \times R \times T \times \ln\left(\frac{P_{vap}}{P_{sat}}\right)} \quad (1.59)$$

Évaporation-condensation

Le phénomène d'évaporation et de condensation de l'eau a lieu à l'interface eau liquide-gaz. D'après la figure 1.24, l'humidité s'évapore du point B (phase liquide) pour devenir une phase gazeuse. L'humidité, sous forme vapeur, est transportée jusqu'au point C où elle se condense. Ce phénomène est causé par l'absence d'équilibre entre la pression de vapeur d'eau (segment BC) et les pressions capillaires (segments AB et CD) aux alentours des interfaces. Lorsqu'il n'y a pas d'eau sous forme liquide au sein du pore, un film fin se forme à la surface interne de celui-ci. Ce film est soumis aux forces de Van der Waals entre les parois du pore et les molécules d'eau. Il évolue en fonction de la pression capillaire.

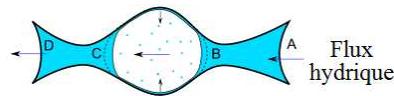


FIGURE 1.24 – Phénomène d'évaporation et de condensation dans un pore (adaptée de ZHANG 2014).

Écoulement de l'eau liquide

Quand le matériau est entièrement saturé en eau liquide, son écoulement est causé par un gradient de pression. La loi de Darcy décrit ce processus (A. DAS et ALAGIRUSAMY

2010; LELIÉVRE 2015) selon l'équation 1.60.

$$V_c = \frac{k_p}{\eta} \times \frac{\Delta P_c}{L} \quad (1.60)$$

Avec V_c la vitesse apparente du liquide ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), k_p la perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2), η la viscosité du liquide ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), P_c la pression capillaire (Pa), L la longueur de l'échantillon (m).

1.3 Impact des fibres sur le confort

La nature des fibres influencent les transferts hydriques et thermiques en statique et en dynamique.

1.3.1 Transferts statiques

Dans des conditions stationnaires, différents paramètres influencent le confort au porté des vêtements comme les résistances thermique et à la vapeur d'eau; la conductivité, la diffusivité et l'effusivité thermiques des textiles; la capacité d'absorption de l'humidité, le taux de transmission de la vapeur d'eau, le transfert d'humidité par effet mèche, les taux de séchage et de reprise en eau, ainsi que le transfert de l'eau liquide.

Résistance et conductivité thermiques

La résistance thermique est définie comme le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique d'un textile. Ce paramètre caractérise l'isolation thermique d'un tricot. Mijović et al. comparent la résistance thermique (R_{ct}) mesurée à partir d'une plaque chaude gardée transpirante pour un textile contenant du coton avec et sans élasthanne. L'ajout d'élasthanne a pour effet d'augmenter la valeur de R_{ct} du textile (MIJOVIĆ, SALOPEK ČUBRIĆ et SKENDERI 2010). Le coton présente une conductivité thermique plus élevée qu'un textile composé d'un mélange de fibres avec polyéthylène téréphtalate (PET) (S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005) ou seulement de fibres PET (HATCH et al. 1990). Le caractère hydrophile du coton améliore la conductivité des fibres. Le polyester composé de fibres épaisses, possède une porosité plus élevée et présente une valeur de conductivité thermique plus faible (HATCH et al. 1990) (tableau 1.5). Le chanvre présente la conductivité thermique la plus faible par rapport à la viscose et au coton. Le transfert de chaleur a lieu lorsque les fibres se touchent. Les espaces interfils du chanvre sont remplis d'air réduisant l'échange de chaleur. La conductivité thermique de la viscose est importante (PAVLOVIĆ et al. 2014; STANKOVIĆ, POPOVIĆ et POPARIĆ 2008), ainsi le transfert de chaleur est principalement réalisé par conduction alors que le coton présente une valeur plus faible en raison de sa quantité élevée d'air présent au sein des fibres. L'air emprisonné entre les fibres à l'intérieur du fil agit comme un isolant (STANKOVIĆ, POPOVIĆ et POPARIĆ 2008).

Type de Fibres	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Coton	0,026
PET	0,023
Viscose	0,031

TABLEAU 1.5 – Conductivités thermiques des fibres (adaptée de S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005; HATCH et al. 1990; PAVLOVIĆ et al. 2014; STANKOVIĆ, POPOVIĆ et POPARIĆ 2008).

Diffusivité thermique

La diffusivité thermique mesure la rapidité de propagation de la chaleur à travers le matériau fibreux. Une valeur élevée est obtenue pour les matériaux ayant des valeurs de conductivité thermique élevées. Ce paramètre est le plus important pour la viscose, suivi du chanvre et du coton. La diffusivité thermique du coton est la plus faible car le volume d'air emprisonné au sein des fibres est importante (PAVLOVIĆ et al. 2014).

Effusivité thermique

Le transfert de chaleur au sein du matériau dépend également de la surface de contact. L'effusivité thermique permet de déterminer la sensation au premier contact. Une effusivité thermique importante procure une sensation froide. Les fibres de polychlorure de vinyle (PVC), polypropylène (PP) et d'acrylique (PAN) procurent une impression de chaleur. Pour la viscose et le coton, la sensation au premier contact est froide. Le coton présente une valeur élevée par rapport au mélange coton/PET, la sensation est plus froide au premier touché. Ainsi, le type de fibre en contact avec la peau influence la température ressentie par le porteur (S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005).

Absorption d'humidité

Ce paramètre est utilisé pour déterminer la quantité de liquide retenue par le textile. Une valeur faible indique que le textile absorbe peu d'humidité. Pour les fibres de PET, dans le cas d'une sudation importante, la transpiration n'est pas complètement absorbée et reste à la surface de la peau, ce qui engendre une sensation d'inconfort. Dans le cas de la fibre de coton, le liquide est absorbé rapidement en raison de la forte affinité des fibres avec les molécules d'eau et cette transpiration est transportée à l'intérieur du textile. Pour une sudation modérée, la concentration d'humidité sur la surface du textile en contact avec la peau diminue rapidement. Dans le cas contraire lors d'une transpiration abondante, l'humidité n'est pas totalement évacuée. Une sensation d'inconfort est ressentie par l'utilisateur (S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005).

Résistance et taux de transmission à la vapeur d'eau

La vapeur d'eau est généralement transférée à travers le textile par diffusion à travers l'air présent dans les espaces vides ou les pores du textile, à l'intérieur et à la surface des fibres. Similaire à l'étude de la R_{ct} , l'ajout d'élastanne à un tricot en coton augmente la

résistance au passage de la vapeur d'eau R_{et} . Une étude (ÇIL, NERGIS et CANDAN 2009) montre que la diffusion à travers les pores du textile est le mécanisme de diffusion prédominant. Comme les textiles amples sont plus poreux que les tricotés serrés, le taux de transmission de la vapeur d'eau (WVTR), caractérisant la capacité du tricot à laisser passer la vapeur d'eau, est plus important dans ce cas. Lorsque le pourcentage de fibres de coton est supérieur au pourcentage de fibres acryliques, le taux de transfert de vapeur d'eau augmente. La réduction de la pilosité des fibres dans le mélange coton explique ce phénomène, les fils sont plus compacts et la distance inter-fils augmente. Hatch et al (HATCH et al. 1990) étudient l'impact du PET et des fibres de coton sur le taux de transmission de la vapeur d'eau. Un textile PET présente un WVTR plus élevé qu'un tricot en coton. Les fils de polyester plus fin ont un taux de transmission de vapeur d'eau plus élevé en raison d'une porosité plus importante qu'avec un textile composé de fils plus dense. La résistance au passage de la vapeur d'eau est causée principalement par la géométrie du textile plutôt que par les propriétés physiques de la fibre selon Yoon et Buckley (YOON et BUCKLEY 1984). Les fibres à l'intérieur du coton sont orientées perpendiculairement au chemin de diffusion et les pores longitudinaux participent peu au processus de diffusion. La diffusivité dans les fibres hydrophiles comme le coton est de $10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ alors que pour un tissu PET hydrophobe, cette valeur est de $10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Transfert d'humidité par capillarité

Cil et al. comparent le transfert hydrique par capillarité (effet mèche) du coton et des fibres acryliques. Lorsque le pourcentage de coton augmente, le transfert hydrique par mèche diminue en raison de la capacité du coton à emmagasiner davantage d'eau que l'acrylique. Le coton gonfle et augmente son volume, ce qui retarde le transfert d'humidité et diminue l'espace entre fibres. De plus, un fil très fin présente un transfert d'humidité plus faible qu'un fil épais. Un textile serré transmet davantage d'humidité qu'un textile lâche (ÇIL, NERGIS et CANDAN 2009).

Taux de séchage

Le nombre de fils est le paramètre qui a le plus d'impact sur le séchage, suivi de la nature des fibres et de la compacité du tricot. Les échantillons textiles constitués de fils fins sèchent plus rapidement que ceux contenant des fils plus denses. Ce phénomène est associé à l'augmentation de la taille des pores lors de l'utilisation de fils fins. Comparé au coton, l'acrylique a un taux de séchage plus élevé par sa bonne capacité à transférer l'humidité par effet mèche et à son faible taux de reprise en eau (ÇIL, NERGIS et CANDAN 2009).

Taux de reprise en eau

Ce paramètre est plus important pour le coton que pour les fibres acryliques, tandis que le mélange acrylique/coton présente des valeurs intermédiaires. Une étude statistique a révélé que le taux de reprise en eau est principalement influencé par la nature des fibres. De plus, un fil plus gros a tendance à prendre plus d'humidité qu'un fil fin. Ce

paramètre est inversement corrélé avec la vitesse de séchage et le transfert d'humidité par effet mèche (ÇIL, NERGİS et CANDAN 2009).

Transfert de l'humidité liquide

Le paramètre « OMMC », représentant la capacité globale de diffusion d'humidité, est mesuré entre une plage de 0,21 à 0,41 pour le coton, 0,44 à 0,57 pour la viscose et de 0,50 à 0,62 pour les tricots en polyester. Les fibres synthétiques ont une meilleure gestion de l'eau liquide que les tricots à base de cellulose. Un tricot serré diminue l'OMMC global. L'indice de transport (R) correspondant à la différence de contenu en liquide cumulé entre les deux surfaces de l'étoffe est positif pour un polyester, le textile transfère facilement et rapidement l'eau liquide de la surface interne vers la surface extérieure. Pour le coton, cette valeur est négative car l'eau stockée par le textile reste au sein des fibres. La sueur est adsorbée par le coton mais le textile reste humide car le liquide est maintenu dans la structure fibreuse. Ainsi, dans le cas de textiles à base de fibres polyester, les molécules d'eau liquide créent peu de liaisons à la surface des fibres en raison de leur caractère hydrophobe. Ainsi, l'eau est facilement transportée vers l'extérieur (ÖNER et al. 2013). Bedek et al. montrent que la fibre polyamide présente un OMMC élevé en mouillant peu le textile. Cette tendance est inversée pour les matériaux contenant du coton avec une capacité d'absorption rapide et un séchage lent. Les fibres PET transfèrent facilement l'eau liquide à l'extérieur du textile avec un rayon de mouillage important (BEDEK et al. 2011). Pour l'acrylique et les fibres sensibles à l'humidité, l'eau liquide est facilement transférée vers l'environnement extérieur et l'OMMC mesuré est élevé. Dans le cas d'un mélange de fibres PET et d'acryliques, l'eau liquide est absorbée et transportée lentement, ce qui entraîne un séchage lent.

1.3.2 Transferts dynamiques

Les modèles de Min, Fenghzi et Xu étudient l'influence de la nature des fibres sur les transferts hydriques et thermiques en dynamique.

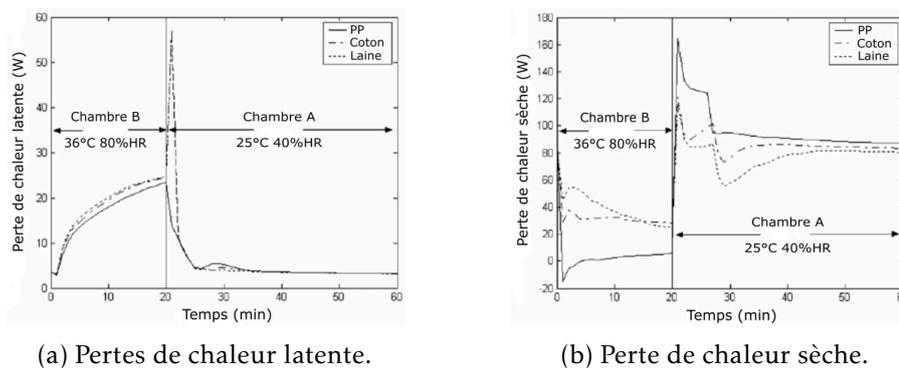
1.3.2.1 Modèle de Min

D'après le modèle de Min (MIN et al. 2007), dans le cas du coton avec les conditions suivantes, température extérieure réglée à 298 K, une épaisseur textile et du microclimat respectivement de 2 mm et 5 mm, une diffusivité de surface de $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; la contribution des échanges par conduction, rayonnement et par diffusion sont respectivement de 17,6 %, 21,0 % et 61,4 %. Les échanges radiatifs entre la surface extérieure du textile et l'environnement prédominent sur les transferts par convection naturelle. Lorsque la diffusion en surface devient importante, la contribution de celle à travers les pores est négligeable. Dans ce cas, le transfert d'humidité se fait uniquement par diffusion moléculaire à travers le microclimat et par des échanges convectifs avec l'environnement externe. Celle en surface caractérisant le transport de la vapeur d'eau adsorbée à la surface de la fibre est un paramètre important à prendre en compte. Elle dépend de la

nature de la fibre (hydrophile ou non), de la tortuosité du textile, de la taille des pores et de la surface totale du textile.

1.3.2.2 Modèle de Fengzhi

Le comportement des textiles en laine, coton et polypropylène est testé selon le modèle de Fengzhi (FENGZHI et YI 2005). Pour cette étude, les textiles sont testés dynamiquement en les soumettant à un environnement de 25 °C et 40 % Humidité relative (HR) (état initial : chambre A), puis à une atmosphère réglée à 36 °C et 80 %HR (chambre B) et ils sont de nouveau placés dans la chambre A. Les textiles ont la même épaisseur (2mm) et la même porosité (88 %). La perte de chaleur latente (figure 1.25a) causée par l'évaporation de la sueur est plus importante lorsque le sujet est recouvert d'un habit en laine, en coton puis en PP. La laine est une fibre très hygroscopique et elle a la capacité d'emmagasiner une plus grande quantité d'humidité que le PP hydrophobe, donc la laine libère davantage de chaleur lorsque l'humidité est évaporée. Selon la figure 1.25b, les pertes à sec (rayonnement, convection) sont plus importantes pour une personne habillée avec des vêtements en laine dans un environnement humide et chaud (salle B). Dans l'environnement de la chambre A, les pertes enregistrées pour le PP sont plus élevées que pour les autres matériaux. Le PP présente une faible affinité avec les molécules d'eau et lorsqu'il passe d'un environnement très humide (80 %HR) à un environnement sec (40 %HR), l'eau est rapidement et facilement évacuée avec l'environnement extérieur de la chambre A.



(a) Pertes de chaleur latente.

(b) Perte de chaleur sèche.

FIGURE 1.25 – Modèle de Fengzhi, perte de chaleur sèche et latente des tricots composés de fibres PP, coton et laine (adaptée de LEAHY et al. 2007).

Pour les pertes de chaleur totales (figure 1.26), dans la chambre B (36 °C, 80 %HR), la laine et le coton absorbent une grande quantité d'humidité sous forme de vapeur et dégagent donc plus de chaleur que les fibres de PP. La température de la laine à l'intérieur du vêtement est la plus élevée, suivie du coton et du PP. Par conséquent, dans l'environnement de la chambre B, la somme des pertes de chaleur pour un vêtement en laine est plus grande que celle des autres textiles. En passant d'un environnement chaud et humide (chambre B) à un environnement tempéré (chambre A), les tendances

décrites précédemment sont inversées. La quantité d'humidité emmagasinée par les textiles composés de laine ou de coton est plus élevée que pour les fibres PP. Les pertes de chaleur latente sont ainsi plus importantes pour la laine dans la pièce B.

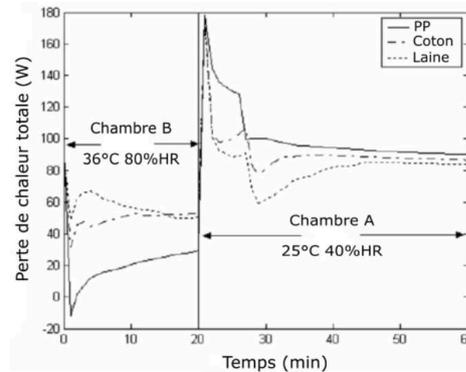


FIGURE 1.26 – Modèle de Fengzhi, perte de chaleur totale pour les tricots en PP, coton et laine (adaptée de FENGZHI et YI 2005).

1.3.2.3 Modèle de Xu

Le modèle Xu est utilisé pour étudier le comportement du coton et du polyester lorsque la température et l'humidité de l'environnement varie (X. XU et WERNER 2001).

Cas 1 : Température variable

Le sujet porte un vêtement en coton d'une masse surfacique de $0,195 \text{ kg.m}^{-2}$ et avec un taux de reprise en eau de 8 %. Le comportement du tissu est étudié lorsque le sujet passe d'un environnement tempéré (28°C , 40 %HR) pendant 30 minutes à un environnement plus chaud (45°C , 40 %HR) pendant 120 minutes puis revient à l'état initial (environnement tempéré) pendant 30 minutes. La figure 1.27 montre que la température moyenne de la peau augmente lorsque le coton est dans un environnement chaud (45°C , 40 %HR) et diminue lorsqu'il est placé dans un environnement tempéré (28°C , 40 %HR). Lorsque la température de l'environnement extérieur (45°C) est supérieure à celle de la peau (35°C), les échanges de chaleur s'effectuent de l'environnement vers le corps et par conséquent la température moyenne de la peau augmente car le corps gagne de la chaleur.

Dans le cas de vêtements composés de fibres très hygroscopiques, la température de la peau et la quantité de sueur produite est plus élevée, les pertes de chaleur sont plus importantes qu'avec des fibres PP hydrophobes dans un environnement chaud et humide.

Cas 2 : Humidité variable

Dans cette étude, les sujets portent des vêtements en polyester et en laine. La température est fixée à 23°C et les sujets sont placés dans un environnement sec (20 %HR) puis dans

un environnement humide (80 %HR). Dans le cas de la laine, la température de la peau est plus importante en passant d'un environnement 20 %HR à une atmosphère de 80 %HR (figure 1.28). La laine, en absorbant l'humidité, libère de la chaleur et augmente la température de l'ensemble vestimentaire et de la peau. Dans le cas du polyester, la température de la peau augmente peu lorsque l'humidité change. La fibre polyester est moins hygroscopique que la fibre de laine et en absorbant moins d'humidité elle dégage peu de chaleur. Par conséquent, la température mesurée varie peu, ce qui signifie que peu d'échanges ont lieu entre le textile et la peau.

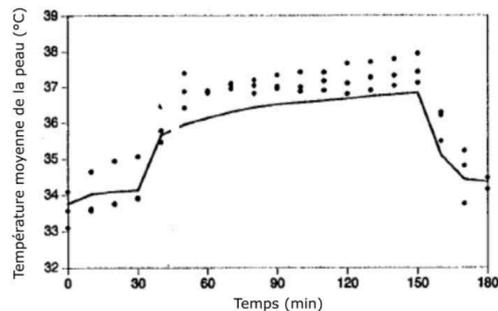


FIGURE 1.27 – Modèle de Xu, comparaison entre la simulation (ligne) et les résultats expérimentaux (symbole) pour le coton lorsque la température varie de 28 °C à 45 °C et retourne à 28 °C et 40 %HR (adaptée de X. XU et WERNER 2001).

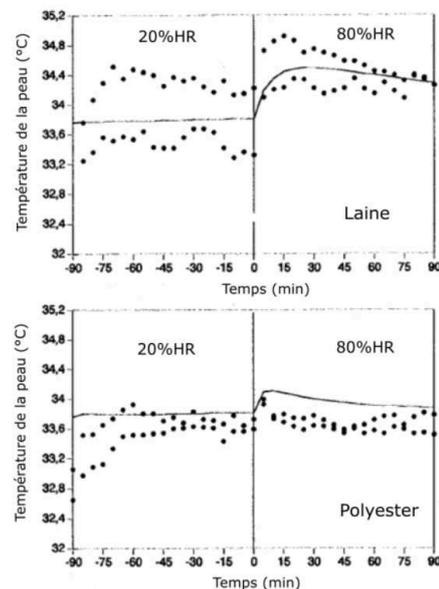


FIGURE 1.28 – Modèle Xu, comparaison entre la simulation (ligne) et les résultats expérimentaux (symbole) lorsque l'humidité varie entre 20 et 80 %HR à 23 °C pour la laine et les tricots polyester (adaptée de X. XU et WERNER 2001).

1.3.3 Conclusion

Les fibres naturelles telles que le coton, la viscose et le chanvre ont une conductivité thermique, une effusivité thermique et une capacité d'absorption plus élevées que les fibres synthétiques. La sensation au premier contact est froide car les fibres naturelles par leur forte affinité avec les molécules d'eau absorbent la sueur à la surface de la peau pour la transmettre à l'intérieur du textile. Le taux d'émission de vapeur d'eau est influencé par la géométrie de la structure fibreuse et non par la nature des fils qui composent le tricot. Ce paramètre augmente avec la taille des pores du textile. Les fibres synthétiques, présentes une bonne gestion de l'humidité liquide, l'eau est rapidement et facilement transportée vers le milieu extérieur comparé aux fibres naturelles. Le transfert de l'eau liquide est ralenti avec les fibres naturelles en raison de leur grande affinité avec les molécules d'eau. Ces fibres absorbent l'eau et la maintiennent dans la structure fibreuse. Ainsi, les textiles synthétiques sèchent plus rapidement et conviennent mieux aux applications sportives que les fibres naturelles qui absorbent l'humidité en transférant peu celle-ci vers l'environnement extérieur. Selon les modèles de Min, Fengzhi et Xu, les tissus qui absorbent plus d'humidité comme les fibres naturelles dégagent davantage de chaleur que les fibres synthétiques lorsque l'humidité de l'environnement diminue. La diffusion en surface est le mécanisme prédominant lors du transfert d'humidité et il a pour effet de réchauffer la température de la peau. Les fibres synthétiques désorbent l'humidité plus rapidement car leur affinité avec les molécules d'eau est faible, ce qui est conforme à leur bonne capacité à transférer l'humidité par effet mèche.

1.4 Impact du vêtement sur le confort

Différents éléments autour et au sein du vêtement peuvent impacter le confort au porté comme les mouvements de l'air et du corps, la contexture, l'épaisseur, le titre des fils, le coefficient de torsion et la compacité du tricot.

1.4.1 Mouvement du vêtement

Le vêtement peut être mis en mouvement par l'intermédiaire du vent ou par le déplacement de l'utilisateur (HAVENITH 2002; AR, HAL et JONES 2006).

Mouvement de l'air

Les variations de l'isolation thermique du vêtement sont causées par les mouvements d'air à travers les pores du textile (perméodynamique) et à travers les ouvertures (parietodynamique) comme le col, boutons, poignets, bas de jupes ou de pantalons etc. Quand l'ensemble du vêtement est considéré et non plus uniquement le matériau le constituant, les lames d'air présentes entre celui-ci et la peau, et également à la surface externe du vêtement jouent un rôle majeur dans les transferts hydriques et thermiques. L'épaisseur de la lame d'air présente à la surface extérieure du matériau peut dépasser 6 mm. Cette lame d'air est mise en mouvement suivant l'évolution du gradient de température.

En exprimant la résistance à la vapeur d'eau du matériau en unité d'épaisseur d'air équivalente (unité correspondant à la même résistance que celle du matériau étudié), il est possible de considérer qu'un matériau d'une épaisseur de 3 mm produit une résistance au transfert hydrique et thermique équivalente à une épaisseur de $12 + 3 + 6 = 21$ mm (lame d'air emprisonnée entre la peau et le textile + épaisseur d'air équivalente du matériau + lame d'air à la surface extérieure du textile) selon la figure 1.29. Lorsque différentes couches textiles sont empilées, l'isolation totale du vêtement est supérieure à celle d'un textile seul. Par ailleurs, l'épaisseur de la lame d'air présente entre la peau et le textile varie selon le design du vêtement et la forme du corps. En effet, pour un vêtement serré, une faible épaisseur d'air est emprisonnée entre la peau et le textile contrairement à un vêtement lâche. Par ailleurs, pour certaines zones du corps comme les épaules cette lame d'air disparaît.

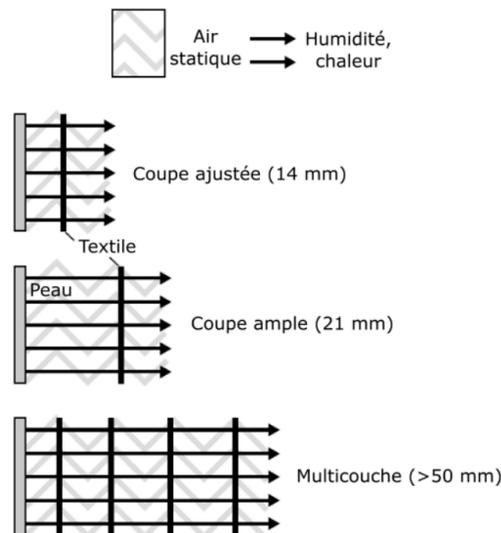


FIGURE 1.29 – Impact des lames d'air sur les résistances thermiques et hydriques totales du vêtement (adaptée de HAVENITH 2002).

L'isolation, apportée par la lame d'air emprisonnée entre la peau et le textile, dépend de plusieurs phénomènes comme le mouvement de l'air et le mouvement du vêtement. Les mouvements de l'air peuvent influencer l'épaisseur, l'humidité et la température de la lame d'air présente entre la peau et le textile. En effet, l'air extérieur peut entrer par les ouvertures du vêtement (col, zip) et les pores du matériau le constituant induisant des perturbations au niveau de la lame d'air présente près du corps. De plus, le vent peut compresser le vêtement sur le corps et diminuer son épaisseur. Par conséquent, les performances d'isolation thermique et hydrique apportées par la lame d'air diminuent considérablement (figure 1.30).

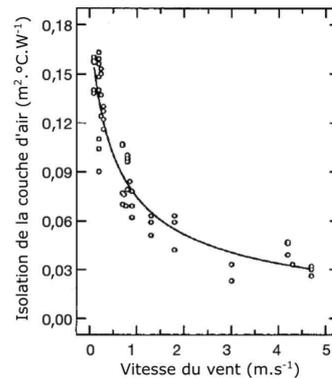


FIGURE 1.30 – Influence de la vitesse du vent sur l'isolation de la surface extérieure du vêtement (adaptée de AR, HAL et JONES 2006).

Mouvement du corps

Les mouvements du corps, comme la marche, vont provoquer un effet de « pompage » de l'air entre les différentes zones du vêtement en forçant les échanges avec le milieu extérieur. De manière générale, les mouvements du corps ont principalement un effet sur les lames d'air emprisonnées et à la surface extérieure du textile, tandis que le vent influence davantage la lame d'air externe et celle située directement en-dessous comme le montre la figure 1.31.

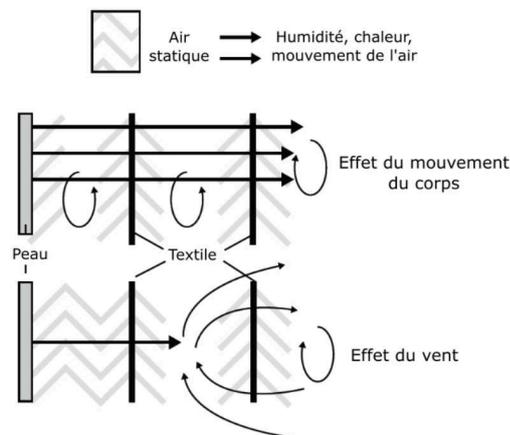


FIGURE 1.31 – Effet des mouvements de l'air et du corps sur les lames d'air (adaptée de HAVENITH 2002).

L'influence de la vitesse de marche et de l'air sur les résistances thermique et de vapeur d'eau est non négligeable. Par exemple, une réduction de 60 % de l'isolation thermique est observée quand un individu marche avec une vitesse d'air de 4 m.s⁻¹ (figure 1.32a). Dans le cas de la vapeur d'eau, une réduction de 80 % est obtenue pour une vitesse d'air de 4 m.s⁻¹ (figure 1.32b).

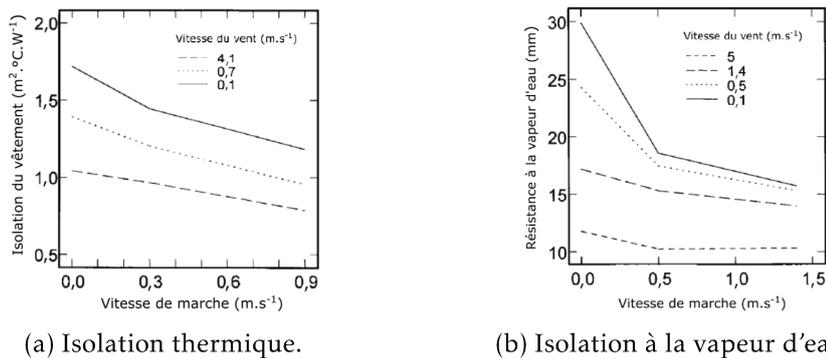


FIGURE 1.32 – Influence de la vitesse de marche et de l'air sur l'isolation thermique et à la vapeur d'eau du vêtement (adaptée de HAVENITH 2002).

1.4.2 Caractéristiques physiques du vêtement

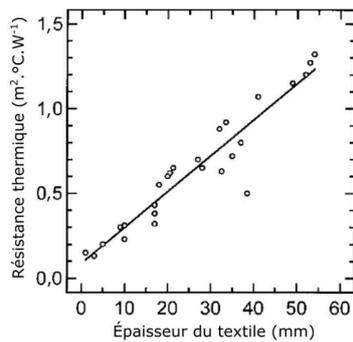
Certaines propriétés physiques du vêtement ont un impact non négligeable sur le confort au porté. Par exemple, la texture, l'épaisseur, le nombre de fils, le coefficient de torsion et le serrage du tricot ont une influence sur les propriétés thermiques et hydriques du textile.

Contexture

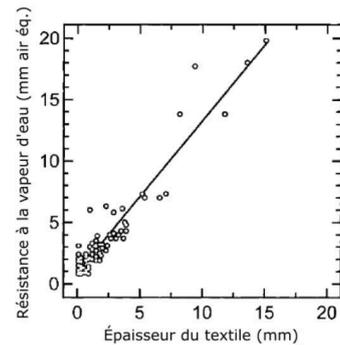
La conductivité thermique et l'effusivité thermique sont plus élevées pour une texture interlock suivi d'une côte 1 × 1 et d'un jersey. La quantité de fibres présente dans la structure d'un interlock est supérieure à celle d'un jersey. Comme la conductivité thermique des fibres est supérieure à celle de l'air, une structure avec une masse surfacique plus importante possède une conductivité thermique élevée (OĞLAKCIOĞLU et MARMARALI 2007). Le flux de chaleur augmente avec la conductivité thermique du matériau, alors la chaleur est facilement transférée au matériau et la sensation au premier contact est plus froide pour les tricots interlock que les jersey (PAVLOVIĆ et al. 2014; OĞLAKCIOĞLU et MARMARALI 2007). La tendance inverse est observée pour la résistance thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau. La résistance thermique est définie comme le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique. Ce paramètre augmente avec l'épaisseur du textile car lorsque davantage d'air est emprisonné dans la structure fibreuse alors le transfert de chaleur diminue. Dans le cas où la résistance à l'humidité est trop importante, l'évacuation de l'excès de chaleur produite vers l'extérieur n'est pas réalisée et cela génère une sensation d'inconfort. Les valeurs de perméabilité à la vapeur d'eau sont importantes pour un jersey suivi d'une côte 1 × 1 et d'un interlock. L'évacuation de l'humidité est facilitée dans les textiles de faible épaisseur (OĞLAKCIOĞLU et MARMARALI 2007). Ainsi, l'interlock et la structure en côtes 1 × 1 est plus adaptée à l'hiver (isolation thermique plus élevée) tandis qu'une contexture jersey convient aux applications sportives avec une gestion de l'humidité améliorée.

Épaisseur

Le vêtement agit comme une barrière aux transferts d'humidité et de chaleur entre le corps et l'environnement. Il protège alors le corps des températures extrêmes et en contrepartie il peut également être source d'inconfort en empêchant l'évacuation de l'excès d'humidité présente à la surface de la peau. Cette barrière est composée du matériau constituant le vêtement, de l'air emprisonnée entre la peau et le textile ainsi que de la couche d'air présente à la surface externe du vêtement. Les transferts de chaleur à travers le vêtement sont principalement conductifs et radiatifs. Le volume de l'air emprisonné est largement supérieur au volume qu'occupe les fibres au sein de celui-ci. Ainsi, l'isolation dépend principalement de l'épaisseur du matériau le constituant. Les fibres vont, quant à elle, influencer les échanges radiatifs car elles peuvent absorber, réfléchir et réémettre les radiations. Cependant, leur effet est négligeable par rapport à l'épaisseur du matériau (figure 1.33a). Le même phénomène apparait pour la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau qui est fortement influencée par la couche d'air emprisonnée à l'intérieur du vêtement. Pour des vêtements fins contrairement aux matériaux épais, la contexture du textile a un impact important sur cette diffusion (figure 1.33b). Par ailleurs, la perméabilité à l'air et le taux de reprise en eau du matériau influencent cette résistance.



(a) Résistance thermique.



(b) Résistance à la vapeur d'eau.

FIGURE 1.33 – Résistance thermique et à la vapeur d'eau du textile en fonction de son épaisseur (adaptée de HAVENITH 2002).

Titre du fil

Lorsqu'un tricot est composé d'un fil de titre faible (fil fin) alors son épaisseur diminue. Dans le cas où l'épaisseur diminue plus que la conductivité thermique, la résistance thermique va également diminuer (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Par ailleurs, une conductivité thermique faible et une perméabilité à la vapeur d'eau élevée sont obtenues pour des fils dont le titre est faible (fil fin). L'effusivité thermique diminue avec la finesse du fil, le tricot plus lâche apporte une sensation de chaleur au premier touché (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). La perméabilité à la vapeur d'eau augmente avec le nombre de fils pour les tricot moyennement et fortement serrés (ÖZDIL,

MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Lorsque le fil est plus fin, la porosité augmente et ce paramètre hydrique suit la même tendance. Selon les résultats issus du MMT, un fil plus fin permet d'augmenter le taux d'absorption, la vitesse de propagation et le rayon maximal tandis que le temps de mouillage du tricot diminue (ÖZDIL, SÜPÜREN et al. 2009).

Coefficient de torsion du fil

Avec l'augmentation du coefficient de torsion, l'absorption thermique et la perméabilité à la vapeur d'eau des tricots suivent la même tendance. Pour les valeurs de torsion comprise entre $\alpha_e = 3,5$ ou $3,69$; l'effusivité thermique n'est pas affectée (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Pour les autres valeurs, ce paramètre augmente avec le coefficient de torsion. La diminution de la pilosité du fil est associée à un coefficient de torsion plus élevé ce qui permet d'augmenter la surface de contact entre la peau et le tissu en procurant un effet plus frais. Les variations ne sont pas statistiquement significatives pour les coefficients de torsion compris entre $\alpha_e = 3,5$ ou $3,69$. Les fils possédant un coefficient de torsion élevé ont une surface moins poilue et le tissu est plus poreux. Dans ce cas, la perméabilité à la vapeur d'eau augmente (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Lorsque la torsion du fil augmente, il s'amincit et l'épaisseur du textile décroît entraînant la diminution de la résistance thermique (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Un coefficient de torsion élevé génère un tissu compact ainsi qu'une diminution du taux d'absorption, de la vitesse de propagation et du rayon de mouillure. Dans ce cas, le temps de mouillage diminue également (ÖZDIL, SÜPÜREN et al. 2009).

Serrage du tricot

Ce paramètre n'a pas d'impact significatif sur la résistance thermique, la conductivité thermique, l'absorptivité thermique selon une régression linéaire (ÖZDIL, MARMARALI et KRETZSCHMAR 2007). Cependant, un textile moyennement serré a tendance à tenir l'utilisateur plus au chaud car il est moins perméable à l'air et empêche ainsi l'évacuation de la chaleur par convection. Les tricots plus lâches laissent passer plus facilement l'air chaud vers l'environnement extérieur.

1.4.3 Conclusion

L'isolation thermique du vêtement peut diminuer considérablement avec le mouvement du corps et du vent. En effet, la couche d'air présente entre la peau et le textile, lieu de nombreux échanges, diminue lorsque l'air pénètre dans le matériau fibreux. Par ailleurs, les mouvements du corps, comme la marche, vont provoquer un effet de « pompage » qui accélère les échanges entre le milieu extérieur, le textile et le corps. La contexture d'un tricot influence les propriétés de conductivité et d'effusivité thermiques. Les tricots interlock et en côte 1×1 présentent une meilleure isolation thermique avec une sensation de fraîcheur au premier touché tandis qu'un jersey, de par sa faible épaisseur, évacue facilement l'excès d'humidité. L'isolation thermique et à la vapeur d'eau d'un vêtement augmentent avec son épaisseur. Le titre du fil influence les propriétés

thermo-hydrriques du vêtement. Un titre faible va diminuer la conductivité et l'absorptivité thermiques tout en augmentant la perméabilité à la vapeur d'eau et la vitesse de propagation de l'eau liquide. Un fil possédant un coefficient de torsion élevé (fil plus compact et moins poilu) permet d'augmenter la perméabilité à la vapeur d'eau et les transferts thermiques en emprisonnant moins d'air au sein de la structure fibreuse. Un tricot, ni trop serré et ni trop lâche, permet de diminuer les pertes convectives causées par le mouvement de l'utilisateur ou par l'action de la vitesse de l'air environnante. Ainsi, l'isolation thermique est assurée par emprisonnement de l'air au sein de la structure fibreuse.

1.5 Évaluation du confort

Les tests usuels caractérisant les échantillons textiles sont décrits dans cette partie. Par ailleurs, différents appareils et indices permettent d'évaluer le confort des étoffes en mesurant les flux hydriques et thermiques à travers les tricots.

1.5.1 Tests usuels

Différents test usuels sont utilisés pour caractériser nos matériaux textiles tel que la masse surfacique, l'épaisseur, la perméabilité à l'air, la porosité et le taux de reprise en eau réel. Pour l'ensemble des tests décrits, les échantillons sont conditionnés à $20 \pm 2,0$ °C et $65 \pm 4,0$ %HR pendant 24 h selon la norme ISO 139 :2005 (ISO139 2005).

1.5.1.1 Masse surfacique

La masse surfacique des échantillons textiles est déterminée selon la norme ISO 12127 :1998 (ISO12127 1998). Elle correspond à la masse d'une étoffe divisée par la surface de celle-ci et exprimée en g.m^{-2} . Les échantillons sont découpés, en évitant de déformer l'étoffe, avec un dispositif de découpe dont la surface est de 100 cm^2 (précision de 1 %). Ils sont par la suite pesés sur une balance à $\pm 1 \text{ mg}$ (5 mesures par échantillon). La masse surfacique M_s est calculée selon l'équation 1.61.

$$M_{\text{surfacique}} = \frac{m_{\text{cond}} \times 10^4}{S} \quad (1.61)$$

Avec $M_{\text{surfacique}}$ la masse surfacique (g.m^{-2}), m_{cond} la masse de l'échantillon conditionnée (g), S la surface de test de l'échantillon (m^2).

1.5.1.2 Épaisseur

L'épaisseur des échantillons est mesurée selon la norme ISO 5084 :1996 (ISO5084 1996). La jauge d'épaisseur mesure ce paramètre (mm) au moyen d'un pied presseur en appliquant une pression de $0,1 \pm 0,001 \text{ kPa}$. Cinq mesures sont réalisées par échantillon.

1.5.1.3 Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air des échantillons est définie à partir de la norme ISO 9237 :1995 (ISO9237 1995). Elle caractérise la vitesse d'écoulement de l'air passant perpendiculairement à travers une éprouvette à une pression, une surface (20 cm²) et une durée donnée. Les échantillons textiles sont préalablement conditionnés selon la norme ISO 139 :2005. La pression appliquée par l'appareil Textest FX3300 est de 100 Pa pour les étoffes d'habillement.

1.5.1.4 Porosité

La porosité est un paramètre statique défini selon l'équation 1.62.

$$P_{\text{porosité}} = \left(1 - \frac{M_{\text{surfactive}}}{\rho \times e}\right) \quad (1.62)$$

Avec $P_{\text{porosité}}$ la porosité (%), $M_{\text{surfactive}}$ la masse surfactive (g.m⁻²) calculée selon ISO 12127 :1998, ρ la masse volumique (g.m⁻³), e l'épaisseur (m) calculée selon l'ISO 5084 :1996.

1.5.1.5 Taux de reprise en eau réel

Pour calculer expérimentalement le taux de reprise en eau, les échantillons sont d'abord mis en étuve à 105± 2,0 °C pendant 16 h et à 70± 2,0 °C pour les échantillons contenant du polyacrylate, ces fibres ont une température de transition vitreuse T_g proche de 80 °C. La masse sèche m_{sec} en sortie d'étuve est mesurée sur une balance de précision à 0,001 g. Par la suite, les échantillons sont placés dans un environnement conditionné à 20± 2,0 °C et 65± 4,0 %HR. Après 24 h, la masse conditionnée m_{cond} des échantillons est mesurée. Le taux de reprise en eau est calculé selon l'équation 1.63.

$$T_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{cond}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{sec}}} \times 100 \quad (1.63)$$

Avec T_{eau} le taux de reprise en eau réel (%), m_{cond} la masse de l'échantillon conditionnée (g), m_{sec} la masse sèche en sortie d'étuve (g).

1.5.2 Transfert de la vapeur d'eau

1.5.2.1 Méthode des récipients

Récipient droit

La méthode du récipient droit peut être utilisée avec de l'eau ou avec un desiccant. Ces deux options influencent le sens du flux de vapeur d'eau.

- Méthode avec l'eau

Un échantillon textile est positionné sur un récipient rempli d'eau distillée. L'ensemble est placé dans une chambre climatique et pesé périodiquement pour déterminer le taux de vapeur d'eau traversant l'étoffe. Le flux part du textile pour se diriger vers l'environnement de la chambre climatique selon la figure 1.34.

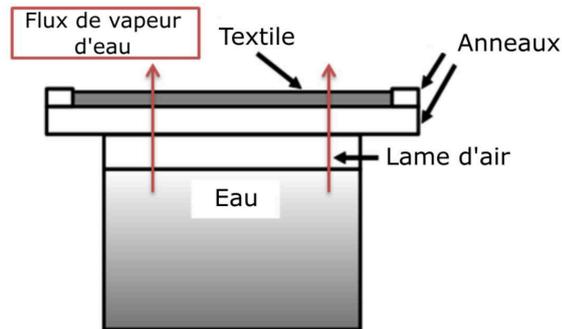


FIGURE 1.34 – Méthode du récipient droit avec l'eau (adaptée de McCULLOUGH, KWON et SHIM 2003).

Une lame d'air est présente entre l'étoffe et la surface de l'eau pour éviter tout contact entre le textile et l'eau liquide. L'échantillon est maintenu en position par un joint en aluminium d'une épaisseur de 0,125 mm. Ce joint est imperméable à la vapeur d'eau. Lors des mesures, le temps d'échantillonnage doit être précis à 1 % du temps défini (par exemple pour chaque heure, les mesures doivent être effectuées dans un intervalle de 30 secondes). La durée du test dépend de l'épaisseur du textile, en jours quand le matériau est fin et se stabilise rapidement, en semaines ou en mois pour des matériaux épais sensibles à l'humidité. D'après McCullough et al. (McCULLOUGH, KWON et SHIM 2003), les pesés sont réalisées à 6, 9, 13, 23, 26 et 30 heures.

Les conditions réglées sur l'enceinte climatique (température, humidité relative, vitesse d'air), la dimension de l'échantillon textile testé et l'épaisseur de la lame d'air présente sous l'étoffe diffèrent suivant les normes utilisées (tableau 1.6).

- Méthode avec desiccant

Un échantillon textile est attaché à un récipient contenant un desiccant (chlorure de sodium). L'ensemble, placé dans une chambre climatique, est pesé régulièrement. Le flux mesuré provenant de l'environnement de la chambre traverse le textile selon la figure 1.35.

Le test est arrêté quand le desiccant dépasse 10 % de sa masse initiale. Comme avec la méthode avec l'eau, une lame d'air est présente sous le textile. Les conditions réglées dans la chambre climatique, l'épaisseur de la lame d'air et la taille de l'échantillon dépendent des normes utilisées (tableau 1.7).

Normes	ASTM E96/E96M (2015)	JIS L1099 (2012)
Température de l'eau	Non spécifiée	40 °C
Température de l'air (°C)	Entre 23 et 26,7 ± 1 °C	40 ± 2 °C
Humidité relative (%)	50 ± 2 %	En-dessous de 50 ± 5 %
Vitesse d'air (m.s ⁻¹)	Entre 0,02 et 0,3 m.s ⁻¹	0,8 m.s ⁻¹
Taille de l'échantillon	Non spécifiée	Diamètre de 70 mm
Surface de la zone de test	3000 mm ²	Diamètre de 60 mm
Épaisseur de la lame d'air sous textile (mm)	19 ± 6 mm	10 mm
Durée des mesures	Non spécifiée (plusieurs jours)	Non spécifiée

TABLEAU 1.6 – Méthode du récipient droit avec l'eau présentée par deux normes ASTM E96/E96M et JIS L1099.

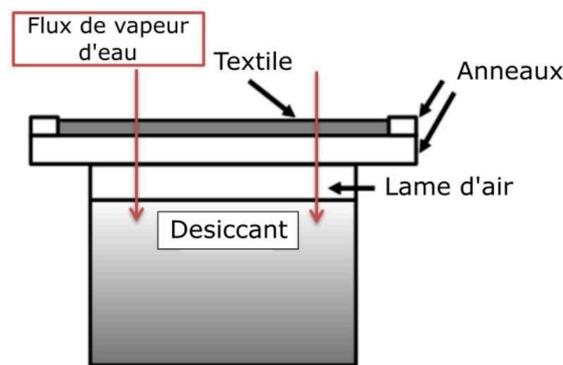


FIGURE 1.35 – Méthode du récipient droit avec desiccant (adaptée de McCULLOUGH, KWON et SHIM 2003).

Normes	ASTM E96/E96M (2015)	JIS L1099 (2012)
Température de l'eau (°C)	Non spécifiée	40 °C
Température de l'air (°C)	Entre 23 et 26,7 ± 1 °C	40 ± 2 °C
Humidité relative (%)	50 ± 2 %	En-dessous de 90 ± 5 %
Humidité imposée par le desiccant	Non spécifiée (chlorure de calcium)	Non spécifiée (chlorure de calcium)
Vitesse d'air (m.s ⁻¹)	Entre 0,02 et 0,3 m.s ⁻¹	0,8 m.s ⁻¹
Taille de l'échantillon	Non spécifiée	Diamètre de 70 mm
Surface de la zone de test	3000 mm ²	Diamètre de 60 mm
Épaisseur de la lame d'air sous textile (mm)	6 mm	3 mm

TABLEAU 1.7 – Méthode du récipient droit avec desiccant présentée par deux normes ASTM E96/E96M et JIS L1099.

- Détermination du taux de transmission de vapeur d'eau

L'équation 1.64 permet de calculer la taux de vapeur d'eau traversant le textile.

$$WVTR = \frac{M_p}{t \times S} \quad (1.64)$$

Avec $WVTR$ le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), M_p la masse perdue (g), t le temps (h), S la surface de test de l'échantillon (m^2).

Récipient renversé

- Méthode avec l'eau

Lors de ce test, seules les échantillons imperméables à l'eau liquide sont testés. Le textile est positionné au-dessus d'un récipient contenant 100 ml d'eau distillée. La norme utilisée pour ce test est l'ASTM E96 BW :1999 (McCULLOUGH, KWON et SHIM 2003). Une étoffe, de diamètre 74 mm, est fixée sur le récipient puis l'ensemble est retourné selon la figure 1.36 et placé dans une enceinte climatique. La température de celle-ci est réglée à $23 \pm 0,5$ °C, l'humidité à 50 % et la vitesse de l'air à $2,8 \pm 0,25$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

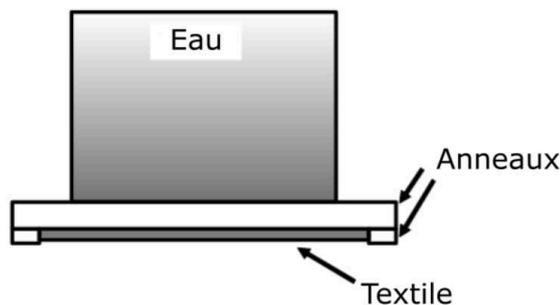


FIGURE 1.36 – Méthode du récipient renversé (adaptée de McCULLOUGH, KWON et SHIM 2003).

Le récipient et le textile sont pesés (balance précise à 0,001 g) avant et après le test à 3, 6, 9, 13, 23, 26 et 30 heures. Le taux de transmission de la vapeur d'eau est calculé selon l'équation 1.64.

- Méthode avec desiccant

Un échantillon textile est positionné de part et d'autre de membranes imperméables à l'eau liquide mais perméable à la vapeur d'eau (figure 1.37). Les membranes en PTFE (polytetrafluoroéthylène) présentent les caractéristiques suivantes : une épaisseur de 25 μm et une dimension de 100 mm \times 100 mm.

Un récipient contenant une solution de desiccant, à base de 100 ml d'eau et de 300 g d'acétate de potassium, est positionné sur un côté de la membrane. L'ensemble récipient, textile et membranes est plongé à 5 mm de profondeur

dans un bain d'eau distillé maintenu à température constante. Le système est placé dans un thermostat. Pour déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau du textile, l'ensemble est retourné, pesé puis réinstallé en position initiale pour les mesures suivantes. Suivant la norme utilisée, la température du thermostat et de l'eau, l'humidité relative fixée par le desiccant et la taille de l'échantillon différent selon les normes (tableau 1.8).

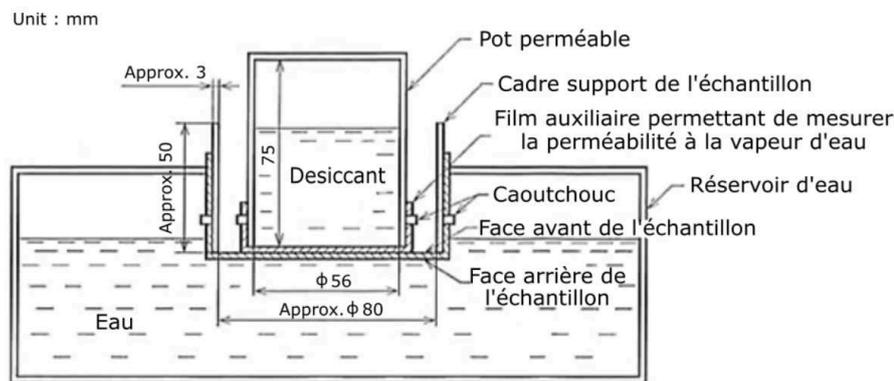


FIGURE 1.37 – Récipient renversé avec desiccant (adaptée de JISL1099 2012).

Normes	JIS L1099 (2012)	ISO 15496 (2004)
Température du thermostat (°C)	30 ± 2 °C	23 ± 3 °C
Température de l'eau (°C)	23 °C	23 ± 0,1 °C
Humidité fixée par le desiccant (%)	Non spécifiée (acétate de potassium)	23 % (acétate de potassium)
Taille de l'échantillon	200 mm × 200 mm	Diamètre de 180 mm
Surface de la zone de test	Diamètre de 110 mm	Diamètre de 110 mm
Distance d'immersion du système dans l'eau	5 ± 2 mm	5 ± 2 mm

TABLEAU 1.8 – Pot renversé avec desiccant selon les normes JIS L1099 :2012 et ISO 15496 :2004.

Le calcul du taux de transmission de la vapeur d'eau du textile testé est défini selon l'équation 1.65.

$$WVTR = \frac{a_1 - a_0}{S} \quad (1.65)$$

Avec $WVTR$ le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), $a_1 - a_0$ le changement de masse mesuré en fonction du temps ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2).

Récipients sur plateau tournant

Le test est réalisé suivant la norme BS7209 :1990 (BS7209 1990). Des publications utilisent cette méthode pour déterminer le taux de transmission de vapeur d'eau à travers les textiles (REN et RUCKMAN 2003). Plusieurs échantillons, de diamètre 90 mm, sont placés sur 6 récipients contenant 46 ml d'eau distillé (lame d'air de 10 ± 1 mm entre la surface de l'eau et celle du textile). La température de l'eau est maintenue à 20 ± 2 °C et une lame d'air de 10 ± 1 mm sépare sa surface de celle du textile. Par ailleurs, les étoffes sont positionnées sur un support, représenté selon la figure 1.38, permettant d'empêcher leur affaissement durant l'essai. Le système peut tester deux types d'échantillons différents pour lesquels trois récipients sont préparés. Entre les étoffes testées, deux échantillons de référence, dont les caractéristiques sont spécifiées dans le tableau 1.9, sont positionnés sur le système.

Échantillon de référence	
Largeur de maille	18 μ m
Diamètre du fil	32 μ m
Nombre de fils par cm	196,1
Surface ouverte en %	12,5

TABLEAU 1.9 – Paramètre de l'échantillon de référence.

Les récipients sont posés sur une plaque tournante à $0,41 \text{ m.s}^{-1}$. Le mouvement du système permet d'éviter la formation d'une lame d'air à la surface du textile et également d'assurer l'homogénéité de la seconde lame d'air présente à l'intérieur du récipient. Le système est placé dans une chambre climatique réglée à 65 ± 2 % et à 20 ± 2 °C. Après une heure de stabilisation, les récipients sont pesés un par un et replacés sur la plaque tournante. Après minimum 5 heures et dans l'idéal 16h, la masse des récipients est de nouveau mesurée. La perméabilité à la vapeur d'eau des échantillons est calculée selon l'équation 1.66.

$$WVTR = \frac{24 \times M_p}{S \times t} \quad (1.66)$$

Avec $WVTR$ le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$), M_p la masse perdue pendant la période t (g), t le temps entre les pesés successives de l'ensemble récipient et textile (h), S la surface de test de l'échantillon équivalente à la surface interne du récipient (m^2). Le tableau 1.10 résume les paramètres de réglage utilisés pour cette méthode.

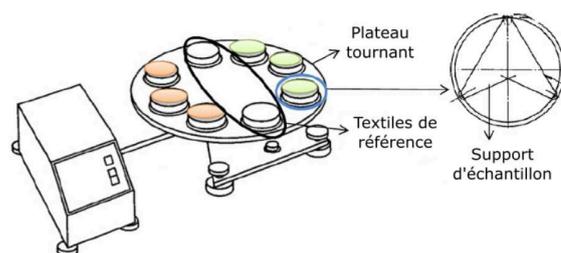


FIGURE 1.38 – Représentation schématique du plateau tournant (adaptée de BS7209 1990).

Norme	BS7209 :1990
Température de l'air (°C)	20 ± 2 °C
Température de l'eau (°C)	20 ± 2 °C
Humidité relative (%)	65 ± 2 %
Taille de l'échantillon	Diamètre 90 mm
Épaisseur de la lame d'air sous textile	10 ± 1 mm
Vitesse de rotation	$0,41 \text{ m.s}^{-1}$

TABLEAU 1.10 – Méthode du plateau tournant selon la norme BS7209 :2009.

1.5.2.2 Diffusiomètre

Cet appareil, développé initialement par Farnworth et Dolhan en 1984, a été amélioré par Van Beest and Wittgen en 1986, est de nouveau modifié par Farnworth et Lotens en 1990 (FARNWORTH, LOTENS et WITTGEN 1990). Il permet de caractériser les flux hydriques traversant les échantillons textiles. L'échantillon est positionné entre deux membranes semi-perméables. La membrane inférieure évite le mouillage de l'étoffe tandis que celle positionnée à sa surface supérieure empêche l'air de pénétrer et de supprimer les turbulences convectives à la surface de l'échantillon (figure 1.39).

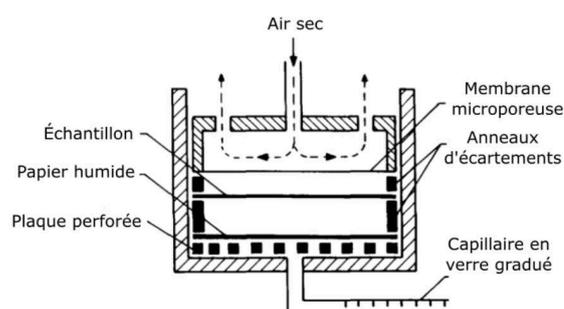


FIGURE 1.39 – Diffusiomètre DREO (adaptée de FARNWORTH, LOTENS et WITTGEN 1990).

La quantité d'eau transmise à travers le textile est mesurée par un capillaire en

verre gradué. Une feuille de papier filtre saturée en humidité est positionnée à la surface d'une plaque perforée. Les pressions capillaires au sein de la feuille de papier sont suffisamment importantes pour éviter son assèchement. Quand l'eau s'évapore du papier, elle est immédiatement remplacée par celle provenant du tube gradué. Un thermocouple, positionné en-dessous de cette feuille, permet de déterminer sa température et par conséquent de connaître la concentration de vapeur d'eau de celle-ci. La distance entre la feuille de papier mouillée et la membrane est maintenue à 6 mm. Des entretoises de 2 et 4 mm d'épaisseur permettent de placer les échantillons textiles à une distance de 0, 2, 4, et 6 mm de la surface mouillée. La position de l'échantillon et par conséquent sa hauteur va déterminer les conditions d'humidité au sein de la cellule (HES et J. WILLIAMS 2011 ; LOTENS 1993). L'humidité peut ainsi varier de 35 à 100 %HR. Les mesures, précises avec une erreur inférieure à 0,3 mm d'air équivalent (SARI 1994), sont rapides et durent au maximum 15 minutes. Le calcul de l'épaisseur d'air équivalente du textile est déterminé selon l'équation 1.67.

$$d_{eq} = \frac{1000 \times \pi \times D \times r_s^2}{\Psi_{air} \times \ln\left(\frac{1 - \Psi_{eau}}{\Psi_{air} \times (c_{ext} - c_{int})}\right)} \quad (1.67)$$

Avec d_{eq} l'épaisseur d'air équivalente (m), D le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($25 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), r_s le rayon de l'échantillon (m), Ψ_{air} le flux d'air ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), Ψ_{eau} le flux massique lu sur le capillaire ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$), c_{ext} la concentration de la vapeur d'eau au-dessus du textile ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), c_{int} la concentration de la vapeur d'eau en-dessous du textile ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

1.5.2.3 Tube R

Cet appareil, également appelé tube R, est développé par Watkins et Salter (WATKINS et SLATER 1981). Il permet de déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau des textiles. Ce système est constitué d'un tube en poly(vinyl chloride) long de 40 cm. D'un côté du tube, un réservoir d'eau distillé constitue la source de vapeur d'eau et de l'autre côté un réservoir de solution saline à base de chlorure de lithium possède un grand pouvoir absorbant de la vapeur d'eau. L'échantillon textile est placé au centre du système selon la figure 1.40.

Quatre capteurs d'humidité sont positionnés sur le système : deux de chaque côtés du textile à 2,5 et 20 cm du centre. Par ailleurs, une épaisseur de 20 cm d'air confiné est présente entre la surface d'évaporation et le textile, donnant lieu à des phénomènes convectifs. Le test est répété 8 fois par échantillon textile. Le temps de stabilisation de l'échantillon (entre 40 minutes et 3 heures), le temps de mesure et de calcul rendent les essais longs à réaliser. Cependant, cette méthode permet d'obtenir des résultats plus rapidement qu'avec la méthode des récipients (entre 15 et 18 heures). Par ailleurs, la résistance à la vapeur d'eau est déterminée à partir des mesures avec et sans textile. L'équation 1.68 décrit de manière générale la résistance du système au passage du flux de vapeur.

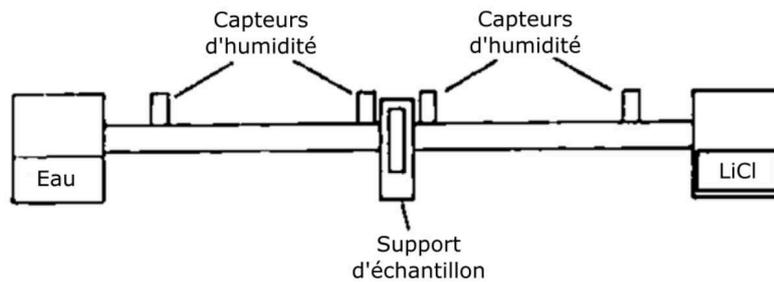


FIGURE 1.40 – Tube R (adaptée de WATKINS et SLATER 1981).

$$R' = \frac{1}{Q_e} \times D \times \delta C \times S \times t \quad (1.68)$$

Avec R' la résistance totale du système au passage de la vapeur d'eau exprimée en épaisseur d'air équivalente (m), Q_e la masse de vapeur d'eau passant à travers le système (g), D le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), δC la différence de concentration de vapeur d'eau ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2), t le temps écoulé en secondes.

1.5.2.4 DMPC

L'appareil DMPC (Dynamic Moisture Permeation Cell) est utilisé suivant la norme F2298 :2003 (F2298 2003). Deux études différentes peuvent être réalisées, l'une caractérisant la diffusion seule de la vapeur d'eau à travers le textile et une autre analysant les phénomènes combinés de convection/diffusion. Dans les deux cas, un échantillon, de dimension $5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$, est inséré dans une cellule de test. La surface supérieure de l'étoffe est en contact avec un environnement réglé à $95 \pm 0,5 \% \text{HR}$ et sa surface inférieure est en contact avec une ambiance de $5 \pm 0,5 \% \text{HR}$ (figure 1.41).

La précision du capteur d'humidité est de $\pm 0,1 \% \text{HR}$ et celle de la température de $20 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

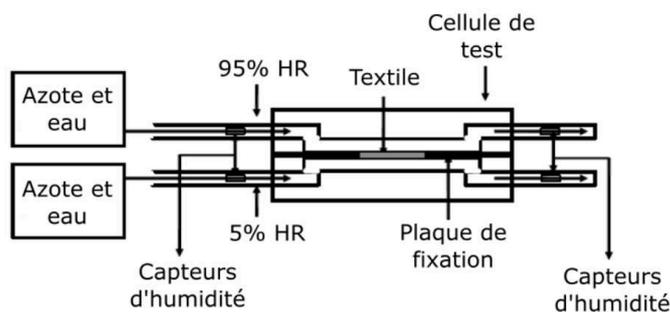


FIGURE 1.41 – DMPC (adaptée de F2298 2003).

Test de diffusion

Ce test est réalisé sous une pression nulle. Dans ce cas, seule la diffusion de vapeur à travers le textile est mesurée comme le montre la figure 1.42.

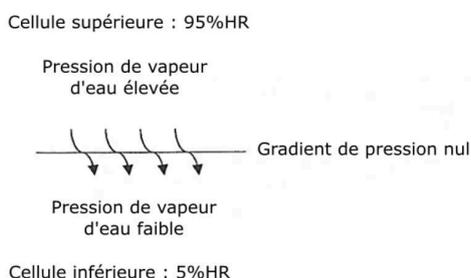
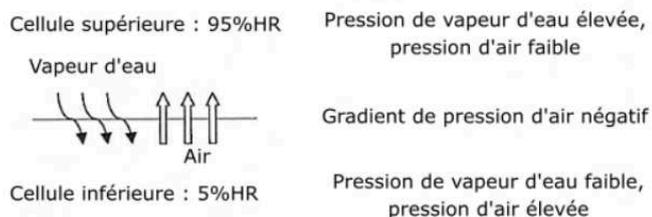


FIGURE 1.42 – Test de diffusion (adaptée de F2298 2003).

Test combiné de convection/diffusion

En plus du phénomène de diffusion, un gradient de pression négatif (1) ou positif (2) est appliqué pour forcer le passage de l'air à travers le matériau (figure 1.43). Ce test permet d'évaluer l'interaction entre la convection (variation de la pression) et la diffusion (variation de la concentration de vapeur d'eau).

1. Gradient de pression négatif : le transfert de vapeur d'eau est réalisé à travers le matériau dans le sens opposé au flux d'air.



2. Gradient de pression positif : le transfert de vapeur d'eau est réalisé dans le même sens que le flux d'air.

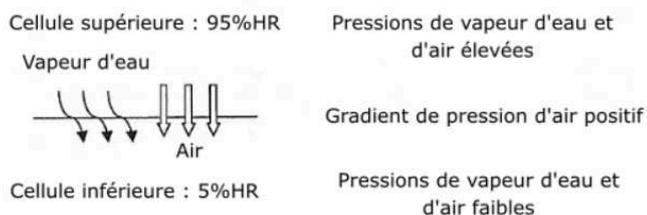


FIGURE 1.43 – Test combiné de convection/diffusion (adaptée de F2298 2003).

La résistance à la diffusion de la vapeur d'eau des échantillons textiles est définie

selon l'équation 1.69. Par ailleurs, le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon textile est calculé selon l'équation 1.70.

$$R_{dtot} = \frac{S \times \Delta\Phi}{q_v \times \delta\Phi} = \frac{\delta C}{\dot{m}} \quad (1.69)$$

$$\dot{m} = \frac{\delta\Phi \times P_{sat} \times M_w \times Q_s}{S \times R \times T_s} \quad (1.70)$$

Avec R_{dtot} la résistance totale à la diffusion de la vapeur d'eau ($s.m^{-1}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2), $\Delta\Phi$ la différence d'humidité relative entre les entrées supérieure et inférieure du gaz entrant, q_v le flux volumétrique à travers la partie supérieure ou inférieure de la cellule ($m^3.s^{-1}$), $\delta\Phi$ la différence d'humidité relative entre l'entrée et la sortie du gaz au niveau de la partie inférieure ou supérieure de la cellule, δC la différence de concentration de vapeur d'eau entre le gaz entrant et sortant ($g.m^{-3}$), \dot{m} le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon ($g.m^{-2}.s^{-1}$), P_{sat} la pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa), M_w la masse moléculaire de la vapeur d'eau ($g.mol^{-1}$), Q_s le flux volumétrique ($m^3.s^{-1}$), R_{gz} la constante des gaz parfait ($8,3145 J.mol^{-1}.K^{-1}$ ou $m^3.Pa.mol^{-1}.K^{-1}$), T_s la température de référence (K). Le flux de vapeur d'eau, défini précédemment, est converti en $g.m^{-2}.s^{-1}$ selon l'équation 1.71.

$$\dot{m}(g.m^{-2}.jour^{-1}) = 1000 \times 24 \times 60 \times 60 \times \dot{m}(kg.m^{-2}.s^{-1}) \quad (1.71)$$

1.5.2.5 Appareil de Huang

Le système développé par Huang (HUANG et Y. CHEN 2010) permet de mesurer le taux de transmission de la vapeur d'eau à travers l'étoffe. Il est composé d'un cylindre rempli d'eau distillée (30 ml) et d'une cellule de mesure (figure 1.44).

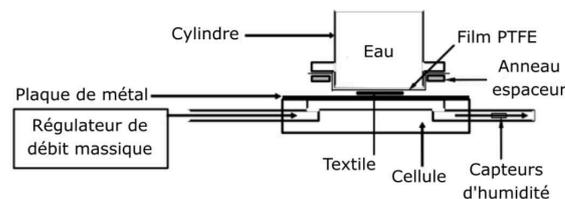


FIGURE 1.44 – Appareil de Huang (adaptée de HUANG et Y. CHEN 2010).

L'échantillon textile est placé en-dessous de la membrane Gore-tex en contact avec la partie inférieure du cylindre et au-dessus de la cellule de mesure. La dimension du textile testé est de $100 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ (avec une surface de $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ couvrant l'ouverture située au centre de la plaque) (HUANG et QIAN 2007; HUANG et XM QIAN 2008). La membrane Gore-Tex[®] permet de laisser passer uniquement l'eau sous forme

de vapeur. Un flux d'azote sec, réglé à $2000 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ (précision de $\pm 1,5 \%$), traverse la cellule de mesure. A la sortie de celle-ci, des capteurs d'humidité (précision de 1%) et de température (précision de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$) permettent de mesurer les flux échangés entre le textile et la cellule de mesure. Le flux de vapeur d'eau est transporté de la surface supérieure vers la surface interne du textile en contact avec la cellule de mesure. L'ensemble de l'appareil est placé dans une chambre climatique avec une température réglée à $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Les mesures sont enregistrées après un temps de stabilisation de 5 minutes avec un échantillonnage réalisé toutes les 10 secondes. Le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon est déterminé selon l'équation 1.72 et permet de définir le taux de transmission de la vapeur d'eau selon l'équation 1.73.

$$\dot{m} = \frac{Q \times (C_2 - C_1)}{S} \times \frac{10^{-6}}{60} \quad (1.72)$$

$$WVTR = \dot{m} \times 1000 \times 3600 \times 24 \quad (1.73)$$

Avec \dot{m} le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2), Q le flux volumétrique ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), C_1 et C_2 les concentrations de vapeur d'eau entrante et contenue dans le flux sortant ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), $WVTR$ le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jour}^{-1}$).

Cette méthode permet de déterminer la perméabilité à la vapeur d'eau des textiles plus rapidement qu'avec les méthodes des récipients ou du Skin Model (HUANG et QIAN 2007) Cet appareil utilise des échantillons de petite taille et le coût du matériel est faible.

1.5.2.6 DVS

Le DVS représenté selon la figure 1.45, permet de mesurer la sorption et la désorption en eau d'un échantillon textile par pesées successives sur une balance électronique (SMS Ultrabalance TM) avec une précision de $\pm 0,1 \text{ } \mu\text{g}$. La température est maintenue constante au cours de l'essai au moyen d'une sonde positionnée dans une chambre, régulant la température avec une précision de $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. L'échantillon (entre 12 et 29 mg) est placé sur une nacelle et asséché à 0% HR avant de commencer l'essai. Une fois la masse de l'échantillon stabilisée, il est exposé à différents taux d'humidité relative de 0 à 98% HR. L'humidité au sein de la chambre de test est régulée avec une précision de $\pm 1 \%$ HR par un réservoir, situé en-dessous de celle-ci, contenant de l'eau liquide et des vannes d'entrée et de sortie de gaz.

Ce dispositif permet de mesurer le comportement dynamique des étoffes lors de la sorption et de la désorption en vapeur d'eau. Cette méthode est intéressante à utiliser pour mieux comprendre comment les fibres composant les textiles se comportent dans un environnement donné sans prendre en compte l'impact de la contexture de celui-ci. Les résultats obtenus sont très précis mais le matériel utilisé est très coûteux.

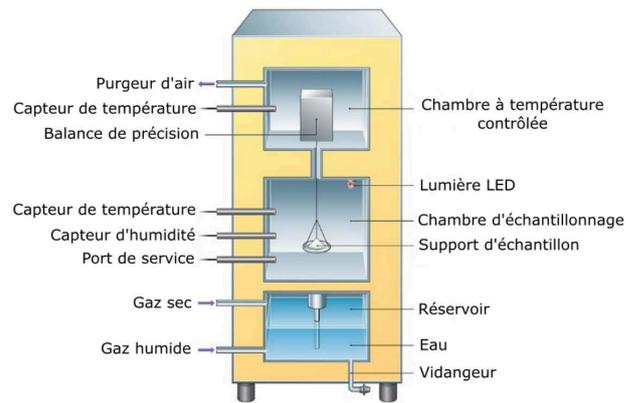


FIGURE 1.45 – Représentation schématique du DVS (adaptée de SIMO-TAGNE et al. 2016).

1.5.3 Transfert de l'eau liquide

Le MMT (AATCC195 2015) permet de mesurer le transport de l'humidité liquide en dynamique dans de multiples directions, diffusion à travers la face externe de l'échantillon, transfert à travers l'échantillon de la face interne vers la face externe et diffusion vers la face interne de l'échantillon. Le MMT s'appuie sur le principe physique suivant, la résistance électrique à la surface du textile évolue quand la teneur en eau liquide à sa surface change. Ainsi, cette résistance dépend de deux facteurs, la conductivité électrique de la solution liquide et la quantité d'eau présente au sein de l'échantillon testé (PRAKASH, RAMAKRISHNAN et KOUSHIK 2013). L'échantillon ($8,0 \times 8,0 \pm 0,1 \text{ cm}^2$) est positionné entre deux capteurs concentriques (figure 1.46a) après avoir été préalablement conditionné pendant 24 h à 65 %HR et 20 °C. La solution liquide (chlorure de sodium avec une conductivité de $16,09 \text{ mS.cm}^{-1}$) simulant la sueur est introduite ($0,21 \times 0,01 \text{ g}$) au niveau du plateau supérieur pendant les 20 premières secondes du test d'une durée totale de 120 s, par l'intermédiaire d'une pompe péristaltique.

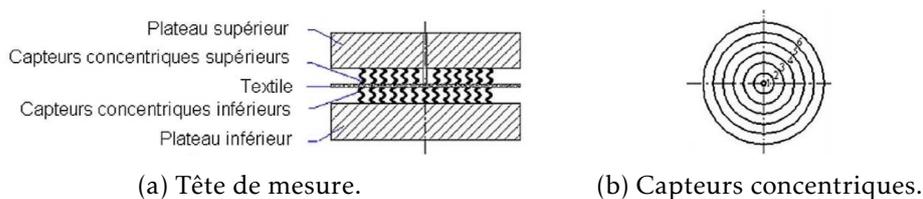


FIGURE 1.46 – Principe du MMT (adaptée de AATCC195 2015).

Le contenu en liquide correspond au contenu relatif exprimé en pourcentage par rapport à l'étoffe sèche. Selon la figure 1.46b, au niveau de l'anneau i ($i = 1 - 6$), la tension détectée est V_i . La teneur en liquide de l'anneau U_i est défini selon l'équation 1.74 (YAO

et al. 2006).

$$U_i = \frac{A_i}{R_i} = \frac{A_i \times (V_{DD} - V_i)}{R_{Ref} \times V_i} \quad (1.74)$$

Avec A_i le facteur de calibration, R_i la résistance de l'anneau i , R_{Ref} la résistance de référence et V_{DD} la tension appliquée.

De plus, le contenu total en liquide U pour chaque surface est défini selon les équations 1.75 et 1.76 (YAO et al. 2006).

$$U_T = \sum_{i=1}^6 UT_i \quad (1.75)$$

$$U_B = \sum_{i=1}^6 UB_i \quad (1.76)$$

Avec UT et UB respectivement les contenus en liquide de la surface en contact avec le capteur supérieur (représentatif du contact avec la peau) et de la surface en contact avec le capteur inférieur (surface exposée à l'environnement extérieur).

Les indices mesurés par le MMT sont le temps de mouillure (WT), le taux d'absorption (AR), le rayon de mouillure maximum (MWR), la vitesse de diffusion (SS), l'indice de transport (R) et la capacité globale de diffusion d'humidité ($OMMC$). Le contenu en eau de chaque surface est mesuré en fonction du temps selon le graphique de la figure 1.47 (AATCC195 2015).

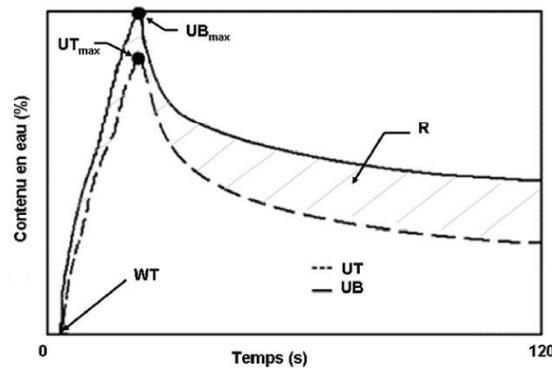


FIGURE 1.47 – Courbe obtenue en MMT (adaptée de F2298 2003).

Temps de mouillure (WT_{Top} le temps de mouillure de la surface supérieure, WT_{Bottom} le temps de mouillure de la surface inférieure) en s

Il correspond au temps nécessaire pour que les surfaces, supérieure et inférieure, commencent à être mouillées une fois le test commencé. Ce paramètre est mesuré quand la pente du contenu en eau de chaque face est supérieure à $\tan 15^\circ$.

Taux d'absorption en eau (AR_{Top} le taux d'absorption en eau de la surface supérieure, AR_{Bottom} le taux d'absorption en eau de la surface inférieure) en $\%.s^{-1}$

Il est défini comme la capacité moyenne d'absorption de chaque surface pendant le temps d'amorçage de la pompe. Il est calculé selon la moyenne des pentes situées entre l'indice WT et le contenu en eau maximum (UT_{max} et UB_{max}) atteint pour chacune des surfaces.

Rayon de mouillure maximal (MWR_{Top} le rayon de mouillure maximal de la surface supérieure, MWR_{Bottom} le rayon de mouillure maximal de la surface inférieure) en mm

Il correspond au rayon maximum i atteint par le liquide au niveau des surfaces (supérieure et inférieure). Il est mesuré lorsque les pentes des courbes deviennent supérieures à $\tan 15^\circ$.

Vitesse de diffusion (SS_{Top} la vitesse de diffusion de la surface supérieure, SS_{Bottom} la vitesse de diffusion de la surface inférieure) en $mm.s^{-1}$

Il correspond à la vitesse de diffusion du liquide du centre de l'anneau ($i = 1$) au rayon de mouillure maximum MWR. Ce paramètre est calculé selon les équations 1.77 et 1.78.

$$SS_{Top} = \sum_{i=1}^{N_T} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (1.77)$$

$$SS_{Bottom} = \sum_{i=1}^{N_B} \frac{\Delta r_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (1.78)$$

Avec N_T et N_B le nombre d'anneau correspondant à l'indice MWR pour les surfaces (supérieure et inférieure), Δr_i est la distance entre l'anneau i et $i - 1$, t_i et t_{i-1} sont respectivement les temps de mouillure aux anneaux i et $i - 1$.

Indice de transport (R)

Il est défini comme la différence de contenu en liquide cumulé entre les deux surfaces de l'étoffe. R est défini graphiquement comme l'aire située entre les courbes UT et UB pendant le temps de mesure total de 120 s (équation 1.79).

$$R = \frac{Aire(UB) - Aire(UT)}{120} \quad (1.79)$$

Avec R l'indice de transport.

Capacité globale de diffusion d'humidité (OMMC)

Cet indice indique les capacités générales de l'étoffe à gérer le transport d'humidité liquide. L'OMMC est calculé (équation 1.80) à partir de trois autres paramètres décrits précédemment : le taux d'absorption de la surface inférieure (AR_{Bottom}), l'indice de transport (R) et la vitesse de diffusion à la surface inférieure (SS_{Bottom}).

$$OMMC = C_1 \times AR_{ndv} + C_2 \times R_{ndv} + C_3 \times SS_{ndv} \quad (1.80)$$

Avec C_1 , C_2 et C_3 les constantes fixées respectivement à 0,25; 0,5 et 0,25. Dans le cas d'un environnement humide où l'évaporation d'un liquide est relativement lente, le transport de la sueur est le paramètre le plus important à prendre en considération pour maintenir une peau sèche. Le taux d'absorption et la vitesse de diffusion ont une influence plus limitée dans ce cas (YAO et al. 2006). AR_{ndv} , R_{ndv} et SS_{ndv} sont des indices sans dimension définis à partir de AR_{Bottom} , R et SS_{Bottom} .

Tous les indices décrits ci-dessus sont classés dans le tableau 1.11 en fonction de leur performance selon une échelle de 1 à 5 (AATCC195 2015).

	Grade	1	2	3	4	5	
WT	Non mouillant	> 119	20-119	5-19	3-5	< 3	Mouillage rapide
AR	Absorption lente	0-10	10-30	30-50	50-100	> 110	Absorption rapide
MWR	Non mouillant	0-7	7-12	12-17	17-22	> 22	Propagation importante de l'humidité
SS	Diffusion lente	0-1	1-2	2-3	3-4	> 4	Diffusion rapide
R	Échanges faibles	< -50	-50-100	100-200	200-400	> 400	Échanges importants
OMMC	Gestion de l'humidité faible	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	> 0,8	Excellente gestion de l'humidité

TABLEAU 1.11 – Notation des indices obtenus avec le MMT (adaptée de F2298 2003).

1.5.4 Transfert thermique

Deux appareils permettent de mesurer la sensation thermique des textiles par la mesure de l'effusivité thermique : l'Alambeta et le disque chaud. Lorsque ce paramètre est important le textile a un touché rafraichissant au premier contact et dans le cas contraire ce touché est chaud.

1.5.4.1 Alambeta

Kawabata et Yoneda ont développé le « thermo-labo » (ou Alambeta) capable d'évaluer objectivement le contact thermique des textiles représenté en figure 1.48. Il permet de mesurer la résistance et la conductivité thermique, ainsi que l'effusivité thermique des textiles dans le but d'évaluer la sensation de chaleur et de fraîcheur (S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005; OĞLAKCIOĞLU et MARMARALI 2007)

1.5.4.2 Disque chaud

La conductivité et l'effusivité thermiques des échantillons textiles peuvent également être déterminées au moyen du disque chaud selon la norme ISO 22007-2 2015 (figure 1.49).

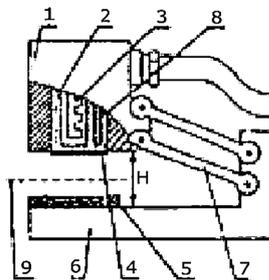


FIGURE 1.48 – Principe de fonctionnement de l'Alambeta, 1-Tête mesureuse, 2-Bloc de cuivre, 3-Chauffage électrique, 4-Capteur de flux thermique, 5-Échantillon, 6-Socle, 7-Mécanisme de levage de la tête, 8-Résistance thermomètre, 9-Interface textile mouillée simulant l'évacuation de la sueur (adaptée de S. GUNESOGLU, MERIC et C. GUNESOGLU 2005).

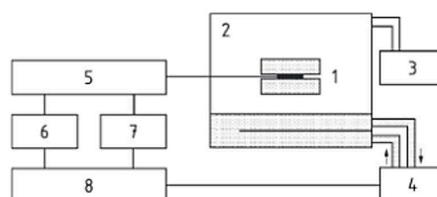


FIGURE 1.49 – Schématisation du disque chaud, 1-éprouvette avec sonde, 2-Enceinte, 3-Pompe à vide, 4-Thermostat, 5-Circuit en pont, 6-Voltmètre, 7-Source de tension, 8-Ordinateur (adaptée de ISO22007-2 2015).

Un capteur à élément résistif, à la fois source de chaleur et capteur de température, est mis en contact avec deux moitiés d'un même échantillon. Le disque chaud fournit au capteur une puissance électrique constante. L'augmentation de la résistance en fonction

du temps lors d'un seuil transitoire permet de connaître la conductivité thermique λ et l'effusivité thermique b définie selon l'équation 1.81.

$$b = \sqrt{\lambda \times \rho \times C_p} \quad (1.81)$$

Avec b l'effusivité thermique ($\text{J.K}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-0,5}$), λ la conductivité thermique ($\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ou $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ρ la masse volumique (kg.m^{-3}), C_p la capacité calorifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

1.5.5 Transferts thermique et hydrique

1.5.5.1 Plaque chaude gardée transpirante (Skin Model)

Le Skin Model, fonctionnant avec le logiciel ThermDAC, permet de simuler les transferts de chaleur et de masse à travers les textiles. Il est composé d'une plaque chaude gardée transpirante (alimentée en eau ou non) chauffée à 35°C représentant la peau et entourée de gardes thermiques (périphérique et inférieure) permettant d'éviter les pertes latérales et les pertes sous la plaque chaude gardée transpirante (figure 1.50a). Un flux d'air de 1 m.s^{-1} effleure horizontalement la surface du textile en contact direct avec la plaque chaude gardée transpirante. Le Skin Model est placé dans une enceinte climatique pour pouvoir contrôler les paramètres de l'environnement comme la température ambiante et l'humidité relative. Il est utilisé selon la norme ISO 11092 :2014 (ISO11092 2014) pour mesurer la résistance thermique (R_{ct}) et la résistance à la vapeur d'eau (R_{et}) en stationnaire.

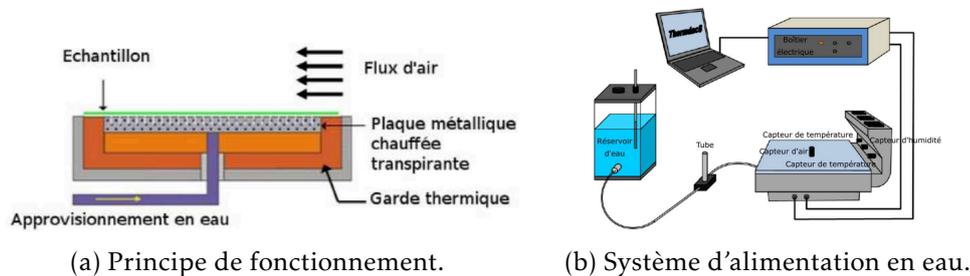


FIGURE 1.50 – Skin Model (adaptée de ISO11092 2014).

Résistance thermique

La résistance thermique, R_{ct} , permet d'évaluer la capacité de l'étoffe à laisser passer le flux de chaleur la traversant. La R_{ct} peut également être définie comme l'énergie nécessaire à fournir pour maintenir la température de la plaque chaude à 35°C . Une valeur élevée de la R_{ct} signifie que le textile est isolant et qu'il permet à l'utilisateur d'être maintenu au chaud. Le textile positionné sur la plaque chaude gardée transpirante à $35^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$ est balayé horizontalement par un flux d'air de $1 \text{ m.s}^{-1} \pm 0,05 \text{ m.s}^{-1}$.

L'environnement de l'enceinte climatique est réglé à $20\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ et $65\% \pm 3\% \text{HR}$. La R_{ct} de l'étoffe est calculée selon l'équation 1.82.

$$R_{ct} = \frac{(T_m - T_a) \times S}{H - \Delta H_c} - R_{ct0} \quad (1.82)$$

Avec R_{ct} la résistance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), H la puissance fournie à la plaque chaude gardée transpirante pour maintenir sa température à 35 °C (W), S la surface de test de l'échantillon (m^2), T_m la température de la plaque chaude gardée transpirante et T_a la température de l'air (K), la R_{ct0} la résistance thermique à vide ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$), ΔH_c le facteur correctif de la puissance de chauffe pour la R_{ct} .

Résistance évaporative

La résistance à la vapeur d'eau, R_{et} , correspond à la capacité de l'étoffe à laisser passer la vapeur d'eau à travers celle-ci. Une R_{et} élevée occasionne une respirabilité faible du textile. Lors d'une sudation importante suite à un effort considérable (par exemple la pratique d'un sport), l'utilisateur ressent un effet de moiteur dû à l'évacuation trop lente de cette sueur. Sur le Skin model, l'alimentation en eau est réalisée par l'intermédiaire d'un réservoir d'eau (figure 1.50b) fonctionnant sur le principe du vase de Mariotte. Un tube, situé entre le réservoir d'eau et la plaque chaude gardée transpirante, permet d'ajuster le niveau de l'eau à la hauteur de la plaque de test selon le principe des vases communicants. L'eau est par la suite préchauffée en passant à l'intérieur de la garde thermique inférieure puis ressort à la surface de la plaque chaude gardée transpirante. Une membrane cellophane perméable à la vapeur d'eau est fixée sur celle-ci. Le textile positionné sur la membrane est comme précédemment balayé par un flux d'air de $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \pm 0,05\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. L'environnement de l'enceinte climatique est réglé cette fois-ci à $35\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$ et $40\% \pm 3\% \text{HR}$. La R_{et} du textile est exprimée selon l'équation 1.83.

$$R_{et} = \frac{(P_m - P_a) \times S}{H - \Delta H_e} - R_{et0} \quad (1.83)$$

Avec R_{et} la résistance à la vapeur d'eau ($\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2), H la puissance fournie (W), P_m la pression partielle saturante de vapeur d'eau à la surface de la plaque chaude gardée transpirante et P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa), R_{et0} la résistance à la vapeur d'eau à vide sans textile ($\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{W}^{-1}$), ΔH_e le facteur correctif de la puissance de chauffe pour la R_{et} .

Indice de perméabilité

Les mesures de R_{et} et de R_{ct} , nous permettent de déterminer l'indice de perméabilité

I_{mt} selon l'équation 1.84.

$$I_{mt} = S' \times \frac{R_{ct}}{R_{et}} \quad (1.84)$$

Avec I_{mt} l'indice de perméabilité (sans unité), S' une constante égale à 60 Pa.K^{-1} .

Cet indice, évaluant le confort thermique d'une étoffe, est compris entre 0 (étoffe non respirante car imperméable à la vapeur d'eau) et 1 (étoffe respirante).

1.5.5.2 Appareils dérivés du Skin Model

Appareil de Huang seconde version

Cet appareil, élaboré par Huang (HUANG, WU et W. XU 2014), permet de mesurer la résistance à la vapeur d'eau sous des conditions non-isotherme au moyen d'une plaque chaude gardée transpirante modifiée (figure 1.51).

De l'eau distillée est acheminé à la surface de la plaque chaude à partir d'un doseur. Une membrane PTFE, perméable uniquement à la vapeur d'eau, est montée à la surface de la plaque chaude gardée transpirante où l'échantillon textile est posé à sa surface. Une cellule, où un gaz d'azote circule, est positionnée au-dessus de l'ensemble plaque chaude gardée transpirante et échantillon. Un orifice en son centre permet à l'échantillon d'être en contact avec le gaz avec une surface de test de $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. Le gaz entrant dans la cellule emporte l'humidité provenant de la membrane PTFE à travers l'échantillon textile. A la sortie de la cellule, un thermocouple (précision de $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$) et une sonde d'humidité (précision de $\pm 1 \text{ \%HR}$) sont utilisés pour mesurer la température et l'humidité du flux sortant. Le flux de vapeur traversant l'échantillon est calculé selon l'équation 1.85 et la résistance à la vapeur d'eau est définie selon l'équation 1.86.

$$\dot{m} = \frac{Q \times (C_2 - C_1)}{S} \times \frac{10^{-6}}{60} \quad (1.85)$$

Avec \dot{m} le flux de vapeur d'eau traversant l'échantillon ($\text{g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), Q le flux volumétrique ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$), S la surface de test de l'échantillon (m^2), C_1 et C_2 les concentrations de vapeur d'eau du flux entrant et du flux sortant (g.m^{-3}).

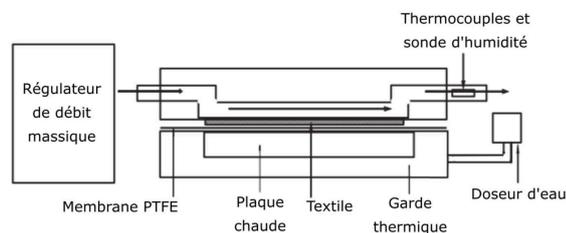


FIGURE 1.51 – Appareil de Huang seconde version (adaptée de HUANG, WU et W. XU 2014).

Pour calculer la résistance à la vapeur d'eau (équation 1.86) et la résistance thermique (équation 1.87) dans l'enceinte climatique, l'humidité est réglée à 65 % et la température à 20 °C. La plaque chaude gardée transpirante est maintenue à 35 °C. De plus, la vitesse de l'air est fixée à 1 m.s⁻¹.

$$R_{et} = \frac{S \times (P_v - P_a)}{H_e} \quad (1.86)$$

$$R_{ct} = \frac{S \times (T_m - T_a)}{H_c} \quad (1.87)$$

Avec R_{et} la résistance à la vapeur d'eau du textile et de la lame d'air (m².Pa⁻¹.W⁻¹), R_{ct} la résistance thermique du textile et de la lame d'air (m².K⁻¹.W⁻¹), P_v la pression de la vapeur d'eau (Pa), P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa), H_{et} la puissance fournie pour la R_{et} (W), H_{ct} la puissance fournie pour la R_{ct} (W), S la surface de test de l'échantillon (m²), T_m la température de la plaque chaude gardée transpirante (K), T_a la température de l'air (K).

Permetest

Cet appareil permet de mesurer le taux de transmission de la vapeur d'eau, la résistance thermique et évaporative des échantillons textiles selon la norme ISO 11092 (ONAL et YILDIRIM 2012). L'échantillon textile est positionné sur une tête mesureuse au-dessus d'une membrane laissant passer uniquement la vapeur d'eau. Un flux d'air de 1 m s⁻¹ (HES et ARAUJO 2010) effleure horizontalement sa surface. L'eau introduite par une seringue est chauffée par un radiateur (figure 1.52). Le test peut être réalisé sans ou avec une lame d'air de 2 et 4 mm entre la tête mesureuse et la surface de l'échantillon. La durée des mesures, très courte est comprise entre 3 et 5 minutes (B. DAS et al. 2008 ; GERALDES, MONTEIRO et HES 2012). Les échantillons sont de petites tailles et la température de l'air est réglée entre 20 et 22 °C (ARABULI et al. 2010).

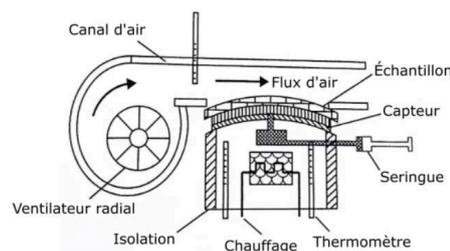


FIGURE 1.52 – Permetest (adaptée de GERALDES, MONTEIRO et HES 2012).

Skin model vertical

Cet appareil est un skin model vertical comportant deux chambres détachables utilisées

pour mesurer les transferts thermiques et hydriques à travers les textiles dans des conditions environnementales variables (EA KIM, Yoo et J. KIM 2003 ; KIM, SJ Yoo et SHIM 2006 ; H. Yoo, HU et EA KIM 2000). Le comportement dynamique des étoffes est étudié. Ce système est composé d'un système d'alimentation, d'une unité contrôlant la température, d'une plaque chaude, de deux chambres environnementales indépendantes et d'un système d'enregistrement des données (figure 1.53a). La température d'une des chambres, reproduisant un environnement froid, peut varier de -30 à 18 °C, tandis que dans la seconde la température varie de 18 à 50 °C. La vitesse d'air dans les chambres est comprise entre $0,2$ et $0,7$ m.s^{-1} . Le Skin Model vertical peut tourner à 360 °C et se diriger vers chacune des chambres en un temps très court. Cela permet de tester les échantillons dans différentes conditions climatiques extrêmes. Il se décompose en deux parties (figure 1.53b) à savoir une plaque chaude et une couche distribuant l'eau pour simuler la sueur. La température de la plaque chaude est réglée à 33 °C et la couche simulant la sueur est attachée sur cette dernière. L'eau sous forme liquide est distribuée par l'intermédiaire de six orifices situés sous la plaque chaude.

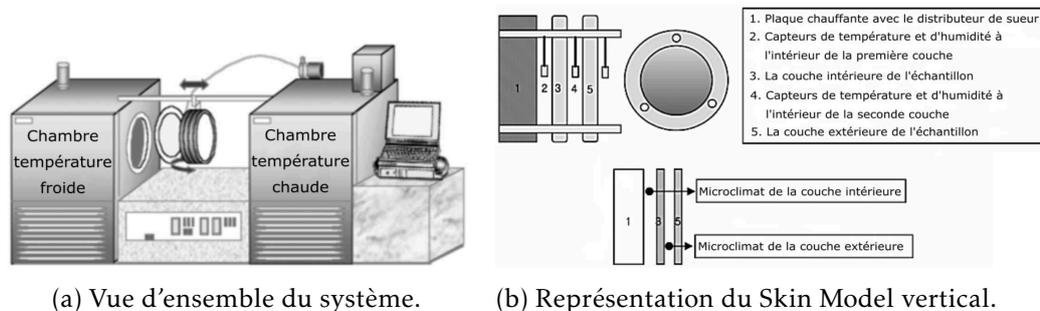


FIGURE 1.53 – Description du Skin model vertical (adaptée de EA KIM, Yoo et J. KIM 2003).

La dimension de la surface de test est de 20 cm. Des assemblages comportant trois étoffes de différentes natures peuvent être testés. Par ailleurs, des capteurs d'humidité et de température sont placés entre chaque épaisseur de textile. L'épaisseur des lames d'air entre les textiles peuvent varier de 0 à 30 mm selon l'épaisseur du produit testé.

Plaque chaude gardée transpirante en dynamique

Cet appareil, développé par Kaplan (KAPLAN et OKUR 2010), permet de réaliser des mesures dans des conditions dynamiques ou stationnaires, ce qui nécessite habituellement l'utilisation de différents appareils. Ce système permet de mesurer les résistances thermiques et évaporatives des textiles, ainsi que leur taux de transmission de vapeur d'eau.

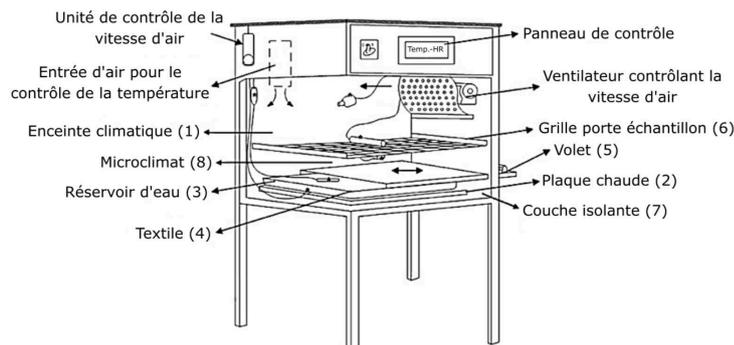


FIGURE 1.54 – Plaque chaude gardée transpirante dynamique (adaptée de KAPLAN et OKUR 2010).

Selon la figure 1.54, il est composé d'une chambre climatique (1) permettant de contrôler la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air pendant l'expérience. Une plaque gardée transpirante (2), maintenue à 35 °C, est alimentée en eau par un réservoir d'eau situé en-dessous de celle-ci (3) et recouvert par trois couches d'une membrane perméable uniquement à la vapeur d'eau (4) de dimension 44 × 44 cm². Un volet (5) est utilisé pour contrôler les gradients de température et de vapeur d'eau pendant les essais dynamiques. Une grille (6) permet de maintenir l'échantillon en position lorsque le taux de transmission de vapeur d'eau est mesuré à travers celui-ci. Une couche isolante permet d'empêcher les transferts thermiques vers le milieu extérieur. Des capteurs d'humidité (précision de ± 3 %) et de température (précision de ± 0,5 °C) sont positionnés dans la chambre climatique, à la surface du textile et dans le microclimat (8). L'échantillonnage est réalisé toutes les 30 secondes.

- Taux de transmission de la vapeur d'eau

Un gradient de pression de vapeur d'eau est créé entre le microclimat et l'environnement par le mécanisme « volet » (5). Il est maintenu fermé pendant la stabilisation du milieu environnemental à $21 \pm 0,5$ °C, 60 ± 3 % et avec une vitesse d'air réglée à $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. La température de la plaque chaude gardée est maintenue à 35 °C, l'échantillon est positionné sur la grille (6). Par la suite, le « volet » est ouvert et permet de simuler une période de transpiration. Le microclimat atteint un taux maximum d'humidité en moins de 15 minutes puis le « volet » est refermé, dans ce cas l'acquisition des données commence. D'après le graphique représenté en figure 1.55, un maximum d'humidité est transféré en quelques minutes après avoir fermé le « volet » (simulant la fin d'une période de transpiration).

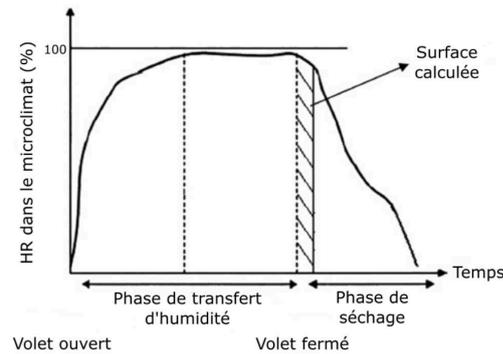


FIGURE 1.55 – Évolution de l'humidité dans le microclimat (adaptée de KAPLAN et OKUR 2010).

Le taux de transfert de la vapeur d'eau à travers le textile est déterminé selon l'équation 1.88.

$$T_{vap} = \frac{\Delta \dot{m}_w}{\Delta P_v} \quad (1.88)$$

Avec T_{vap} le taux de transmission de la vapeur d'eau ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$), ΔP_v le gradient de pression de la vapeur d'eau (Pa), $\Delta \dot{m}_w$ la quantité de vapeur d'eau transférée calculée par unité de surface et de temps t ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) selon l'équation 1.89.

$$\Delta \dot{m}_w = \frac{m_{w1} - m_{w2}}{t \times S} \quad (1.89)$$

Avec m_{w1} le taux d'humidité au sein du microclimat, m_{w2} le taux d'humidité après la période de transfert, S la surface de test de l'échantillon (m^2).

La grille (6) est retirée et l'échantillon textile est positionné directement à la surface de la plaque chaude gardée transpirante lors de la détermination des résistances thermiques et hydriques des échantillons textiles.

- Résistance évaporative

Les mesures sont réalisées en fixant la température de l'air et de la plaque chaude gardée transpirante à 35°C , l'humidité relative à 40% et la vitesse de l'air à $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (ISO11092 2014). Dans cette étude, le calcul de R_{et0} n'est pas réalisé car les capteurs sont placés directement entre la plaque représentant la « peau artificielle » et le textile. Ainsi, la résistance évaporative est déterminée selon l'équation 1.90.

$$R_{et} = \frac{(P_m - P_a) \times S}{H} \quad (1.90)$$

Avec R_{ct} la résistance à la vapeur d'eau ($\text{Pa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$), P_m la pression partielle saturante de vapeur d'eau du microclimat et P_a la pression de la vapeur d'eau dans l'air ambiant (Pa), S la surface de test de l'échantillon (m^2) et H la puissance fournie nécessaire pour maintenir la plaque chaude gardée transpirante à 35°C (W).

- Résistance thermique

La résistance thermique des textiles est calculée selon la norme ISO 11092 :2003 en fixant la température de l'air à 27°C , l'humidité relative à 50 % et la vitesse d'air à $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. La résistance thermique est définie selon l'équation 1.91.

$$R_{ct} = \frac{(T'_m - T_a) \times s}{H} - R_{ct0} \quad (1.91)$$

Avec R_{ct} la résistance thermique ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$), T'_m la température de la peau artificielle et T_a la température de l'air (K), S la surface de test de l'échantillon (m^2), H la puissance fournie permettant de maintenir la plaque chaude gardée transpirante à 35°C (W), R_{ct0} la résistance thermique à vide ($\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$).

1.5.5.3 Mannequin transpirant mobile

Le mannequin développé par Fan et al. (FAN et al. 2004) permet de simuler la perspiration d'une personne vêtue en dynamique. Cet appareil permet de déterminer les résistances thermique et à la vapeur d'eau de différents textiles. Une membrane perméable à la vapeur d'eau et imperméable à l'eau liquide permet de simuler la perspiration. La température du mannequin, similaire à celle du corps humain, est réglée en injectant de l'eau chaude à 37°C circulant de son centre vers ses extrémités. La peau du mannequin est interchangeable pour simuler différents taux de perspiration. Les jambes et les bras du mannequin (figure 1.56) sont mobiles et leur vitesse peut varier de 0 à $4 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

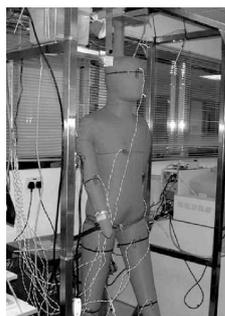


FIGURE 1.56 – Mannequin transpirant mobile (FAN et al. 2004).

Les pertes d'eau sont enregistrées en temps réel en pesant un récipient d'eau connecté au mannequin par des tubes. Par effet « siphon », le niveau d'eau du mannequin est le

même que celui du récipient. Les pertes évaporatives sont mesurées selon l'équation 1.92 et comme la réduction du niveau d'eau dans le récipient est proportionnel à celui du mannequin alors la quantité d'eau perdue Q est déterminée selon l'équation 1.93 (QIAN et FAN 2006).

$$H_e = \lambda_e \times Q_p \quad (1.92)$$

$$Q_p = 3600 \times \Phi \times \frac{\varphi}{\Delta t} \quad (1.93)$$

Avec H_e les pertes évaporatives de la peau vers l'environnement (W), λ_e la chaleur issue de l'évaporation de l'eau à la température de la peau ($\lambda_e = 2419 \text{ J.g}^{-1}$ à 35°C), Q_p la quantité d'eau perdue par le mannequin (g.s^{-1}), Φ le coefficient de calibration, $\frac{\varphi}{\Delta t}$ le taux d'eau fourni en g.s^{-1} issu du récipient déterminé au moyen de deux balances.

Par ailleurs, la résistance thermique de la lame d'air environnante I_a est définie selon l'équation 1.94 et la résistance à la vapeur d'eau de la lame d'air environnante $R_{a,e}$ est donnée par l'équation 1.95.

$$I_a = \frac{A \times (T_{sk} - T_a)}{H_s + H_p - H_a - H_e} \quad (1.94)$$

$$R_t = R_{a,e} + R_{es} = \frac{A \times (p_{ss} - p_{sa} \times R \times H_a)}{H_e} + R_{es} \quad (1.95)$$

Avec R_t la résistance à la vapeur d'eau totale ($\text{Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$), I_a la résistance thermique de la lame d'air environnante ($\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$), $R_{a,e}$ la résistance à la vapeur d'eau de la lame d'air environnante ($\text{Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$), R_{es} la résistance à la vapeur d'eau de la peau ($\text{Pa.m}^2.\text{W}^{-1}$), A la surface du corps (m^2), T_{sk} la température de la peau et T_a la température de l'air (K), p_{ss} la pression de saturation de la vapeur d'eau à la surface de la peau (Pa), p_s la pression de la vapeur d'eau à la surface de la peau (Pa), $R \times H_a$ l'humidité relative de l'environnement, H_e les pertes évaporatives de la peau vers l'environnement (W), H_s le flux thermique généré par les éléments chauffants du mannequin (W), H_p le flux thermique généré par les pompes (W).

1.5.6 Essais au porté

Les essais au porté permettent d'évaluer le confort d'un produit textile dans des conditions réelles d'applications.

1.5.6.1 Indices PMV et PPD

Les indices de Vote moyen prévisible (PMV) et Pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) expriment l'inconfort ressenti par les individus dans des ambiances chaudes ou froides. Ils sont définis selon l'ISO 7730 :2005.

Vote moyen prévisible PMV

Le PMV donne la valeur moyenne des votes d'un groupe important de personnes exprimant leur sensation thermique sur une échelle à 7 niveaux (tableau 1.12). Il est basé sur le bilan thermique du corps humain.

Le PMV est utilisé de préférence lorsque ces valeurs sont comprises entre -2 et 2 . De plus, les six paramètres doivent être compris dans les intervalles suivants :

- $46 > M_m > 232 \text{ W.m}^{-2}$ soit 0,8 à 4 met ;
- $0 > I_{cl} > 0,310 \text{ m}^2.\text{K.W}^{-1}$ soit 0 à 2 clo ;
- $10 \text{ }^\circ\text{C} > t_a > 30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $10 \text{ }^\circ\text{C} > \bar{t}_r > 40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $0 \text{ m.s}^{-1} > v_{ar} > 1 \text{ m.s}^{-1}$;
- $0 \text{ Pa} > p_a > 2700 \text{ Pa}$.

Niveaux	Sensations thermique
3	Chaud
2	Tiède
1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

TABLEAU 1.12 – Échelle de sensation thermique PMV (ISO7730 2005).

Cet indice peut être déterminé au moyen de tableaux fournis dans la norme. Dans ce cas, les valeurs de PMV y sont données pour différentes combinaisons d'activité, d'habillement, de température opérative et de vitesse relative. Il peut également être mesuré directement à partir d'un capteur intégrateur.

Pourcentage prévisible d'insatisfaits PPD

L'indice PPD est une estimation de la valeur moyenne des votes de sensation thermique donnés par un groupe important de personnes exposées à la même ambiance. Il représente une prévision quantitative du pourcentage de personnes insatisfaites thermiquement susceptible d'avoir trop chaud ou trop froid (tableau 1.12). Le PPD est représenté en fonction du PMV selon la figure 1.57.

Aucune condition thermique ne peut satisfaire 100 % des personnes et dans le cas le plus favorable seulement 5 % des personnes restent insatisfaites. En-dessous de la courbe de la figure 1.57, le pourcentage des personnes insatisfaites est représenté et au-dessus le pourcentage des personnes satisfaites.

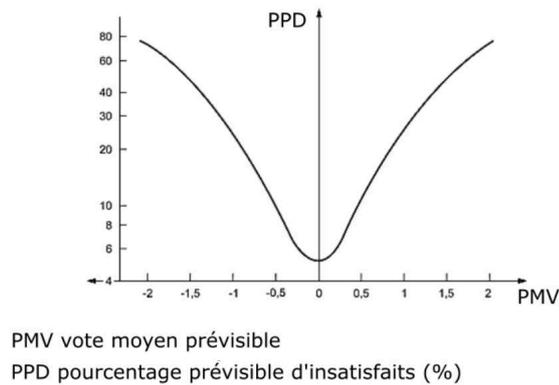


FIGURE 1.57 – Représentation graphique de PPD en fonction de PMV (adaptée de ISO7730 2005).

Le PPD est calculé à partir du PMV à partir de l'équation 1.96.

$$PPD = 100 - 95 \times e^{-0,03353 \times PMV^4 - 0,2179 \times PMV^2} \quad (1.96)$$

Une situation est définie comme confortable si elle satisfait le plus grand nombre de personnes.

1.5.6.2 Détermination de l'hydratation cutanée

La capacité des textiles à assécher ou à maintenir une certaine humidité au niveau de la surface cutanée est mesurée au moyen d'un cornéomètre sur un panel de personnes.

Facteurs

Différents facteurs influencent l'hydratation de la peau. L'eau est présente dans les différentes couches de la peau en différente quantité (tableau 1.13).

Peau	Teneur en eau (%)
Couche cornée	10 à 15 %
Épiderme	60 à 70 %
Derme	80 %
Hypoderme	20 %

TABLEAU 1.13 – Quantité d'eau dans les différentes couches de la peau.

L'eau est majoritairement liée solidement aux macromolécules protéiques dermiques (mucopolysaccharides, glycoaminoglycanes GAG). La partie non liée de l'eau migre dans l'épiderme. L'eau épidermique se déplace par diffusion de manière régulière et continue vers la surface par l'intermédiaire des kératinocytes. La teneur en eau des keratinocytes

varie le long de l'épaisseur de l'épiderme. Dans la couche basale, les cellules contiennent 65 à 70 % d'eau et les cornéocytes contiennent de 10 à 13 % d'eau dans la couche cornée.

Le film hydrolipidique présent à la surface de la couche cornée agit comme une barrière à l'environnement extérieur et permet de retenir l'eau à la surface de la peau. Les lipides contenus dans ce film proviennent de la sécrétion sébacée. Elles sont constituées principalement de glycérides et d'acide gras libres (70 %), d'eau et de cires. Le reste du film, hydrosoluble, correspond aux composants de la sueur tels que l'eau, composés ioniques (sodium), substances organiques azotées et des acides aminés (AA) libres (DEMATICE 2016). Une peau déshydratée va changer d'aspect et de texture. Elle devient rugueuse, moins souple, moins élastique. La couche cornée se craquèle, présentant des fissures et des crevasses ce qui permet de laisser passer dans l'organisme des facteurs pathogènes. Dans ce cas, la peau devient extrêmement sensible aux frottements et une sensation d'irritation est ressentie. Plusieurs facteurs peuvent influencer l'hydratation de la peau comme les conditions environnementales extérieur (vent, pollution, température, UV). Les frottements du textile sur la peau peuvent également considérablement asséchée la surface cutanée et diminuer le confort au porté.

Principe du cornéomètre

Le cornéomètre est un appareil qui permet de mesurer le taux d'hydratation cutanée selon les propriétés électriques de l'eau contenue dans la peau. Lorsque la couche supérieure de l'épiderme (couche cornée) est hydratée (figure 1.58a), le courant électrique passe correctement entre les deux électrodes du cornéomètre (>50 U.A). Dans le cas d'une peau sèche (figure 1.58b), les valeurs mesurées sont faibles (<35 U.A). Le cornéomètre mesure une valeur comprise entre 35 et 50 U.A pour une peau présentant une hydratation cutanée moyenne. Cette mesure indirecte de l'hydratation de la peau est influencée par différents facteurs.

- L'état de surface de la peau, quand la rugosité augmente, le contact entre la peau et le capteur diminue ce qui fait décroître la capacitance.
- La sueur, elle a pour effet d'augmenter les valeurs mesurées avec le cornéomètre car la teneur en eau à la surface de la peau est plus importante.
- La température, lorsqu'elle est importante, le teneur en eau augmente.
- L'hygrométrie, si l'humidité relative environnante augmente alors les valeurs mesurées sont élevées.



FIGURE 1.58 – Principe de fonctionnement du cornéomètre (ADDIACTIVE 2016).

1.5.7 Conclusion

Dans le cas de la mesure du transfert de la vapeur d'eau seul, les méthodes utilisant les récipients sont faciles à mettre en place, peu coûteuses, les essais sont longs et ne permettent pas de représenter ce qu'il se passe dans la réalité. Les résultats obtenus avec les différents dispositifs sont difficilement comparables entre eux car des variations de mesure apparaissent. Le DMPC et le DVS sont des méthodes très précises, coûteuses et fiables pour comparer pour l'une le transfert d'humidité à travers le matériau fibreux et pour l'autre la capacité de sorption/désorption en vapeur d'eau des textiles. La gestion de l'eau liquide est principalement mesurée à partir du MMT. Le transfert thermique est évalué selon la conductivité et l'effusivité thermiques au moyen de l'Alambeta et du disque chaud. Les appareillages permettant à la fois de mesurer les transferts thermique et hydrique, le Skin Model et les dispositifs dérivés de cette méthode, sont coûteux, long à mettre en place et permettent de réaliser des tests courts se rapprochant des conditions de la réalité par la réalisation de tests en dynamique. Par ailleurs, l'évaluation subjective de la contrainte thermique, et donc du confort, est déterminée au moyen des indices PMV et PPD. Le cornéomètre est un appareillage permettant de déterminer l'impact des textiles sur l'hydratation cutanée. Les essais au porté permettent d'évaluer dans des conditions réelles d'utilisation le confort des étoffes.

1.6 Conclusion

Les aspects physiques, physiologiques et psychologiques du confort sont décrits. Le confort dépend des échanges thermo-hydriques entre notre corps et l'environnement extérieur. Le corps humain met en place des mécanismes physiologiques pour maintenir sa température interne constante dans un milieu environnant variable. Lorsque la personne devient consciente de son ressenti thermique, elle agit pour retrouver un état confortable.

Les vêtements et les fibres le constituant influencent le confort au porté. Les fibres naturelles et synthétiques ont un comportement hydrique différent. Le transfert de l'humidité vers le milieu extérieur est ralenti pour des fibres naturelles à cause de leur forte affinité chimique avec les molécules d'eau contrairement aux autres fibres. Le style d'un vêtement comme les ouvertures (fermeture éclair, boutons), le taillant (ample, serré), le nombre de couches le constituant impact également le confort. La marche et les mouvements de l'air augmentent les échanges thermo-hydriques entre le corps et son environnement. L'augmentation de l'effet de ces paramètres diminue considérablement l'isolation du vêtement.

Pour évaluer le confort, différentes méthodes existent chacune avec leur contraintes et leurs avantages. Ces méthodes apportent des informations sur les transferts thermo-hydriques à travers les étoffes sans toutefois être représentatif de la réalité. Des essais au porté doivent être réalisés pour confirmer les résultats obtenus avec ces méthodes.

La description des échantillons textiles utilisée et leur impact sur le confort sont étudiés dans le chapitre 2.

Bibliographie

- AATCC195 (2015). *SDLATLAS, Moisture Management Tester M290 MMT : Instruction Manual*.
- ABEGG, D (2009). *Les thermo TRP*.
- ABELÉ, C et al. (2009). *Transferts d'humidité à travers les parois. Evaluer les risques de condensation*.
- ADDIACTIVE (23 fév. 2016). *Mesurer l'hydratation*. URL : <http://www.addiactive.com/peau/mesurer-lhydratation>.
- AR, NGH, KG HAL et B JONES (2006). « Convection and Ventilation in fabric Layers ». In : *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, p. 271.
- ARABULI, Svitlana et al. (2010). « Analysis of modern methods for measuring vapor permeability properties of textiles ». In :
- ASHRAE (1997). *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning engineers*.
- BEDEK, G (2010). « Elaboration et conception d'une structure textile auto-rafraichissante ». Thèse de doct. Lille 1.
- BEDEK, G et al. (2011). « Evaluation of thermal and moisture management properties on knitted fabrics and comparison with a physiological model in warm conditions ». In : *Applied ergonomics* 42.6, p. 792-800.
- BELBEKHOUCHE, S et al. (2011). « Water sorption behavior and gas barrier properties of cellulose whiskers and microfibrils films ». In : *Carbohydrate Polymers* 83.4, p. 1740-1748.
- BIGOURET, A (2012). « Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées ». Thèse de doct. Lyon, INSA.
- BS7209 (1990). *Etoffes pour vêtements perméables à la vapeur d'eau - Specification for water vapour permeable apparel fabrics*.
- CANDAS, V (2003). « L'homme dans son environnement climatique, facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques ». In : *Actes de la 13eme journée du Cuepe*.
- EL-CHAKAR, E (1994). « Transfert d'eau liquide dans les parois du bâtiment ». Thèse de doct. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- ÇIL, MG, UB NERGİS et C CANDAN (2009). « An experimental study of some comfort-related properties of cotton—acrylic knitted fabrics ». In : *Textile Research Journal* 79.10, p. 917-923.
- COSMETICOFFICINE (5 juin 2016). *Les annexes cutanées*. consulté le 01/02/2016. URL : <http://www.cosmeticofficine.com/la-peau/les-annexes-cutanees/>.
- DAIAN, JF (1986). « Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment. » Thèse de doct. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- (2010). « Equilibre et transferts en milieux poreux I-Etats d'équilibre ». In : *Université Joseph Fourier, Grenoble*.

- DAS, A et R ALAGIRUSAMY (2010). *Science in clothing comfort*.
- DAS, B et al. (2008). « Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics ». In : *Fibers and Polymers* 9.2, p. 225-231.
- DEMATICE (23 fév. 2016). *Hydratation cutanée*. URL : http://www.dematice.org/ressources/DCEM3/dermatologie/D3_derm_004/web/co/HYDRATATION%20CUTANEE-2.html.
- DJONGYANG, N, R TCHINDA et D NJOMO (2010). « Thermal comfort : A review paper ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.9, p. 2626-2640.
- DUFORESTEL, T (1992). « Bases météorologiques et modèles pour la simulation du comportement hygrothermique des composants et ouvrages du bâtiment ». Thèse de doct. ENPC.
- F2298 (2003). *Standard Test Methods for Water Vapor Diffusion Resistance and Air Flow Resistance of Clothing Materials Using the Dynamic Moisture Permeation Cell*.
- FAN, J et al. (2004). « An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47.10-11, p. 2343-2352.
- FARNWORTH, B, WA LOTENS et PPMW WITTGEN (1990). « Variation of water vapor resistance of microporous and hydrophilic films with relative humidity ». In : *Textile research journal* 60.1, p. 50-53.
- FENGZHI, L et L YI (2005). « Effect of clothing material on thermal responses of the human body ». In : *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 13.6, p. 809.
- FOURMENTIN, M (2015). « Impact de la répartition et des transferts d'eau sur les propriétés des matériaux de construction à base de chaux formulées ». Thèse de doct. Université Paris-Est.
- GERALDES, MJ, C MONTEIRO et L HES (2012). « Study and Interpretation of the Mass Transfer Phenomena through Textile Structures in the Wet State ». In : *Defect and Diffusion Forum*. T. 326. Trans Tech Publ, p. 205-208.
- GIDIK, H (2015). « Réalisation d'un fluxmètre thermique à gradient tangentiel de température à paroi auxiliaire textile intégrant des fils thermoélectriques : application à la mesure des transferts thermiques et hydriques ». Thèse de doct. Lille 1.
- GUNESOGLU, S, B MERIC et C GUNESOGLU (2005). « Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics ». In : *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 13.2, p. 46.
- HAMOUCHE, H (2012). « Caractérisation des fibres kératiniques en vue de leur utilisation comme capteur d'humidité. » Thèse de doct. Université Mouloud Mammeri.
- HATCH, KL et al. (1990). « In vivo cutaneous and perceived comfort response to fabric : part I : thermophysiological comfort determinations for three experimental knit fabrics ». In : *Textile Research Journal* 60.7, p. 405-412.
- HAVENITH, G (2002). « Interaction of clothing and thermoregulation ». In : *Exogenous Dermatology* 1.5, p. 221-230.
- HAVENITH, G, I HOLMÉR et K PARSONS (2002). « Personal factors in thermal comfort assessment : clothing properties and metabolic heat production ». In : *Energy and buildings* 34.6, p. 581-591.

- HEARLE, JWS et WE MORTON (2008). *Physical properties of textile fibres*. Elsevier.
- HERNANDEZ, GM (2002). « Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et analyse digitale d'images ». Thèse de doct. Université Louis Pasteur-Strasbourg I.
- HES, L et M de ARAUJO (2010). « Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow ». In : *Textile Research Journal* 80.14, p. 1488-1497.
- HES, L et J WILLIAMS (2011). « Laboratory measurement of thermo-physiological comfort ». In : *Improving comfort in clothing*. Elsevier, p. 114-137.
- HOLMÉR, I et al. (1999). « Clothing convective heat exchange—proposal for improved prediction in standards and models ». In : *The Annals of occupational hygiene* 43.5, p. 329-337.
- HUANG, J et Y CHEN (2010). « Effects of air temperature, relative humidity, and wind speed on water vapor transmission rate of fabrics ». In : *Textile research journal* 80.5, p. 422-428.
- HUANG, J et X QIAN (2007). « A new test method for measuring the water vapour permeability of fabrics ». In : *Measurement Science and Technology* 18.9, p. 3043.
- HUANG, J et XM QIAN (2008). « Comparison of test methods for measuring water vapor permeability of fabrics ». In : *Textile Research Journal* 78.4, p. 342-352.
- HUANG, J, J WU et W XU (2014). « Coupling effects of steady-state heat and water vapor transfer through fabrics ». In : *Textile Research Journal* 84.20, p. 2157-2165.
- HUNTER, L et J FAN (2014). « Improving the comfort of garments ». In : *Textiles and Fashion*, p. 739-761.
- ISO10551 (1995). *Ergonomie des ambiances thermiques - Évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs*.
- ISO11092 (2014). *Textiles - Effets physiologiques - Mesurage de la résistance thermique et de la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire (essai de la plaque chaude gardée transpirante)*.
- ISO12127 (1998). *Textiles. Fabrics. Determination of mass per unit area using small samples*.
- ISO139 (2005). *Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing*.
- ISO22007-2 (2015). *Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la source plane transitoire (disque chaud)*.
- ISO5084 (1996). *Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products*.
- ISO7730 (2005). *Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*.
- ISO7933 (2004). *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*.
- ISO9237 (1995). *Textiles - Determination of the permeability of fabrics to air*.
- ISSAADI, N (2015). « Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.

- ST-JACQUES, R (15 avr. 2016). *CorpsHumain.ca*. Consulté le 25/01/2016. URL : <http://www.corpshumain.ca/Cerveau2.php>.
- JISL1099 (2012). *Testing methods for water vapour permeability of textiles*.
- KAPLAN, S et A OKUR (2010). « A new dynamic sweating hotplate system for steady-state and dynamic thermal comfort measurements ». In : *Measurement Science and Technology* 21.8, p. 085701.
- KIM, E, SJ YOO et H SHIM (2006). « Performance of selected clothing systems under sub-zero conditions : determination of performance by a human-clothing-environment simulator ». In : *Textile research journal* 76.4, p. 301-308.
- KIM, EA, S YOO et J KIM (2003). « Development of a human-clothing-environment simulator for dynamic heat and moisture transfer properties of fabrics ». In : *Fibers and Polymers* 4.4, p. 215-221.
- LAROUSSE, médical (3 mar. 2016). URL : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/peau/15217>.
- LEAHY, MJ et al. (2007). « Biophotonic methods in microcirculation imaging ». In : *Medical Laser Application* 22.2, p. 105-126.
- LEHOUELLEUR, J (2010). *L'hypothalamus régulation de la température corporelle, de l'osmolarité de l'espace extracellulaire et du fonctionnement endocrine*. URL : <http://www.neurone.fr/>.
- LELIÉVRE, D (2015). « Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés ». Thèse de doct. Lorient.
- LOTENS, WA (1993). « Heat transfer from humans wearing clothing ». Thèse de doct. TNO.
- MARIEB, E et K HOEHN (2014). *Anatomie et physiologie humaines*. Pearson Education France.
- MARTINET, C et JP MEYER (1999). *Travail à la chaleur et confort thermique*. Rapp. tech. INRS.
- MCCULLOUGH, EA, M KWON et H SHIM (2003). « A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics ». In : *Measurement Science and Technology* 14.8, p. 1402.
- MCHIRGUI, W (2012). « Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.
- MIJOVIĆ, B, I SALOPEK ČUBRIĆ et Z SKENDERI (2010). « Measurement of thermal parameters of skin-fabric environment ». In : *Periodicum biologorum* 112.1, p. 69-73.
- MIN, K et al. (2007). « Heat and moisture transfer from skin to environment through fabrics : a mathematical model ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50.25-26, p. 5292-5304.
- NARÇON, S (2001). « Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort ». In : *Neurosciences et Comportement*.

- OĞLAKCIOĞLU, N et A MARMARALI (2007). « Thermal comfort properties of some knitted structures ». In : *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 15.5-6, p. 64-65.
- OKUBAYASHI, S, UJ GRIESSER et T BECHTOLD (2004). « A kinetic study of moisture sorption and desorption on lyocell fibers ». In : *Carbohydrate Polymers* 58.3, p. 293-299.
- ONAL, L et M YILDIRIM (2012). « Comfort properties of functional three-dimensional knitted spacer fabrics for home-textile applications ». In : *Textile Research Journal* 82.17, p. 1751-1764.
- ÖNER, E et al. (2013). « Evaluation of moisture management properties on knitted fabrics ». In : *Journal of the Textile Institute* 104.7, p. 699-707.
- ÖZDİL, N, A MARMARALI et SD KRETZSCHMAR (2007). « Effect of yarn properties on thermal comfort of knitted fabrics ». In : *International journal of Thermal sciences* 46.12, p. 1318-1322.
- ÖZDİL, N, G SÜPÜREN et al. (2009). « A study on the moisture transport properties of the cotton knitted fabrics in single jersey structure. » In : *Journal of Textile and Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon* 19.3.
- PAN, N et P GIBSON (2006). *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Woodhead Publishing.
- PARSONS, K (2014). *Human thermal environments : the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. CRC press.
- PAVLOVIĆ, SS et al. (2014). « Transient thermal response of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers ». In : *Polymer Testing* 34, p. 97-102.
- PRAKASH, C, G RAMAKRISHNAN et CV KOUSHIK (2013). « Effect of blend proportion on moisture management characteristics of bamboo/cotton knitted fabrics ». In : *The Journal of The Textile Institute* 104.12, p. 1320-1326.
- QIAN, X et J FAN (2006). « Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds ». In : *Applied ergonomics* 37.6, p. 685-693.
- QUÉNARD, D (1989). « Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques : approche du type percolation et expérimentation ». Thèse de doct. Toulouse, INPT.
- REN, YJ et JE RUCKMAN (2003). « Water vapour transfer in wet waterproof breathable fabrics ». In : *Journal of industrial textiles* 32.3, p. 165-175.
- ROUQUEROL, J et al. (1994). « Recommendations for the characterization of porous solids ». In : *Pure and Applied Chemistry* 66.8, p. 1739-1758.
- SABRI, H (2000). « Etude de transfert de chaleur et de masse à travers les matériaux textiles. Détermination de la conductivité thermique des étoffes ». Thèse de doct. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir.
- SAHA, D et HA GRAPPE (2017). « Adsorption properties of activated carbon fibers ». In : *Activated Carbon Fiber and Textiles*. Elsevier, p. 143-165.
- SARI, H (1994). « L'interface vêtement : échanges hygrothermiques et microclimat sous-vestimentaire ». Thèse de doct. Nice.

- SIMO-TAGNE, M et al. (2016). « Sorption behavior of four tropical woods using a dynamic vapor sorption standard analysis system ». In : *Maderas. Ciencias y tecnologia*. 18, p. 403-412.
- SLATER, K (1986). « Discussion paper the assessment of comfort ». In : *Journal of the textile institute* 77.3, p. 157-171.
- SONG, G (2011). *Improving comfort in clothing*.
- STANKOVIĆ, SB, D POPOVIĆ et GB POPARIĆ (2008). « Thermal properties of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers ». In : *Polymer Testing* 27.1, p. 41-48.
- STEVENS, K et M FULLER (2015). « Thermoregulation and clothing comfort ». In : *Textile-Led Design for the Active Ageing Population*. Elsevier, p. 117-138.
- UKONDAYANGA, P (6 déc. 2017). *La prise en charge des hémiplégies consécutive a l'oedeme cérébral*. URL : https://www.memoireonline.com/06/10/3570/m_La-prise-en-charge-des-hemiplegies-consecutive-a-loedeme-cerebral2.html.
- WATKINS, DA et K SLATER (1981). « The moisture-vapour permeability of textile fabrics ». In : *Journal of the Textile Institute* 72.1, p. 11-18.
- XU, X et J WERNER (2001). « A dynamic model of the human-clothing-environment system ». In : *Applied human science* 16.2, p. 61-75.
- YAO, BG et al. (2006). « An improved test method for characterizing the dynamic liquid moisture transfer in porous polymeric materials ». In : *Polymer Testing* 25.5, p. 677-689.
- YOO, HS, YS HU et EA KIM (2000). « Effects of heat and moisture transport in fabrics and garments determined with a vertical plate sweating skin model ». In : *Textile Research Journal* 70.6, p. 542-549.
- YOON, HN et A BUCKLEY (1984). « Improved comfort polyester : Part I : Transport properties and thermal comfort of polyester/cotton blend fabrics ». In : *Textile Research Journal* 54.5, p. 289-298.
- ZHANG, Z (2014). « Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials ». Thèse de doct. Université Paris-Est.

Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux et structures textiles utilisés	91
2.1.1 Fibres naturelles	91
2.1.2 Fibres artificielles	94
2.1.3 Fibres synthétiques	95
2.1.4 Structures textiles	99
2.2 Caractérisation des textiles utilisés	100
2.2.1 Transferts thermo-hydriques	101
2.2.2 Essais au porté	102
2.3 Évaluation de l'impact des textiles sur le confort	103
2.3.1 Influence de la structure du textile	104
2.3.2 Propriétés thermophysiologicals	104
2.3.3 Transferts statiques thermo-hydriques	105
2.3.4 Transfert dynamique et gestion hydrique	105
2.3.5 Conclusion	108

2.1 Matériaux et structures textiles utilisés

Différents types de fibres naturelles, artificielles et synthétiques sont utilisées dans les mélanges étudiés. La nature des fibres a un impact sur les transferts thermo-hydriques avec le milieu environnant. La contexture des échantillons textiles étudiés sont de deux types, jersey et interlock 1 × 1.

2.1.1 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont d'origine animale ou végétale.

Coton

Le coton est une fibre naturelle extraite de la graine. Les principaux constituants de la fibre végétale sont la cellulose (composant principal), l'hémicellulose, la lignine et la pectine. Sa structure est composée d'une première paroi et d'une seconde contenant les couches S1, S2 et S3 (figure 2.1). La paroi primaire a des microfibrilles orientées aléatoirement et elle est composée de cellulose sous forme cristalline, d'hémicellulose et de cires en moindre quantité. La paroi secondaire représente 90 % de la fibre de coton constituée de microfibrilles orientées et soutenues par une structure amorphe d'hémicelluloses, de pectine et de lignine. La S3 est la couche la plus épaisse, elle définit les propriétés mécaniques le long de l'axe des fibres. Ces propriétés dépendent de l'angle d'inclinaison des microfibrilles disposées en sens inverse des autres couches S1 et S3. Pour un angle d'inclinaison faible, les propriétés mécaniques sont meilleures dans le sens longitudinal. Le lumen, partie creuse, donne aux fibres une forme tubulaire (EICHHORN et al. 2009).

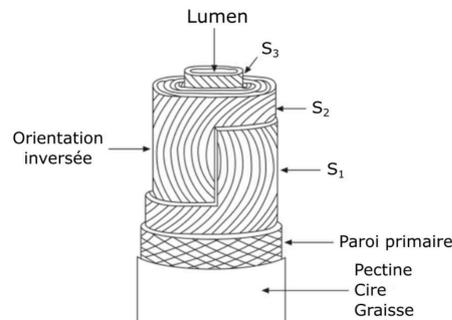


FIGURE 2.1 – Structure de la fibre de coton (adaptée de EICHHORN et al. 2009).

- Cellulose

À l'intérieur des cellules végétales, par biosynthèse, l'énergie lumineuse du soleil transforme les molécules de glucose en complexes enzymatiques. Une réaction de polymérisation par condensation se produit et avec l'élimination de l'eau, la cellulose se forme. Il s'agit d'une chaîne polymère linéaire composée d'unités de D-glucopyranose reliées entre elles par des liaisons β -1,4-glycosides (figure 2.2).

- Hemicellulose, lignine, pectine

Les hémicelluloses sont composées principalement de phases amorphes à base d'unités glucidiques qui constituent 2 à 6,4 % de la fibre de coton (tableau 2.1). Les molécules sont plus petites que celles de la cellulose. La lignine est composée d'unités d'oxyphénopropane et, contrairement aux hémicelluloses, elle a tendance à repousser l'eau. Les pectines, créées dans le tissu végétal, sont présentes dans les zones lamellaires moyennes et les zones de la paroi cellulaire primaire. Ces composants forment ensemble la paroi cellulaire fibreuse constituée de microfibrilles de cellulose.

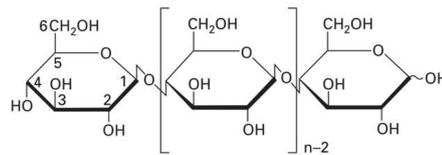


FIGURE 2.2 – Formule chimique de la cellulose (EICHORN et al. 2009).

Fibre végétale	Cellulose (%)	Hemicelluloses (%)	Lignine (%)	Pectine (%)
Coton	82-96	2-6,4	0-5	< 1-7

TABLEAU 2.1 – Composition de la fibre de coton (adaptée de EICHORN et al. 2009).

- Comportement hydrique du coton

La fibre de coton présente une forte affinité avec les molécules d'eau et présente un taux de reprise en eau important de 8,5 %. Cette fibre a la capacité de gonfler lorsque l'eau pénètre dans sa structure (CÉLINO et al. 2013). Les composants de la fibre de coton créant des liaisons hydrogènes avec l'eau sont la cellulose, l'hémicellulose, la pectine et la lignine. L'hémicellulose a un impact significatif sur la capacité de la fibre à stocker de l'eau (PEJIC et al. 2008). L'eau retenue dans les fibres polymères hydrophiles comme la cellulose est divisée en trois catégories, l'eau libre, l'eau faiblement et fortement liée à la fibre. La quantité d'eau fortement liée dépend principalement de la structure chimique du polymère (HATAKEYAMA et al. 2012).

Lorsque l'humidité est faible, les molécules de vapeur d'eau sont en contact direct avec le polymère et créent des liaisons hydrogènes fortement liées avec celui-ci. En examinant la structure de l'unité cellulosique, Mazeau et al. ont modélisé la sorption des molécules d'eau selon la figure 2.3. A 0,8 % d'humidité, les molécules d'eau, isolées des autres, forment des liaisons hydrogènes directement en contact avec les groupes hydroxyles de la cellulose à 6O et 2O . La sorption s'effectue de préférence sur les atomes d'oxygène suivant $^6O > ^2O >>> ^3O, ^4O, ^5O$. À 4,6 % d'humidité, des agrégats de molécules d'eau se forment. En plus des liaisons précédentes 6O et 2O , le groupe hydroxyle 3O est impliqué dans l'interaction avec les molécules d'eau. La sorption s'effectue de préférence selon $^6O > ^2O = ^3O >>> ^4O, ^5O$. A 18 % d'humidité, des agrégats importants de molécules d'eau sont créés avec l'augmentation de l'humidité. Ils occupent l'espace existant entre les chaînes cellulosiques. Dans cet environnement, les oxygènes acétalliques interagissent avec les molécules d'eau et la sorption est réalisée de préférence selon $^6O = ^2O = ^3O > ^4O = ^5O$ (MAZEAU 2015).

De manière générale, le coton a un touché doux et agréable, c'est une fibre connue pour être hypoallergénique. Elle présente une résistance à la lumière correct mais avec un jaunissement possible dans le cas d'une exposition prolongée. Sa capacité à garder la chaleur est faible et un textile en coton se froisse facilement. Le

séchage de la fibre est lent et sa résistance à l'abrasion est moyenne. De part son hydrophilicité, la fibre de coton a une bonne capacité d'absorption de l'humidité.

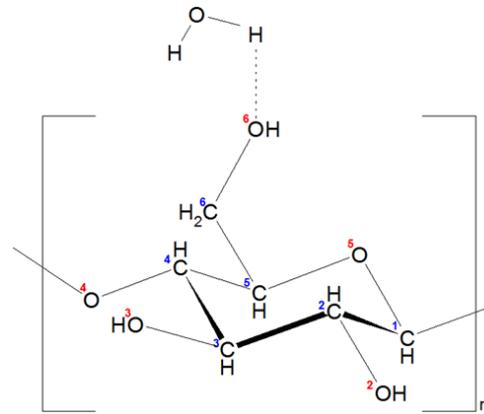


FIGURE 2.3 – Exemple de sorption d'une molécule d'eau sur une unité d'hydroglucose de cellulose (adaptée de MAZEAU 2015).

2.1.2 Fibres artificielles

Les fibres artificielles sont obtenues par le traitement chimique de matières naturelles.

Viscose

La fibre de viscose est obtenue à partir de la cellulose selon un procédé appelé procédé viscose. Le phénomène de fixation de la molécule d'eau sur la viscose est similaire à celui du coton. Cependant, le taux de reprise en eau de la viscose est plus important que pour le coton car son degré de cristallinité est de l'ordre de 30 % (70 % pour le coton). L'eau est principalement emmagasinée dans la fibre au sein des zones amorphes. Lors du procédé de viscose, la cellulose est dissoute par du disulfure de carbone (CS_2) puis un fil est obtenu par filage en présence d'acide sulfurique (H_2SO_4). La cellulose est hydrolysée en contact avec la soude caustique (hydroxyde de sodium, NaOH). La cellulose gonfle et les chaînes polymères s'écartent. Par la suite, l'ensemble est soumis à une action de pressage et de déchetage. La cellulose est dépolymérisée par un catalyseur ce qui permet d'obtenir un degré de polymérisation (DP) inférieure de 250 à 350 (initialement $DP = 10000$). La cellulose est insoluble dans l'eau alors du disulfure de carbone (CS_2) est greffé à celle-ci pour en écarter les chaînes et lui donner un caractère hydrophile. Ils se forme du xanthate de cellulose. La filtration permet de retirer les impuretés à la solution. Dans un bain d'acide sulfurique (H_2SO_4), des filaments continus de viscose sont obtenus en filant la solution à travers une plaque perforée (voie humide). L'acide permet d'éliminer les composés CS_2 .

Le filage par voie humide consiste à extruder dans un bain de coagulation la solution de solvant. Cette opération permet de solidifier la solution en filaments continus. Ces

filaments sont par la suite séchés et étirés (figure 2.4a). Les filaments obtenus ont un aspect brillant et il est possible de les matifier en incorporant avant filage de l'oxyde de titane. Cette fibre possède un toucher doux et agréable avec de bonnes solidités au lavage et à la lumière.

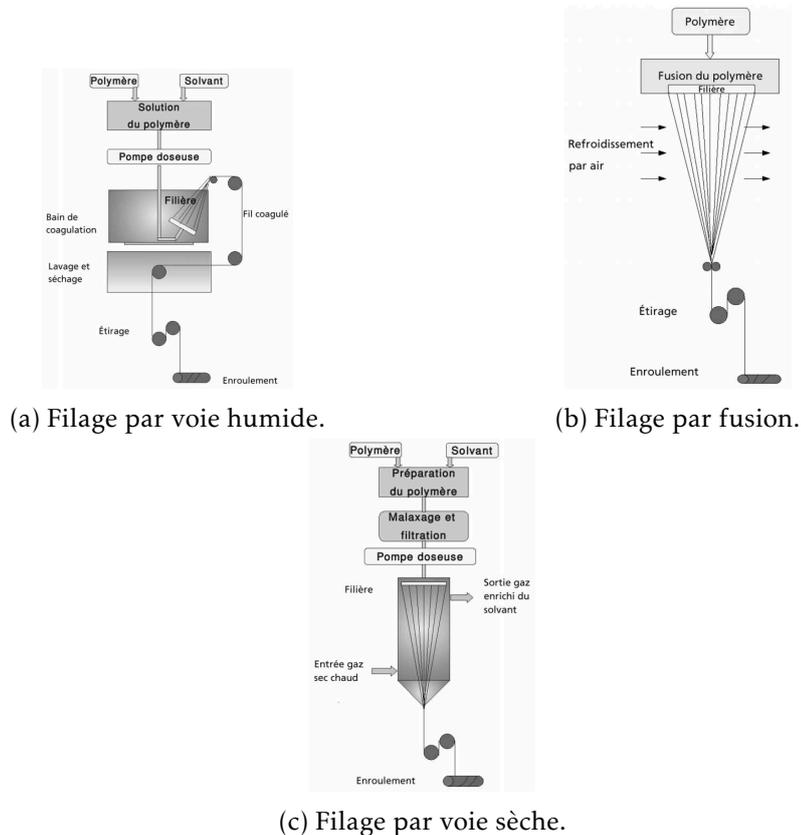


FIGURE 2.4 – Procédés de filage (adaptée de WEIDMANN 2010).

2.1.3 Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont produites en synthétisant différents composés chimiques.

Polyester

Le polyester (PET) est un matériau polymérisé par polycondensation en autoclave à une température de 300 °C. Il est broyé en granulé pour être par la suite filé selon le procédé de filage par voie fondu (figure 2.4b). Les filaments sortant de la filière sont solidifiés par refroidissement à l'air libre et étirés pour leur donner les propriétés souhaitées. La structure du polyester est composée d'une alternance de lamelles cristallines et de zones amorphes (figure 2.5a). Sa formule chimique est représentée en figure 2.5b où les sites de sorption facilement accessibles pour les molécules d'eau sont représentés. Les

molécules d'eau créent des liaisons hydrogènes sur les doublets non-liants des oxygènes composant la fibre de PET.

Il présente une résistance importante à l'abrasion, à la lumière, aux acides, bases et aux solvants. Le polyester est difficile à teindre à cause de sa partie cristalline absorbant peu d'eau et ne gonflant pas limitant ainsi la pénétration du solvant au sein de la structure. Par ailleurs, le polyester a tendance à boulocher. Il est cependant facile d'entretien et sèche rapidement.

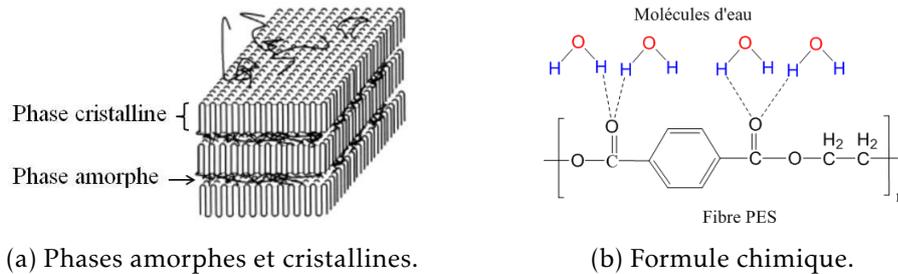


FIGURE 2.5 – Représentation schématique de la fibre PET avec les phases amorphes et cristallines; sa formule chimique (adaptée de WEIDMANN 2010).

Acrylique

La fibre d'acrylique provient de la polymérisation par polyaddition de la molécule d'acrylonitrile. L'acrylique est formé de macromolécules linéaires présentant 85 % en masse du motif acrylonitrile. Dans une autoclave, l'acrylonitrile est un autre composant sont polymérisés en présence d'un catalyseur. Le polymère obtenu est par la suite filtré, lavé et séché puis dissous dans du diméthylformamide. Une fois la solution filtrée et filée selon le processus de filage à sec, les filaments obtenus sont solidifiés par évaporation du solvant (figure 2.4c). Le filage par voie humide peut également être utilisé. La sorption des molécules à la surface de la fibre (au niveau des unités d'acrylonitrile) est réalisée principalement sur le doublet du composé azoté (figure 2.6). Le nombre de sites de sorption disponible à la surface de la fibre PET est faible.

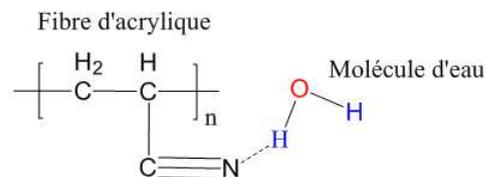


FIGURE 2.6 – Formule chimique de l'acrylonitrile avec la sorption des molécules d'eau (adaptée de WEIDMANN 2010).

L'acrylique est une matière relativement agréable au toucher avec un bon pouvoir adiathermique. Ces fibres présentent une bonne résistance à la lumière et aux micro-organismes. Cependant, l'acrylique bouloche facilement et présente une faible résistance

à l'abrasion.

Polyacrylate

La fibre de polyacrylate contient 25 % en masse d'acrylate et moins de 10 % d'acrylonitrile. Sa formule chimique, représentée en figure 2.7, est composée d'une unité d'acrylate qui est réticulée avec un autre polymère. Le terme « M⁺ » représente les ions métalliques tels que Na⁺, Ca⁺, K⁺, Mg²⁺. Le terme « R » représente la structure réticulée dont les différents composants possibles sont définis en figure 2.8. La structure chimique de cette fibre permet la sorption en eau de nombreuses molécules d'eau sur les sites présentant le plus d'affinité avec ces dernières.

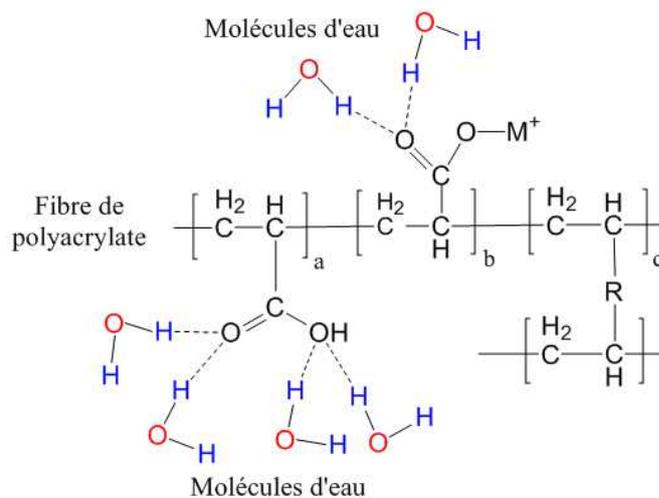


FIGURE 2.7 – Formule chimique du polyacrylate avec la sorption des molécules d'eau (adaptée de WEIDMANN 2010).

Le polyacrylate absorbe et libère l'humidité rapidement, a un bon pouvoir adiabatique, de bonnes propriétés antibactériennes et ignifuges. La capacité importante d'absorption d'eau de cette fibre permet d'évacuer facilement l'humidité en améliorant le confort au porté des vêtements. En absorbant l'eau, le fibre génère de la chaleur. Par ailleurs, la fibre de polyacrylate a la capacité de sécher rapidement. Les vêtements permettent alors de maintenir l'utilisateur au chaud et au sec.

Élasthanne

L'élasthanne est une fibre constituée d'au moins 85 % de polyuréthane dans sa composition (figure 2.9). Ce polymère est obtenu suite à une succession d'étapes chimiques consistant en la réaction entre un prépolymère et un diisocyanate. Les polyuréthanes, constitués de macromolécules linéaires, sont solubles dans certains solvants. Ils sont par la suite solidifiés après passage dans une filière, soit dans un bain de coagulation (filage voie humide) ou par évaporation du solvant (filage par fusion) selon la figure 2.4.

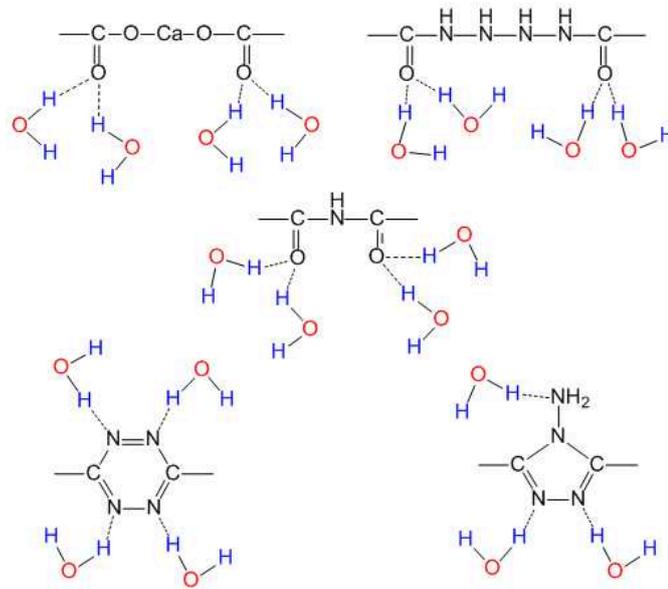


FIGURE 2.8 – Sorption en eau sur les groupes R du polyacrylate.

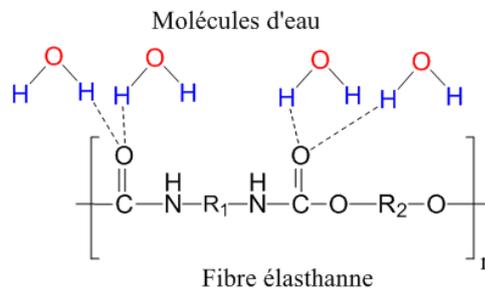


FIGURE 2.9 – Formule chimique du polyuréthane avec sorption des molécules d'eau (adaptée de WEIDMANN 2010).

Cette fibre présente une bonne résistance à l'abrasion, à la lumière, aux produits chimiques sauf dans le cas du chlore. Elle a un bon comportement dans le temps mais une dégradation peut avoir lieu suite à une utilisation intensive et à de nombreux cycles de lavage. Il apporte du confort au vêtement, une meilleure tenue, de l'élasticité en permettant de maintenir le tricot près du corps. Le tableau 2.2 résume les propriétés des fibres naturelles et synthétiques utilisées dans les tricots étudiés.

Fibres	Coton	Viscose	Polyester	Acrylique	Polyacrylate	Elasthanne
Masse volumique (g.cm ⁻³)	1,54	1,52	1,38	1,2	/	1,2-1,25
Taux de reprise en eau (%)	8,5	13	3	2-5	3	23
Ténacité (cN.Tex ⁻¹)	12-20	15-20	40-60	20-45	0,5-1,5	5-6
Allongement à la rupture (%)	6-8	17-30	15-30	20-45	/	/
Module de Young (GPa)	6-12	13-20	10-20	5,2-6,5	/	/
Module d'élasticité (N.Tex ⁻¹)	8	/	7-14	4,4-5,5	/	/
Température de fusion (°C)	/	/	260	/	/	230-290
Température de dégradation (°C)	150	140	300	250	/	/

TABLEAU 2.2 – Résumé des propriétés des différentes fibres.

2.1.4 Structures textiles

Deux types de structures textiles sont étudiées, jersey et interlock 1 × 1 (figure 2.10).

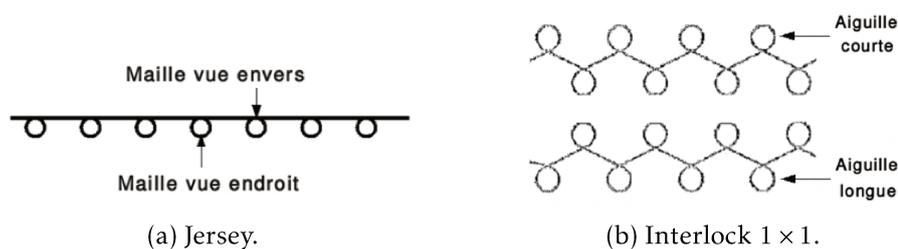


FIGURE 2.10 – Contexture des textiles étudiés, jersey et interlock 1 × 1 (WEIDMANN 2010).

Contexture jersey

Le textile est tricoté sur une seule fonture d'aiguille (figure 2.10a). Sur la face endroit les « jambes » des mailles sont visibles (forme en V) tandis que sur l'envers, les têtes et les pieds de mailles sont apparents. La composition des textiles jersey étudiés est détaillée dans le tableau 2.3.

Contexture interlock 1 × 1

Les textiles interlock 1 × 1 sont tricotés sur des métiers comportant deux fontures d'aiguilles (figure 2.10b) (cylindre et plateau). Le métier interlock comporte des aiguilles courtes et longues disposées en quinconce et commandées chacune par un chemin de came spécifique. La composition des tricots interlock est spécifiée dans le tableau 2.4.

Nom de l'échantillon	Contexture	Détail de la composition
CO _{95%} -EA _{5%} -J	Jersey	95 % Coton, 5 % Élasthanne
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	Jersey	80 % Acrylique, 14 % Polyacrylate, 6 % Élasthanne
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	Jersey	87 % Acrylique, 7 % Polyacrylate, 6 % Élasthanne
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	Jersey	66 % Acrylique, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	Jersey	66 % Polyester, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	Jersey	80 % Acrylique, 14 % Viscose, 6 % Élasthanne
PET _{95%} -EA _{5%} -J	Jersey	95 % Polyester, 5 % Élasthanne

TABLEAU 2.3 – Composition des échantillons jersey.

Nom de l'échantillon	Contexture	Détail de la composition
CO _{100%} -I	Interlock 1 × 1	100 % Coton
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	Interlock 1 × 1	85 % Acrylique, 15 % Polyacrylate
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	Interlock 1 × 1	68 % Acrylique, 25 % Polyester, 7 % Polyacrylate
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	Interlock 1 × 1	50 % Acrylique, 50 % Polyester

TABLEAU 2.4 – Composition des échantillons interlock 1 × 1.

2.2 Caractérisation des textiles utilisés

Les résultats des tests usuels et thermo-hydriques, dont les méthodes sont définies dans le chapitre 1, sont résumés dans les tableaux 2.5 pour les textiles interlock 1 × 1 et 2.6 pour les jersey.

Nom de l'échantillon	Masse surfacique (g.m ⁻²)	Épaisseur (mm) à 0,1 kPa	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Porosité (%)	Perméabilité à l'air (l.m ⁻² .s ⁻¹) à 100Pa	Taux de reprise en eau réel (%)
CO _{100%} -I	177 ± 3	1,03 ± 0,05	1,54	88,5 ± 6,1	861 ± 45	7,5 ± 0,5
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	156 ± 4	1,22 ± 0,08	1,23	89,4 ± 8,5	1311 ± 60	4,2 ± 0,6
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	157 ± 2	1,09 ± 0,06	1,26	88,5 ± 6,1	1163 ± 28	3,1 ± 0,3
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	215 ± 2	1,31 ± 0,03	1,35	87,8 ± 3,0	1059 ± 73	1,1 ± 0,2

TABLEAU 2.5 – Caractéristiques physiques des échantillons interlock 1 × 1.

Nom de l'échantillon	Masse surfacique (g.m ⁻²)	Épaisseur (mm) à 0,1 kPa	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Porosité (%)	Perméabilité à l'air (l.m ⁻² .s ⁻¹) à 100 Pa	Taux de reprise en eau réel (%)
CO _{95%} -EA _{5%} -J	166 ± 1	1,05 ± 0,02	1,52	89,5 ± 2,3	265 ± 8	7,1 ± 0,3
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	158 ± 2	1,02 ± 0,02	1,23	87,4 ± 3,2	785 ± 46	4,4 ± 0,1
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	145 ± 4	0,82 ± 0,04	1,21	85,4 ± 7,3	779 ± 18	2,8 ± 0,1
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	138 ± 5	0,71 ± 0,02	1,29	85,0 ± 5,6	1226 ± 32	5,0 ± 0,1
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	141 ± 3	0,82 ± 0,02	1,41	87,8 ± 4,4	1213 ± 70	4,1 ± 0,1
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	162 ± 4	0,95 ± 0,05	1,24	86,4 ± 7,1	1126 ± 40	3,6 ± 0,2
PET _{95%} -EA _{5%} -J	160 ± 2	0,64 ± 0,06	1,37	81,7 ± 9,2	418 ± 21	1,3 ± 0,2

TABLEAU 2.6 – Caractéristiques physiques des échantillons jersey.

La masse surfacique des textiles varie en fonction des fibres le composant. Les tricots sont fins avec des écarts faibles entre les matières. La masse volumique et la porosité mesurées sont proches. Le taux de reprise en eau réel des échantillons jersey et interlock diffèrent considérablement en fonction de la nature des fibres contenues dans les échantillons textiles.

2.2.1 Transferts thermo-hydriques

Les méthodes permettant de décrire les transferts thermiques et hydriques en statique et en dynamique sont décrits dans le chapitre 1. Les indices R_{ct} , R_{et} et I_{mt} sont mesurés au moyen du Skin model selon la norme ISO11092 :2014 (tableaux 2.7 et 2.8). La conductivité thermique λ et la diffusivité thermique b sont déterminées selon le disque chaud (ISO22007-2 2015). L'indice OMMC est mesuré avec le MMT. Chaque textile présente des résistances thermique (R_{ct}) et à la vapeur d'eau (R_{et}) différentes occasionnant une respirabilité de l'étoffe variable (I_{mt}). Par conséquent, la conductivité (λ) et la diffusivité (b) thermiques, le taux de transmission de vapeur d'eau (W_d) et la gestion hydrique des textiles (OMMC) diffèrent également suivant la contexture et la nature des fibres utilisées dans le mélange fibreux.

Nom de l'échantillon	R_{ct} ($m^2.K$ $.W^{-1}$)	R_{et} ($m^2.Pa$ $.W^{-1}$)	I_{mt}	b ($J.cm^{-2}.K^{-1}$ $.s^{-1/2}$)	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	W_d ($g.m^{-2}.h^{-1}$ $.Pa^{-1}$)	OMMC
CO _{95%} -EA _{5%} -J	0,021	/	/	39,18 ± 2,13	0,046 ± 0,008	/	0,32 ± 0,10
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	0,031	3,29	0,56	25,64 ± 1,51	0,033 ± 0,004	0,45	0,68 ± 0,10
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	0,024	2,90	0,50	23,11 ± 1,20	0,029 ± 0,008	0,51	0,70 ± 0,02
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,028	3,24	0,52	21,59 ± 3,45	0,025 ± 0,002	0,46	0,69 ± 0,04
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,027	3,29	0,49	23,89 ± 5,10	0,030 ± 0,004	0,45	0,64 ± 0,04
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	0,039	/	/	20,46 ± 2,03	0,024 ± 0,002	/	0,63 ± 0,04
PET _{95%} -EA _{5%} -J	/	/	/	20,06 ± 1,35	0,024 ± 0,005	/	0,49 ± 0,01

TABLEAU 2.7 – Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons jersey.

Nom de l'échantillon	R_{ct} ($m^2.K$ $.W^{-1}$)	R_{et} ($m^2.Pa$ $.W^{-1}$)	I_{mt}	b ($J.cm^{-2}.K^{-1}$ $.s^{-1/2}$)	λ ($W.m^{-1}$ $.K^{-1}$)	W_d ($g.m^{-2}.h^{-1}$ $.Pa^{-1}$)	OMMC
CO _{100%} -I	0,023	2,83	0,49	39,91 ± 4,05	0,045 ± 0,005	0,51	0,05 ± 0,08
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	0,039	3,87	0,60	25,97 ± 2,50	0,031 ± 0,001	0,38	0,65 ± 0,00
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	0,035	3,85	0,54	19,98 ± 3,50	0,031 ± 0,004	0,39	0,50 ± 0,01
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,0315	4,47	0,42	27,43 ± 3,04	0,041 ± 0,002	0,34	0,42 ± 0,10

TABLEAU 2.8 – Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons interlock 1 × 1.

2.2.2 Essais au porté

Lors des essais au porté, les sujets (entre 55 et 65 ans) sont placés dans un environnement réglé à $24 \pm 0,1$ °C avec une humidité comprise entre 35 et 55 %HR. Le taux d'hydratation cutanée est mesuré au moyen d'un cornéomètre avant le test et après 4h au niveau des avant-bras. Pour déterminer si le textile permet significativement d'augmenter le taux d'hydratation à la surface de la peau, le test statistique de student pour les données appariées est appliqué.

Première étude

La première étude compare la différence entre CO_{95%}-EA_{5%}-J, la peau nue, PET_{95%}-EA_{5%}-J, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et un film (figure 2.11).

Les données mesurées par le cornéomètre sont statistiquement significatives pour l'ensemble des échantillons textiles. Les résultats montrent que le CO_{95%}-EA_{5%}-J assèche la surface cutanée et que le film augmente considérablement la teneur en eau mesurée.

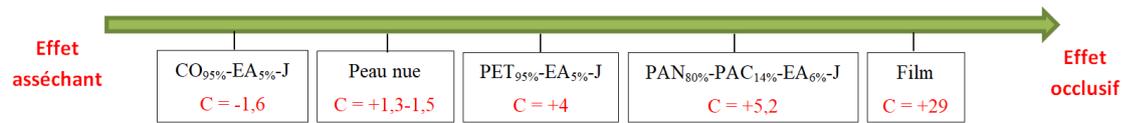


FIGURE 2.11 – Résultats DermScan première étude.

Les échantillons PET_{95%}-EA_{5%}-J et PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J présentent des comportements intermédiaires en préservant et maintenant le taux d'hydratation des couches superficielles de l'épiderme.

Seconde étude

La seconde étude DermScan apporte des informations sur les textiles suivants, PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{87%}-PAC_{7%}-EA_{6%}-J (figure 2.12).

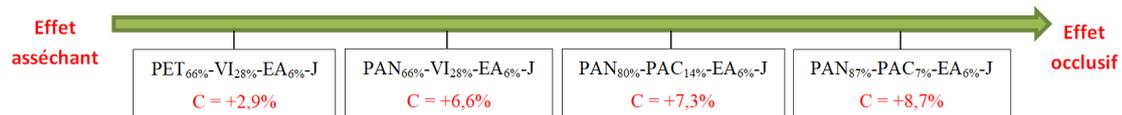


FIGURE 2.12 – Résultats DermScan seconde étude.

Les résultats obtenus pour le PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J sont équivalents à ceux de la peau nue, par conséquent ils ne sont pas statistiquement significatif. Ce textile a un effet neutre et ne permet pas d'augmenter la teneur en eau au niveau de la surface cutanée. Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, à base de polyacrylate, présente un comportement proche du PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J composé de 28 % de fibres de viscose. Ces textiles permettent d'augmenter le taux d'hydratation cutanée de manière statistiquement significative. Le PAN_{87%}-PAC_{7%}-EA_{6%}-J présente des valeurs supérieures aux autres textiles après 4h.

2.3 Évaluation de l'impact des textiles sur le confort

Une étude de Pearson est réalisée entre les propriétés physiques du textile (masse surfacique, épaisseur, etc.) et les propriétés thermiques et hydriques de ces derniers. Cette étude a pour but de comprendre l'interaction entre ces différents paramètres et de définir leur impact sur le confort.

Les coefficients obtenus avec Pearson définissent la relation linéaire existante entre deux variables. Ils varient entre -1 et 1. Une valeur de 1 indique que la corrélation entre deux variables est positive, -1 signifie que la corrélation est négative et 0 représente l'absence de lien linéaire entre les données. L'analyse de Pearson est réalisée en dissociant les contextures interlock 1 × 1 (tableau 2.9) et jersey (tableau 2.10).

Paramètres physiques	R_{ct}	λ	b	R_{et}	W_d	OMMC	I_{mt}
Masse surfacique	-0,400	0,166	0,263	0,406	-0,271	-0,307	0,934
Épaisseur	0,505	0,186	-0,377	0,883	-0,859	0,584	-0,264
Masse volumique	-0,987	0,368	0,922	-0,695	0,792	-0,986	-0,539
Porosité	0,494	0,338	-0,091	-0,296	0,159	0,418	0,956
Perméabilité à l'air	0,993	-0,137	-0,791	-0,480	-0,689	0,980	0,678
Taux de reprise en eau réel	-0,573	0,436	0,746	-0,983	0,959	-0,645	0,297

TABLEAU 2.9 – Analyse de Pearson contexture interlock 1 × 1.

Paramètres physiques	R_{ct}	λ	b	R_{et}	W_d	OMMC	I_{mt}
Masse surfacique	0,084	0,279	0,083	0,114	-0,138	-0,395	0,788
Épaisseur	0,109	-0,610	0,738	0,211	-0,240	0,043	0,685
Masse volumique	-0,624	0,230	0,277	0,571	-0,574	-0,763	-0,532
Porosité	-0,245	-0,791	0,915	0,580	-0,611	-0,042	0,138
Perméabilité à l'air	0,636	-0,450	-0,010	0,527	-0,508	0,804	-0,450
Taux de reprise en eau réel	-0,566	-0,611	0,894	0,860	-0,840	-0,363	0,438

TABLEAU 2.10 – Analyse de Pearson contexture jersey.

2.3.1 Influence de la structure sur les propriétés physiques des textiles

La porosité d'un textile est un des paramètres principal influençant les caractéristiques physiques du textile comme la perméabilité à l'air, les propriétés thermiques et hydriques. Dans la plupart des cas, la corrélation entre ce paramètre statique et les autres paramètres dynamiques n'est pas simple. La porosité dépend principalement des paramètres structurels du textile comme les pores, les espaces inter-fils et donc de la densité. Dans notre cas, la perméabilité à l'air des textiles augmente avec la porosité. Selon le type de matière contenue dans les textiles (polyacrylate, viscose, coton et polyester), une diminution de la résistance et de la conductivité thermiques est observée dans ce cas.

Le taux de reprise en eau des textiles est principalement influencé par la nature des fibres composant les mélanges. Ce paramètre augmente avec le taux de fibres hydrophiles créant de nombreuses liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. Les textiles à base de coton ont un taux de reprise en eau supérieur à ceux contenant des fibres hydrophobes (polyester). Les échantillons à base de viscose et de polyacrylate ont des taux de reprise en eau intermédiaires en fonction du pourcentage de fibres hydrophiles contenues dans les tricots.

2.3.2 Propriétés thermophysiques

La conductivité thermique diminue quand la porosité d'un jersey augmente. Les fibres ont une conductivité thermique supérieure à celle de l'air. Un textile poreux emprisonne une quantité d'air importante dans sa structure ce qui en diminue sa conductivité thermique.

L'effusivité thermique, sensation de premier contact thermique, est corrélée positivement avec la masse volumique dans le cas d'un tricot interlock 1×1 . Pour un jersey, la porosité et le taux de reprise en eau influence positivement ce paramètre. Une augmentation de la masse volumique, c'est-à-dire de la quantité de fibres constituant le mélange, engendre une sensation froide au premier touché pour les textiles interlock. Pour un jersey, l'effet similaire est obtenu en augmentant la porosité. Le taux de reprise en eau de ces tricots, ou encore la nature des fibres, influence considérablement ce paramètre. Le premier contact avec des fibres hydrophobes procure une sensation de chaleur alors qu'un textile hydrophile un touché froid.

2.3.3 Transferts statiques thermo-hydriques

Les transferts statiques concernent la mesure des résistances thermiques (R_{ct}) et évaporatives (R_{et}) d'un textile. Le paramètre I_{mt} , rapport entre la résistance thermique et évaporative, évalue la respirabilité d'une étoffe.

Dans le cas d'un interlock 1×1 , la résistance thermique, caractérisant l'isolation d'un tricot, diminue avec l'augmentation de la masse volumique et augmente avec la perméabilité à l'air. La quantité d'air emprisonnée ainsi que la perméabilité à l'air diminuent pour un textile dense en augmentant sa conductivité thermique. La résistance thermique, également définie comme le rapport entre l'épaisseur d'un textile et sa conductivité thermique, diminue lorsque la masse volumique augmente. Un textile est considéré comme isolant lorsqu'une quantité d'air importante est emprisonnée au sein de la structure fibreuse.

La résistance au passage de la vapeur d'eau (R_{et}) dépend de l'épaisseur et du taux de reprise en eau réel. Pour un tricot interlock 1×1 , quand l'épaisseur augmente, la distance entre les deux faces du textiles devient plus importante. Dans ce cas, les molécules de vapeur d'eau traversent avec davantage de difficulté la structure fibreuse. Un textile créant peu de liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau augmente sa résistance évaporative. En effet, un textile interlock, de structure compacte, transporte les molécules d'eau principalement par l'intermédiaire des fibres. Un comportement opposé est observé pour les tricots jersey où un textile hydrophile a tendance à retenir les molécules d'eau au sein de la structure fibreuse. Les molécules de vapeur d'eau sont acheminées principalement à travers les pores pour un tricot jersey.

La respirabilité d'un textile est corrélé positivement à la masse surfacique et à la porosité dans le cas d'un interlock. L'augmentation de la masse surfacique permet d'augmenter le nombre d'espaces vides interfibres et interfils au sein d'un tricot. Dans ce cas, la respirabilité du tricot est plus importante, c'est-à-dire que la résistance au passage de la vapeur d'eau diminue et l'isolation thermique augmente.

2.3.4 Transfert dynamique et gestion hydrique

Le paramètre W_d , caractérisant le transfert dynamique de vapeur d'eau à travers le textile, dépend principalement de l'épaisseur et du taux de reprise en eau réel dans le cas d'un interlock. Quand l'épaisseur du textile augmente, la distance à parcourir

pour les molécules d'eau est plus importante ce qui diminue sa perméabilité à la vapeur d'eau. Ce paramètre est inversement corrélé à la R_{et} du textile définissant la résistance au passage des molécules de vapeur d'eau. Un textile composé de fibres hydrophiles va augmenter le transfert des molécules d'eau à travers celui-ci par diffusion au sein des fibres. Dans le cas d'un textile jersey, plus ouvert, le transfert des molécules d'eau a lieu principalement à travers les pores et faiblement par l'intermédiaire des fibres. Ainsi, un textile jersey hydrophile va retenir les molécules d'eau et ralentir leur transfert vers l'environnement extérieur.

La capacité globale de diffusion d'humidité (OMMC) dépend principalement de la masse volumique et de la perméabilité à l'air. Ce paramètre est calculé à partir du taux d'absorption et de la vitesse de diffusion de la surface inférieure, ainsi que de l'indice de transport d'humidité entre les deux faces du textile. Un textile dense et peu perméable implique une mauvaise gestion de l'humidité liquide. Selon la quantité et la nature des fibres, le transfert de l'eau est retardé vers l'environnement extérieur diminuant le paramètre de transport R et le nombre de molécules d'eau sorbées au niveau de la surface inférieure du textile.

Selon la nature des fibres contenues dans les mélanges fibreux, la gestion hydrique des textiles est différente (tableau de l'annexe B.1).

— Avec polyacrylate

Le temps de mouillure, de la surface supérieure en contact avec l'humidité, est importante pour les textiles PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{87%}-PAC_{7%}-EA_{6%}-J (figure 2.13). La diffusion latérale (SS) et le rayon de mouillure maximum sont moyens (MWR). L'humidité est facilement transférée vers l'environnement extérieur (R important). Pour ces textiles, la capacité globale de gestion de l'humidité (OMMC) est très bonne. Le PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I, contenant 25 % de polyester et 7 % de fibres polyacrylate, a un comportement différent des autres textiles contenant du polyacrylate. Sa surface supérieure est rapidement mouillée avec une diffusion latérale et un rayon de mouillure maximum importants. Le transfert de l'humidité est réalisé plus difficilement (R inférieur aux autres tricots). Le OMMC mesuré est moyen.

— Avec viscose

Les tricots (figure 2.14) avec viscose (PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PAN_{80%}-VI_{14%}-EA_{6%}-J), mouillent leur surface en contact avec l'humidité avec un temps assez long (WT_{Top}) et une faible diffusion latérale (SS_{Top}). Le rayon de mouillure de la surface supérieure (MWR_{Top}) est faible contrairement à celui mesuré à la surface inférieure (MWR_{Bottom}). Les molécules d'eau sont directement transférées au sein de la structure fibreuse et évacuées facilement vers l'extérieur (R important). Les OMMC mesurés sont importants indiquant que la capacité globale de gestion de l'humidité de ces textiles est excellente.

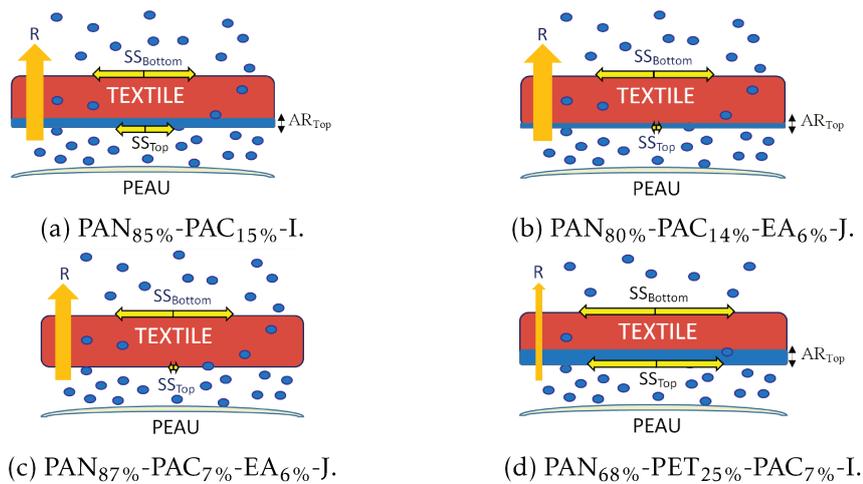


FIGURE 2.13 – Schéma MMT des échantillons avec polyacrylate.

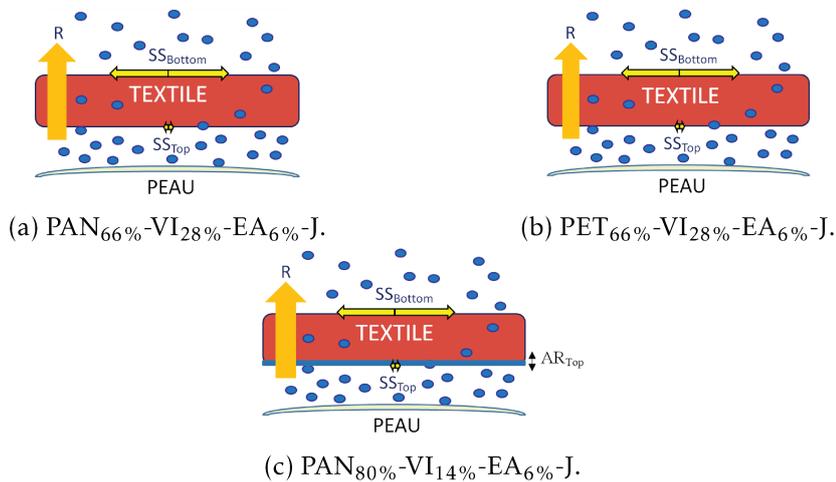


FIGURE 2.14 – Schéma MMT des échantillons avec viscose.

— Avec coton

Les échantillons CO_{100%}-I et CO_{95%}-EA_{5%}-J (figure 2.15) mouillent en peu de temps la surface en contact avec l'humidité (faible WT_{Top}). Leur capacité à emmagasiner l'humidité en surface est importante (AR_{Top}) avec une faible diffusion latérale (SS_{Top}). Le transfert d'humidité au sein de ces tricots est faible voir nul comme pour le CO_{100%}-I où un R négatif est mesuré. L'important WT_{Bottom} mesuré confirme la difficulté du textile à évacuer l'humidité vers l'extérieur. Les tricots à base de coton adsorbent ou absorbent rapidement l'humidité. Les molécules d'eau sont difficilement évacuées vers le milieu extérieur à cause de l'affinité importante des fibres avec ces dernières. Le OMMC mesuré est faible indiquant une mauvaise capacité des textiles à gérer l'humidité liquide.

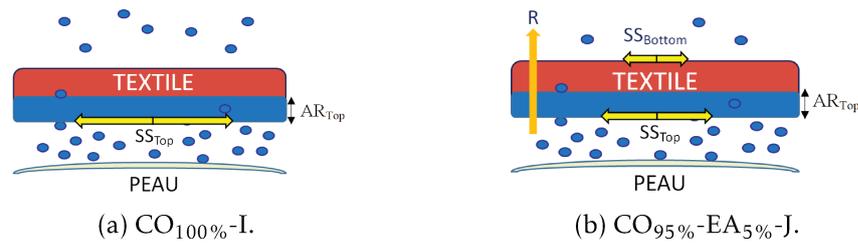


FIGURE 2.15 – Schéma MMT des échantillons avec coton.

— Avec polyester

Les surfaces supérieure et inférieure sont facilement mouillées (WT) pour le PAN_{50%}-PET_{50%}-I et le PET_{95%}-EA_{5%}-J (figure 2.16) avec une vitesse de diffusion latérale importante (SS). Les molécules de vapeur d'eau sont facilement évacuées vers l'extérieur (R moyen). La capacité globale de gestion hydrique de ces textiles est moyenne.

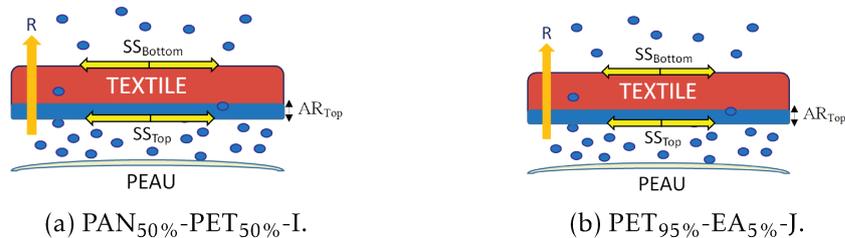


FIGURE 2.16 – Schéma MMT des échantillons avec polyester.

2.3.5 Conclusion

L'analyse de Pearson a permis d'étudier l'influence des propriétés physiques des textiles (interlock 1 × 1, jersey) sur les données thermo-hydriques mesurées. Les propriétés thermiques sont principalement impactées par la masse volumique, la porosité, la perméabilité à l'air et le taux de reprise en eau réel mesuré. L'épaisseur, la masse volumique, la perméabilité à l'air et le taux de reprise en eau influencent les transferts hydriques. L'indice de respirabilité de l'étoffe, caractérisant les transferts thermo-hydriques, dépend de la masse surfacique et de la porosité dans le cas des textiles interlock 1 × 1.

La nature des fibres a un impact important sur les transferts hydriques des matériaux poreux. Les tricots à base de coton créent rapidement des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau en les piégeant au sein de leur structure fibreuse. Cette humidité est difficilement transférée vers l'environnement extérieur. Les textiles contenant une quantité importante de fibres polyester transfèrent facilement l'humidité vers le milieu extérieur avec une diffusion latérale importante. Les tricots à base de viscose acheminent directement l'humidité au sein du textile en mouillant peu la surface supérieure. La capacité de gestion globale de ces textiles est très bonne. Les échantillons à base de

polyacrylate ont un comportement similaire à ceux contenant de la viscose mais en mouillant davantage la surface en contact avec la source d'humidité.

Dans le cas de notre étude, dans le but d'optimiser le confort au porté pour un usage quotidien, les textiles doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- un bon I_{mt} pour un textile respirable ;
- un bon $\frac{\text{Perméabilité à l'air}}{\text{Épaisseur}}$ pour un taux de ventilation idéal ;
- un moyen OMMC pour la gestion de l'eau liquide.

Les échantillons PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I, PAN_{87%}-PAC_{7%}-EA_{6%}-J, PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J vérifient ces critères. Ils permettent d'optimiser le confort au porté.

Bibliographie

- CÉLINO, A et al. (2013). « Characterization and modeling of the moisture diffusion behavior of natural fibers ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 130.1, p. 297-306.
- EICHHORN, S et al. (2009). *Handbook of Textile Fibre Structure : Volume 2 : Natural, Regenerated, inorganic and Specialist Fibres*. Elsevier.
- HATAKEYAMA, T et al. (2012). « Comparison of measurement techniques for the identification of bound water restrained by polymers ». In : *Thermochimica acta* 532, p. 159-163.
- ISO22007-2 (2015). *Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la source plane transitoire (disque chaud)*.
- MAZEAU, K (2015). « The hygroscopic power of amorphous cellulose : a modeling study ». In : *Carbohydrate polymers* 117, p. 585-591.
- PEJIC, BM et al. (2008). « The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers ». In : *Bioresource Technology* 99.15, p. 7152-7159.
- WEIDMANN, D (2010). *Aide-mémoire Textiles techniques*. Dunod.

Évaluation des transferts hydriques quasi-statiques et dynamiques

3.1 Essais quasi-statique par DVS	112
3.1.1 Isothermes de sorption/désorption	112
3.1.1.1 Généralité	112
3.1.1.2 Phénomène d’hystérésis	114
3.1.1.3 Paramètres influençant la sorption/désorption d’eau	116
3.1.2 Modélisation des isothermes	120
3.1.2.1 Modèles de BET et BET modifié	120
3.1.2.2 Modèle de GAB	121
3.1.2.3 Modèle de PEK	122
3.1.2.4 Modèle HH	124
3.1.2.5 Modèle de Young-Nelson	125
3.1.2.6 Modèle de Park	126
3.1.2.7 Autres modèles existants	127
3.1.3 Application aux essais DVS	127
3.1.3.1 Modèles de BET, BET modifié et de GAB	128
3.1.3.2 Modèle de PEK	131
3.1.3.3 Modèle HH	143
3.1.3.4 Modèle de Young-Nelson	146
3.1.3.5 Modèle de Park	149
3.1.3.6 Conclusion	151
3.2 Réalisation d’un banc de mesure, essais en dynamique	154
3.2.1 Construction du banc de mesure	155
3.2.1.1 Réalisation du cadre	155
3.2.1.2 Instrumentation du cadre	156

3.2.2	Protocoles de caractérisation	160
3.2.2.1	Protocole 1 : transfert forcé de la vapeur d'eau . . .	160
3.2.2.2	Protocole 2 : évaporation de l'eau liquide	162
3.2.3	Résultats et interprétation	162
3.2.3.1	Protocole 1	162
3.2.3.2	Protocole 2	173
3.2.4	Conclusion	174
3.3	Conclusion	174

Dans ce chapitre, l'évaluation des transferts hydriques à l'état quasi-statique et dynamique sont évalués par l'intermédiaire respectivement du Dynamic Vapor Sorption (DVS) et du banc de mesure avec cadre.

3.1 Essais quasi-statique par DVS

Les essais quasi-statiques réalisés avec le DVS sont effectués en isotherme à 35 °C (température de la surface cutanée). Les isothermes de sorption/désorption obtenues avec ce test sont par la suite analysées en appliquant les modèles de la littérature. Ces modèles apportent des informations complémentaires sur les mécanismes de sorption/désorption des molécules de vapeur d'eau avec les fibres.

3.1.1 Isothermes de sorption/désorption

3.1.1.1 Généralité

A l'équilibre, l'humidité accumulée dans un matériau dépend de l'humidité relative ambiante. La courbe de sorption du matériau, caractérise sa capacité à prendre ou à désorber de l'humidité. La variation de la teneur en eau du matériau en fonction de l'humidité est caractérisée par deux isothermes.

- Isotherme de sorption, le matériau est placé dans une ambiance où l'humidité augmente. La teneur en eau de celui-ci va également évoluer dans le même sens.
- Isotherme de désorption, si l'humidité relative diminue la teneur en eau du matériau va également diminuer.

Les isothermes de sorption (figure 3.1) sont classées selon l'allure des courbes avec la coexistence de six formes (PAN et GIBSON 2006; SAHA et GRAPPE 2017; ISSAADI 2015; AL-MUHTASEB, McMINN et MAGEE 2002; BRUNAUER, EMMETT et TELLER 1938; DONNARUMMA et al. 2015; SING 1985; SANGWICHEN, ARANOVICH et DONOHUE 2002).

- L'allure de l'isotherme de type I est caractérisée par une évolution horizontale lorsque l'humidité relative augmente considérablement; le matériau est rapidement saturé. Cette isotherme s'applique pour des matériaux poreux composés principalement de micropores se remplissant à des pressions basses.
- La sorption des matériaux poreux et macroporeux augmente progressivement pour les isothermes de type II et III; celle-ci est multimoléculaire.

- Les courbes des isothermes de type IV et V ont la même allure que les isothermes de type II et III pour de faibles humidités relatives. Elles présentent un plateau de saturation dans les régions à haute humidité et un phénomène d'hystérésis. Ces isothermes sont obtenues pour les matériaux mésoporeux dans lesquels se produisent une condensation capillaire.
- La sorption de l'isotherme de type VI est réalisée par couches successives. Le passage d'une couche à une autre est caractérisé par un point d'inflexion de la courbe de sorption. Le matériau est non poreux.

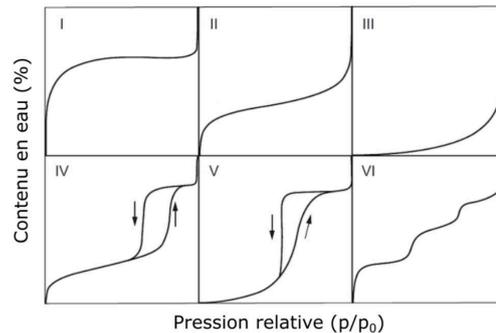


FIGURE 3.1 – Forme des isothermes de sorption (adaptée de SANGWICHEN, ARANOVICH et DONOHUE 2002).

D'après la figure 3.2, trois grands domaines peuvent être distingués (ABELÉ et al. 2009; BHOURI, BENNASRALLAH et PERRE 2012; FOURMENTIN 2015; MCHIRGUI 2012; PAN et GIBSON 2006; ROSE 1963; YANNIOTIS et BLAHOVEC 2009).

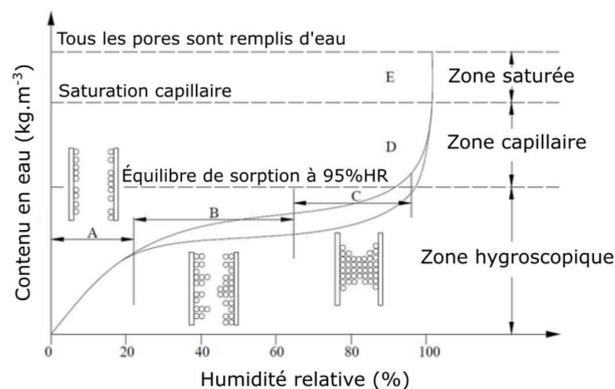


FIGURE 3.2 – Isothermes de sorption/désorption (adaptée de ISSAADI 2015).

Domaine hygroscopique

Le domaine est découpé en trois régions principales A, B et C. Dans la région A, les molécules s'adsorbent à la surface du matériau jusqu'à remplir tous les sites et former

une monocouche de molécules d'eau à la surface du matériau. L'eau est fortement liée avec les fibres par des liaisons directes (énergie d'interaction forte). Dans la région B, tous les sites actifs du matériau étant saturés, les molécules d'eau s'adsorbent au-dessus de la monocouche d'eau existante pour former une multicouche. L'énergie d'interaction des molécules d'eau entre elles, comparée à celle avec la fibre, est plus faible et facile à casser. Au niveau de la zone C, les couches d'eau s'accumulent jusqu'à se rejoindre et former un pont capillaire entre elles. Petit à petit, l'eau remplit les microporosités par condensation capillaire puis les macroporosités.

Domaine capillaire

Dans la région D, au-delà de 95 %HR, l'eau liquide occupe la majorité de l'espace poral, des poches non remplies subsistent où la vapeur peut encore circuler. Le matériau emmagasine l'humidité jusqu'à atteindre la saturation capillaire.

Domaine saturé

Dans la région E, les petites poches résiduelles disparaissent au sein du matériau pour atteindre la saturation maximale. Le transfert d'air à travers le matériau ne sera plus possible. Lors de la désorption, l'eau sortant de la structure fibreuse n'est pas évacuée de manière similaire que lors du processus de sorption. Cette différence de quantité d'eau prise entre la sorption et la désorption est appelée « hystérésis ».

3.1.1.2 Phénomène d'hystérésis

Selon la figure 3.2, l'allure des isothermes de sorption et de désorption ne sont pas similaires. Une différence de prise en eau est observée au sein du matériau poreux. Cette différence observée est appelée phénomène d'hystérésis. Il peut être causé par la forme en « bouteille d'encre » des pores constituant le textile, la modification de l'angle de contact entre la fibre et l'eau, et le gonflement de la fibre. L'hystérésis est calculé selon l'équation 3.1.

$$H_{yst} = \frac{M_{desorp} - M_{sorp}}{M_{sorp}} \quad (3.1)$$

Avec H_{yst} l'hystérésis (%), M_{sorp} la quantité d'eau totale prise en sorption (%), M_{desorp} la quantité d'eau totale prise en désorption (%).

Forme en « bouteille d'encre » des pores

La forme particulière de certains pores en « bouteille d'encre » influence l'hystérésis. Le pore de la figure 3.3a est initialement rempli d'eau. Lors du processus de désorption, les pressions capillaires augmentent progressivement de $P_c(r_5)$ à $P_c(r_4)$ (figure 3.3b). Au début, l'ouverture étroite du pore de rayon r_0 ne permet pas à l'humidité d'être transportée dans le milieu ambiant pour les pressions $P_c(r_5)$, $P_c(r_3)$ et $P_c(r_1)$ qui sont potentiellement capable d'évacuer l'eau contenu dans leur compartiment. Une fois que

la pression est supérieure à $P_c(r_0)$, l'équilibre des pressions au niveau du ménisque r_0 n'est plus possible et dans ce cas l'humidité présente au niveau de r_0 et de r_1 est évacuée. Le même processus a lieu quand la pression capillaire dépasse $P_c(r_2)$ et $P_c(r_4)$. Durant le processus de sorption, les zones de rayon r_4 , r_2 , r_0 , r_3 et r_5 se remplissent. La désorption est davantage influencée par l'ouverture étroite des gorges du pore tandis que le processus de sorption dépend principalement de la forme de ce dernier (DAIAN 1986; DUFORESTEL 1992; EL-CHAKAR 1994; ZHANG 2014).

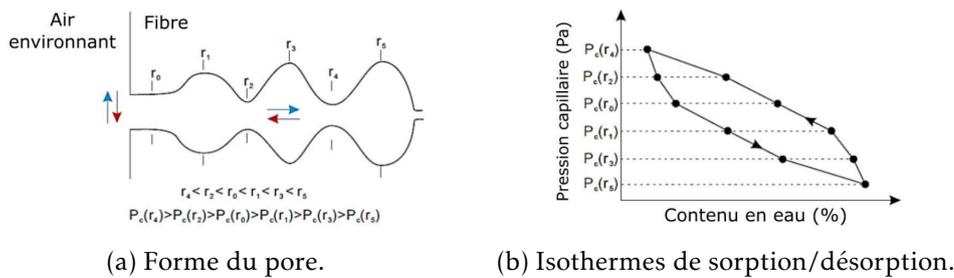


FIGURE 3.3 – Pore en forme de bouteille d'encre (adaptée de ZHANG 2014).

Angle de contact fibre/eau

une autre cause de l'hystérésis est l'influence de l'angle de contact (figure 3.4). Des impuretés présentes dans les pores peuvent faciliter ou rendre plus difficile le transfert de l'humidité. Par ailleurs, un matériau pré-mouillé va facilement accepter des molécules d'eau contrairement à un matériau sec à cause d'une différence d'énergie d'interaction entre les molécules (ZHANG 2014).

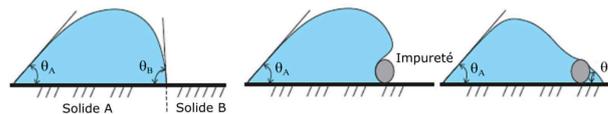


FIGURE 3.4 – Modification de l'angle de contact par une impureté (adaptée de ZHANG 2014).

Par ailleurs, l'angle de contact entre la surface et le liquide peut être influencé par la porosité du solide, des régions amorphes et cristallines. La phase liquide peut admettre un angle d'avancé θ_A (supérieur à la position d'équilibre) avec la phase solide ou un angle de recul θ_R (inférieur à la position d'équilibre) avec une adsorption d'eau plus importante. La modification de cet angle de contact peut avoir lieu au sein d'un pore (figure 3.5a) ou à la surface de la fibre (figure 3.5b) (PAN et GIBSON 2006; HEARLE et MORTON 2008).

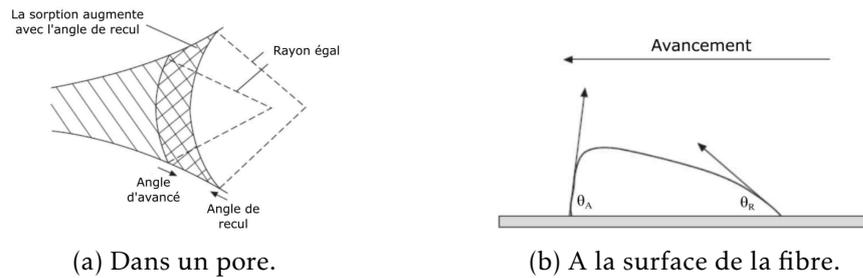


FIGURE 3.5 – Modification de l'angle de contact en fonction du type de surface (adaptée de PAN et GIBSON 2006).

Gonflement de la fibre

Dans les régions non-cristallines, les macromolécules du polymère sont maintenues ensemble par des liaisons secondaires diminuant la quantité d'humidité absorbée et le nombre de sites actifs disponibles pour l'eau. Quand le phénomène de sorption s'amplifie, les interactions macromolécules/macromolécules sont remplacées par des interactions macromolécules/eau (figure 3.6). Quand l'eau s'évapore du textile, les liaisons macromolécules/macromolécules se recréent. Le phénomène d'hystérésis est alors la conséquence d'un changement structural au sein du textile causé par l'interaction de la fibre avec l'eau (HEARLE et MORTON 2008). Dans ce cas, l'eau est absorbée par la fibre en migrant au sein de celle-ci. Le terme absorption n'est pas équivalent au terme adsorption. Lors du phénomène d'adsorption, la fixation de l'eau est réalisée à la surface de la fibre (ZHANG 2014; BEN AMAR 1998). Le gonflement de la fibre peut être transversal et axial. Quand les fibres gonflent, la dimension des pores diminue jusqu'à se refermer et bloquer le passage de l'eau.

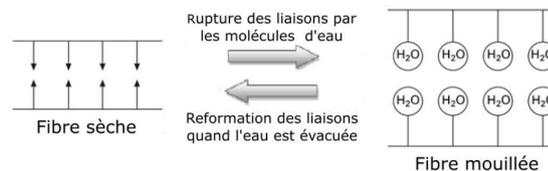


FIGURE 3.6 – Gonflement de la fibre (adaptée de PAN et GIBSON 2006).

3.1.1.3 Paramètres influençant la sorption/désorption d'eau

Différents paramètres peuvent influencer la quantité d'eau prise par la fibre lors de la sorption et de la désorption comme la température, la chaleur de sorption produite lorsqu'une molécule d'eau entre en contact avec la fibre, la structure du textile, l'application d'un effort mécanique et la masse surfacique.

Température

L'adsorption d'eau dans un matériau est considérablement influencée par la température.

En effet, quand la température augmente, la mobilité des molécules d'eau évolue dans le même sens, ce qui diminue leur adsorption sur le matériau (BHOURI, BENNASRALLAH et PERRE 2012; DONNARUMMA et al. 2015). Donnarumma et al. ont étudié l'influence de la température sur la sorption de vapeur d'eau dans le cas du coton à 25 °C, 40 °C et 60 °C. La quantité d'eau prise par le coton diminue lorsque la température augmente. De même, Derbel observe le même phénomène (DERBEL 1990). Lorsque la température augmente les molécules d'eau sont davantage mobiles et la probabilité de former des liaisons entre les sites de sorption de la fibre et les molécules d'eau diminuent (figure 3.7).

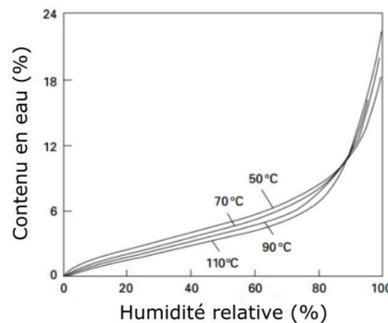


FIGURE 3.7 – Influence de la température sur la sorption/désorption en eau dans le cas du coton (adaptée de URQUHART et A. WILLIAMS 1924).

Chaleur de sorption

Quand une fibre entre en contact avec les molécules d'eau, de la chaleur est dégagée lors de la sorption. Cette chaleur de sorption résulte des forces attractives entre les molécules de la fibre et celles de l'eau. Deux types de chaleur existent, i.e., la chaleur d'adsorption et de mouillage (PAN et GIBSON 2006; DERBEL 1990).

- Chaleur d'adsorption

Elle est obtenue quand un gramme d'eau est adsorbé par une masse de fibre à un taux de reprise donné, exprimé par gramme d'eau adsorbée. L'eau est adsorbée sous forme de vapeur (Q_v) ou absorbée sous forme de liquide (Q_l ou chaleur de gonflement) d'après la figure 3.8. D'après la première loi de la thermodynamique, ce paramètre est calculé suivant l'équation 3.2.

$$Q_v = Q_l + L_c \quad (3.2)$$

Avec Q_v la chaleur de l'eau absorbée sous forme vapeur ($J.g^{-1}$), Q_l la chaleur de l'eau absorbée sous forme liquide ($J.g^{-1}$), L_c la chaleur latente de condensation de l'eau ($J.g^{-1}$). Cette chaleur de sorption est maximale quand le taux de reprise est nul. Le tableau 3.1 représente la chaleur d'adsorption pour différentes fibres à différents taux d'humidité.

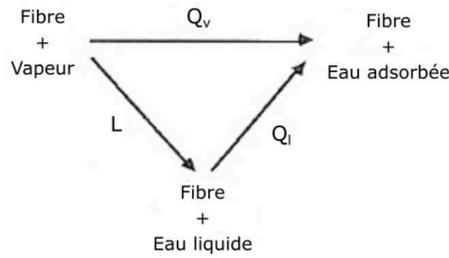


FIGURE 3.8 – Chaleur d’adsorption (adaptée de DERBEL 1990).

Taux d’humidité (%)	0	15	30	45	60	75
Coton	1,24	0,50	0,39	0,32	0,29	
Viscose	1,17	0,55	0,46	0,39	0,32	0,24
Nylon	1,05	0,75	0,55	0,42		

TABLEAU 3.1 – Chaleur d’adsorption de différentes fibres.

- Chaleur de mouillage

Ce paramètre correspond à la chaleur dégagée quand un échantillon de fibre, à un taux de reprise donné dont la masse sèche est de 1 g, est complètement mouillé. De même que pour la chaleur d’adsorption, ce paramètre diminue quand le taux de reprise augmente. En effet, quand le taux de reprise augmente l’eau est moins liée à la fibre et par conséquent la chaleur produite diminue. Une évolution d’humidité de dr provoque une élévation de $\frac{Q_l \times dr}{100}$ (figure 3.9).

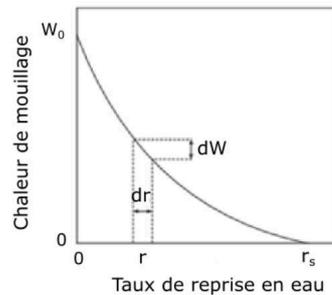


FIGURE 3.9 – Variation de la chaleur de mouillage en fonction du taux de reprise en eau (adaptée de DERBEL 1990).

En intégrant cette dernière valeur en partant d’un taux de reprise r à un taux de reprise de saturation r_s , la chaleur de mouillage est définie selon l’équation 3.3.

$$W_c = \int_r^{r_s} \frac{Q_l \times dr}{100} \tag{3.3}$$

Avec W_c la chaleur de mouillage ($J.g^{-1}$), Q_l la chaleur de l'eau absorbée sous forme liquide ($J.g^{-1}$). Le tableau 3.2 donne des valeurs de chaleur de mouillage pour différentes fibres. La capacité de la fibre à dégager de la chaleur lorsqu'elle adsorbe de l'eau permet au corps de s'adapter aux nouvelles conditions. En effet, en passant d'une ambiance à 18 °C, 45 %HR à une autre de 5 °C et 95 %HR, le taux de reprise de la laine passe de 10 à 27 %, ce qui permet de produire 150 000 calories pour un vêtement pesant 1,5 kg de laine. Le tableau 3.3 présente pour différentes fibres la chaleur produite par 1 kg de matériau passant d'un environnement avec une humidité de 40 % à 70 %HR.

Fibre	W_c ($kJ.g^{-1}$)	Q_l ($J.g^{-1}$)
Coton	41-54	1,33
Viscose	84-105	1,22

TABLEAU 3.2 – Chaleur de mouillage pour différentes fibres.

Fibre	Chaleur produite (kJ)
Coton	84
Viscose	167
Nylon	42

TABLEAU 3.3 – Chaleur produite par 1 kg de matière pour différentes fibres.

Structure du textile

Bhourri et al. ont étudié l'influence de la surface spécifique de contact entre un tricot jersey et un fil de coton (BHOURI, BENNASRALLAH et PERRE 2012). Les deux échantillons ont le même comportement jusqu'à HR >70 %, au-delà le fil adsorbe plus d'eau que le tricot. Quand le fil absorbe de l'humidité, la fibre gonfle et suite à la création de tensions internes, cela engendre le gonflement global de celle-ci. En intégrant ce même fil dans une structure jersey, sa capacité d'adsorption va maintenant dépendre de la structure géométrique et de l'état de relaxation du tricot. Quand l'humidité diminue, le fil rétrécit et le jersey se relâche. Ainsi, la géométrie de la structure fibreuse ou la surface spécifique de contact du tricot influence sa capacité à emmagasiner de l'humidité.

Effort mécanique

L'application d'une tension mécanique sur les fibres augmente leur capacité à stocker de l'humidité (HEARLE et MORTON 2008 ; TRELOAR 1952). L'augmentation du taux de reprise en eau de la cellulose est représentée en fonction de l'effort appliqué selon le tableau 3.4. Une compression latérale des fibres diminue également leur teneur en eau dans une ambiance donnée (NICKERSON 1954).

Effort appliqué (MPa)	Augmentation de la reprise en eau (%)
5,7	0,2
10,2	0,4
13,6	0,6
27,4	1,5
40,5	1,1

TABLEAU 3.4 – Influence de l'application d'un effort mécanique axial sur la cellulose.

Masse volumique

La masse volumique de la fibre diminue quand la quantité d'eau retenue augmente. Ceci peut être causé par le gonflement de la fibre lorsqu'elle absorbe de l'eau ou à l'écartement des chaînes macromoléculaires (figure 3.10) (DERBEL 1990 ; BEN AMAR 1998).

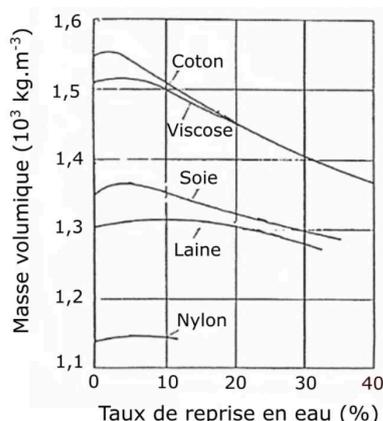


FIGURE 3.10 – Influence du taux d'humidité sur la masse volumique (DERBEL 1990).

3.1.2 Modélisation des isothermes

Différents modèles de la littérature permettent de modéliser les isothermes de sorption et de désorption tels que les modèles de Brunauer-Emmet-Teller (BET), BET modifié, Guggenheim-Anderson-Boer (GAB), Parallel Exponential Kinetics (PEK), Hailwood-Horrobin (HH), Young-Nelson, et le modèle de Park. Ces modèles apportent des informations sur les mécanismes de sorption et de désorption.

3.1.2.1 Modèles de BET et BET modifié

Le modèle BET (BRUNAUER, EMMETT et TELLER 1938) est utilisé pour l'interprétation des isothermes de sorption pour des activités de l'eau comprises entre $0 < a_w < 0,35$. L'activité de l'eau est définie comme le rapport entre la pression de vapeur de l'eau dans un matériau sur la pression de vapeur de l'eau pure à la même température. Ce modèle fournit une estimation de la quantité d'eau adsorbée ou désorbée en monocouche

(molécules d'eau en contact directs avec le polymère) à la surface des matériaux. La théorie de ce modèle prévoit que l'épaisseur du film liquide sur la paroi solide n'est pas uniforme mais suit une loi d'empilement des couches de molécules liquides, où les couches les plus éloignées de la phase solide contiennent le moins de molécules d'eau. La théorie de ce modèle repose sur trois hypothèses, i.e., (i) le taux de condensation des molécules d'eau se posant sur la paroi fibreuse est égal au taux d'évaporation des molécules d'eau s'en détachant $N_{\text{condensation}} = N_{\text{évaporation}}$ (figure 3.11), (ii) l'énergie de liaison des molécules d'eau sur la première couche est égale, (iii) la chaleur d'adsorption dans toutes les couches autres que la première est égale à la chaleur de vaporisation de l'eau telle que E_l (chaleur molaire d'adsorption d'une couche d'eau adsorbée autre que la première) = E_L (chaleur molaire latente de vaporisation de l'eau). Ce modèle est exprimé selon l'équation 3.4.

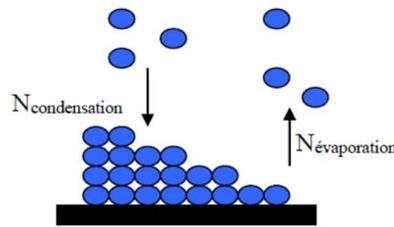


FIGURE 3.11 – Modèle de BET (LELIÉVRE 2015).

$$M = \frac{M_0 \times C_e \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 + (C_e - 1) \times a_w)} \quad (3.4)$$

Avec M la quantité d'eau totale ($\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{solide}}^{-1} \cdot \text{sec}$), M_0 la quantité d'eau adsorbée en monocouche ($\text{kg} \cdot \text{kg}_{\text{solide}}^{-1} \cdot \text{sec}$), a_w l'activité de l'eau, C_e la constante d'énergie liée à la différence d'enthalpie libre (potentiel chimique standard) des molécules d'eau à l'état liquide pur et en monocouche (TIMMERMANN 2003).

Aguerre et al. (AGUERRE, SUAREZ et VIOLLAZ 1989) ont défini un modèle dérivé du modèle de BET s'appliquant à une plus large activité de l'eau ($0 < a_w < 0,75$). Elle est dérivée de l'hypothèse que la chaleur de sorption varie avec l'ordre des couches de molécules d'eau sorbées. Le modèle de BET modifié est défini selon l'équation 3.5.

$$M = \frac{M_0 \times C_e \times a_w}{(1 - a_w) \times (1 - C_e \times \ln(1 - a_w))} \quad (3.5)$$

3.1.2.2 Modèle de GAB

Le modèle de GAB (VAN DEN BERG 1984) est décrit selon l'équation 3.6 pour des activités de l'eau comprises entre $0 < a_w < 0,95$. Il s'agit d'une extension de la théorie du modèle BET avec une hypothèse supplémentaire qui stipule que les chaleurs d'ad-

sorption, des molécules d'eau au niveau de la deuxième et des couches supérieures, sont égales mais différentes de celles à l'état liquide. Un paramètre supplémentaire K est introduit dans ce modèle. Le niveau d'énergie des interactions entre les molécules d'eau adsorbées en multicouche est différent de celles en contact direct avec le polymère (monocouche) et les molécules à l'état liquide. Lorsque $K=1$, l'équation de GAB redevient celle de BET.

$$M = \frac{M_0 \times C_e \times K \times a_w}{(1 - K \times a_w) \times (1 + (C_e - 1) \times K \times a_w)} \quad (3.6)$$

Avec M la quantité d'eau totale ($\text{kg.kg}_{\text{solide}}^{-1} \text{sec}$), M_0 la quantité d'eau adsorbée en monocouche ($\text{kg.kg}_{\text{solide}}^{-1}$), C_e et K sont respectivement les constantes liées aux énergies d'interaction entre la première et les autres molécules d'eau. C_e et K sont respectivement définis selon les équations 3.7 et 3.8.

$$C_e = c_0 \times e^{\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right)} \quad (3.7)$$

$$K = k_0 \times e^{\left(\frac{H_l - H_n}{RgzT}\right)} \quad (3.8)$$

Avec C_e la constante d'énergie liée à la différence d'enthalpie libre, K la constante liée aux énergies d'interactions entre les molécules d'eau, c_0 et k_0 les facteurs entropiques, H_m l'enthalpie de sorption molaire en monocouche (kJ.mol^{-1}), H_n l'enthalpie de sorption molaire en multicouche et H_l l'enthalpie de sorption molaire à l'état liquide (kJ.mol^{-1}), R_{gz} la constante des gaz parfait ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et T la température (K).

3.1.2.3 Modèle de PEK

Ce modèle s'applique pour des humidités comprises entre 0 et 98 %HR (ou pour des activités de l'eau comprises entre 0 et 0,98) dans le cas où la vitesse de diffusion est plus rapide que la vitesse de déformation de la structure fibreuse. Ce modèle est défini selon l'équation 3.9 (HILL et al. 2011 ; KACHRIMANIS et al. 2006).

$$MC_{t,\%HR_i} = MC_{1,\%HR_i} \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + MC_{2,\%HR_i} \times (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3.9)$$

Avec $MC_{t,\%HR_i}$ la quantité d'eau totale prise au temps t exprimé en min (%), MC_1 la quantité d'eau prise selon le procédé rapide (%) et MC_2 la quantité d'eau prise selon le procédé lent (%).

Deux termes en exponentiels composent l'équation 3.9, le premier comporte les para-

mètres (MC_1, t_1) et le second (MC_2, t_2). Ils représentent respectivement les mécanismes de sorption/désorption dits « rapide » et « lent ». Le paramètre EMC est défini comme la somme de MC_1 et MC_2 à chaque palier d'humidité. Ces deux procédés diffèrent par le type de sites de sorption ou de désorption utilisé dans la structure textile. Les molécules d'eau peuvent créer une liaison directe ou indirecte avec les groupes hydroxyles présents à la surface des fibres. La sorption/désorption directe des molécules d'eau est possible sur la surface externe, les régions amorphes et la surface interne des pores et des cristallites (OKUBAYASHI, GRIESSER et BECHTOLD 2004). La sorption/désorption indirecte de l'humidité concerne les molécules d'eau supplémentaire liées aux précédentes. Ainsi, le processus rapide est associé à la sorption/désorption des molécules d'eau sur les sites facilement accessibles comme la surface externe de la fibre et les régions amorphes. Le processus lent concerne les sites présents à la surface interne du textile et les surfaces des cristallites difficilement accessibles par les molécules d'eau (CAS HILL, NEWMAN et NORTON 2010; KACHRIMANIS et al. 2006; POPESCU et CAS HILL 2013; POPESCU, CAS HILL, CURLING et al. 2014; POPESCU, CAS HILL et KENNEDY 2016).

Les deux composants du modèle de PEK sont associés à la réponse dynamique de deux éléments issus du modèle de Kelvin-voigt (équation 3.10) soumis à une contrainte σ_0 appliquée au sein de la structure fibreuse.

$$\varepsilon'(t) = \frac{\sigma_0}{E} \times (1 - e^{-\frac{t}{\varphi}}) \quad (3.10)$$

Avec ε' la contrainte au temps t (GPa), E le module élastique (GPa), σ_0 la contrainte appliquée au sein de la structure fibreuse (GPa), φ le temps définie selon l'équation 3.11.

$$\varphi = \frac{\eta}{E} \quad (3.11)$$

Par analogie entre le modèle de PEK et de Kelvin-Voigt, le paramètre φ peut être associé au temps t défini selon les équations 3.12 et 3.13.

$$t_1 = \frac{\eta_1}{E_1} \quad (3.12)$$

$$t_2 = \frac{\eta_2}{E_2} \quad (3.13)$$

Avec t_1 le temps caractéristique du procédé rapide et t_2 le temps caractéristique du procédé lent (s), η_1 le module de viscosité du procédé rapide et η_2 le module de viscosité du procédé lent (GPa.s), E_1 et E_2 les modules d'élasticité associés aux procédés rapide et lent (GPa).

La contrainte du système est associée à la modification du volume de la structure fibreuse quand les molécules d'eau entre en contact avec le textile en exerçant une

pression au sein de celui-ci. Cette modification est représentée par l'extension du ressort du modèle de Kelvin-voigt (ORMONDROYD et al. 2017 ; CAS HILL, KEATING et al. 2012). Ainsi, le module du ressort est associé à la quantité d'eau de la structure textile au temps t (équations 3.14 et 3.15).

$$MC_1 = \frac{\sigma_0}{E_1} \quad (3.14)$$

$$MC_2 = \frac{\sigma_0}{E_2} \quad (3.15)$$

Avec MC_1 et MC_2 les quantités en eau prises respectivement selon les procédés rapide et lent (%), t_1 et t_2 les temps caractéristiques associés aux processus rapide et lent (s), E_1 le module élastique du procédé rapide (GPa), E_2 le module élastique du procédé lent (GPa), σ_0 la contrainte appliquée au sein de la structure fibreuse (GPa).

Les paramètres MC_1 et MC_2 utilisés pour tracer les courbes de sorption/désorption sont définis selon les équations 3.16 et 3.17. Ils sont déterminés en sommant les éléments calculés à chaque palier d'humidité de 0 à 98 %HR.

$$MC_1 = \sum_{i=0}^{98} MC_{1, \%HR_i} \quad (3.16)$$

$$MC_2 = \sum_{i=0}^{98} MC_{2, \%HR_i} \quad (3.17)$$

3.1.2.4 Modèle HH

Ce modèle, décrit dans la littérature (CEYLAN, GOUBET et DE CLERCK 2014; CAS HILL, NORTON et NEWMAN 2009; CAS HILL, NEWMAN et NORTON 2010; JALALUDIN et al. 2010; ZAIHAN, CAS HILL et al. 2009) distingue deux mécanismes de sorption des molécules de vapeur d'eau au niveau de la structure fibreuse (équation 3.18), monocouche (M_h) et multicouche (M_s). La sorption monocouche concerne la sorption directe des molécules d'eau à la surface du textile et dans les pores, une seule couche de molécules est formée. La sorption multicouche concerne les autres molécules d'eau s'adsorbant au-dessus des premières déjà placées à la surface du textile et dans les pores. Ce terme correspond à un empilement de plusieurs couches de molécules de vapeur d'eau les unes sur les autres.

$$M = M_h + M_s = \frac{1800}{W} \times \frac{K_1 \times K_2 \times HR}{100 + K_1 \times K_2 \times HR} + \frac{1800}{W} \times \frac{K_2 \times HR}{100 - K_2 \times HR} \quad (3.18)$$

Avec M la quantité d'eau totale (%), M_h la quantité d'eau prise en monocouche (%), M_s la quantité d'eau prise en multicouche (%), W la nombre de sites de sorption libre au

sein de la matrice fibreuse, K_1 la constante d'équilibre de la monocouche, K_2 la constante d'équilibre entre l'eau sous forme vapeur et liquide.

Les valeurs K_1 et K_2 sont déterminées en traçant le rapport $\frac{HR}{M}$ en fonction de l'humidité H . La relation parabolique résultante est définie selon l'équation 3.19.

$$\frac{HR}{M} = A + B \times HR - C \times HR^2 \quad (3.19)$$

Avec A , B et C les constantes de l'équation parabolique; les paramètres K_1 , K_2 , W , A , B et C sont liées selon les équations 3.20 à 3.25.

$$A = \frac{W}{18} \times \frac{1}{K_2 \times (K_1 + 1)} \quad (3.20)$$

$$B = \frac{W}{1800} \times \frac{K_1 - 1}{K_1 + 1} \quad (3.21)$$

$$C = \frac{W}{180000} \times \frac{K_1 \times K_2}{K_1 + 1} \quad (3.22)$$

$$K_1 = 1 + \frac{B^2 + B \times \sqrt{B^2 + 4 \times A \times C}}{2 \times A \times C} \quad (3.23)$$

$$K_2 = \frac{50 \times (-B + \sqrt{B^2 + 4 \times A \times C})}{A} \quad (3.24)$$

$$W = 1800 \times \sqrt{B^2 + 4 \times A \times C} \quad (3.25)$$

3.1.2.5 Modèle de Young-Nelson

Ce modèle dissocie trois mécanismes différents de sorption/désorption des molécules d'eau sur le textile (KACHRIMANIS et al. 2006; YOUNG et NELSON 1967) : les molécules d'eau fortement liées à la fibre en formant une monocouche, l'humidité prise à l'extérieur et à l'intérieur de la structure fibreuse. Ce modèle est décrit selon les équations de 3.26 à 3.31.

$$\theta_f = \frac{HR}{HR + (1 - HR) \times E} \quad (3.26)$$

$$E = e^{\frac{q_L - q_I}{k_B \times T_e}} \quad (3.27)$$

$$\psi_f = HR \times \theta_f \quad (3.28)$$

$$\beta = -\frac{E \times HR}{E - (E - 1) \times HR} + \frac{E^2}{E - 1} \times \log\left(\frac{E - (E - 1) \times HR}{E}\right) - (E + 1) \times \log(1 - HR) \quad (3.29)$$

$$M_{sorp} = A \times (\theta_f + \beta) + B \times \psi_f \quad (3.30)$$

$$M_{desorp} = A \times (\theta_f + \beta) + B \times \theta_f \times HR_{max} \quad (3.31)$$

Avec M_{sorp} la quantité d'eau totale prise en sorption et M_{desorp} la quantité d'eau totale prise en désorption (%), θ_f la fraction de la quantité totale d'eau prise en monocouche, q_I la chaleur de sorption des molécules d'eau liées à la surface fibreuse (J.mol^{-1}), k_B la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T_e la température des conditions expérimentales (K), ψ_f la fraction de surface couverte par une ou plusieurs couches de molécules d'eau en épaisseur, β la fraction d'humidité totale prise en multicouche, HR_{max} la quantité d'eau prise à l'humidité relative maximale auquel le matériau textile est soumis (%).

Par ailleurs, le produit $A \times \theta_f$ définit la quantité d'eau prise en monocouche, $A \times (\theta_f + \beta)$ la quantité d'eau prise à l'extérieur de la structure fibreuse, $B \times \psi_f$ correspond à la quantité d'eau prise à l'intérieur du matériau. La quantité totale d'eau retenue par le textile est obtenue en additionnant les quantités d'eau prises à l'extérieur et à l'intérieur de celui-ci.

3.1.2.6 Modèle de Park

Ce modèle, utilisé dans la littérature pour décrire la sorption et la désorption en vapeur d'eau des textiles, décrit trois mécanismes (BESSADOK et al. 2007 ; ALIX et al. 2014 ; FOLLAIN et al. 2016 ; MURAILLE et al. 2015). Le premier terme de l'équation 3.32 concerne la sorption de Langmuir pour les activités de l'eau inférieures à 0,1. Les molécules d'eau créent des liaisons à la surface de la fibre sur les sites disponibles. Le second terme de l'équation est représentatif de la sorption entre $0,1 \leq a_w \leq 0,7$ (équation d'Henry). La quantité d'eau emmagasinée au sein du matériau augmente linéairement avec l'activité de l'eau. A haute humidité ($a_w \geq 0,8$), le dernier terme concerne la formation d'agrégats

de molécules d'eau au sein du textile.

$$C_w = \frac{A_L \times B_L \times a_w}{1 + B_L \times a_w} + K_H \times a_w + K_a \times a_w^n \quad (3.32)$$

Avec C_w la quantité totale d'eau, A_L la concentration du nombre de sites de sorption comme les groupes hydroxyles présent à la surface de la fibre (Constante de Langmuir), B_L la constante d'affinité de Langmuir caractérisant l'affinité des molécules d'eau pour les sites spécifiques de sorption, K_H la constante de solubilité de Henry liée à la pente de l'isotherme de sorption, K_a la constante d'équilibre des agrégats des molécules d'eau, n le nombre moyen de molécules d'eau par agrégat.

3.1.2.7 Autres modèles existants

D'autres modèles sont décrits dans la littérature pour modéliser les isothermes de sorption et de désorption tels que les modèles de Bradley (BRADLEY 1936), Caurie (CAURIE 1970), Chen (C. CHEN et CLAYTON 1971), Chung et Pfof (CHUNG et PFOF 1967), Day et Nelson (DAY et NELSON 1965), Freundlich (FREUNDLICH et HATFIELD 1926), Halsey (HALSEY 1948), Harkins et Jura (HARKINS et JURA 1944), Henderson (HENDERSON 1952), Iglesias et Cherife (IGLESIAS 1981), Kuhn (KÜHN 1967), Mizrahi (MIZRAHI, LABUZA et KAREL 1970), Oswin (OSWIN 1946), Peleg (PELEG 1993) et Smith (SMITH 1947). Ils apportent peu d'informations sur les mécanismes de sorption ou de désorption des molécules d'eau au sein de la structure fibreuse. Ainsi, ces modèles ne sont pas étudiés dans la suite de l'étude.

3.1.3 Application aux essais DVS

Les textiles CO_{95%}-EA_{5%}-J, PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I, PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PAN_{85%}-VI_{15%}-F et PAN_{50%}-PET_{50%}-I sont testés suivant DVS (tableau 3.5). Ce dispositif permet de mesurer la sorption et la désorption en vapeur d'eau d'un échantillon textile lorsque celui-ci est soumis à différents taux d'humidité. Les courbes de sorption et de désorption des essais obtenus en DVS sont modélisées au moyen du logiciel OriginPro 9.0. Pour le modèle de PEK la fonction Exponential Association function (ExpAssoc) est utilisée. Le module E représente l'écart entre les données issues du DVS à celles obtenues avec un modèle. Ce paramètre est défini selon l'équation 3.33. Une valeur inférieure à 10 % indique que le modèle utilisé suit correctement les données expérimentales (PENG et al. 2007).

$$E\% = \frac{100}{N} \times \sum_{i=0}^N \frac{|m_i - m_{pi}|}{m_i} \quad (3.33)$$

Avec E% le module d'écart moyen (%), N le nombre de données expérimentales, m_i les valeurs expérimentales, m_{pi} les valeurs prédites par les modèles.

Nom de l'échantillon	Détail composition
CO _{95%} -EA _{5%} -J	95 % Coton, 5 % Élasthanne
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	85 % Acrylique, 15 % Polyacrylate
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	80 % Acrylique, 14 % Polyacrylate, 6 % Élasthanne
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	66 % Acrylique, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	66 % Polyester, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	85 % Acrylique, 15 % Viscose
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	50 % Acrylique, 50 % Polyester

TABLEAU 3.5 – Composition des échantillons textiles étudiés en DVS.

3.1.3.1 Modèles de BET, BET modifié et de GAB

Les données M_0 et C_e pour les modèles de BET, BET modifié et GAB sont donnés dans le tableau 3.6 pour les échantillons testés en sorption et en désorption dans le tableau 3.7.

Échantillons textiles	BET			BET modifié			GAB			
	M_0	C_e	E%	M_0	C_e	E%	M_0	C_e	K	E%
CO _{95%} -EA _{5%} -J	2,65	9,55	1,0	3,88	5,67	2,3	2,83	12,05	0,84	2,9
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	1,21	9,49	0,8	1,89	4,69	0,9	1,34	9,99	0,85	1,2
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	1,55	8,03	3,6	2,64	3,55	2,5	1,78	7,78	0,86	3,1
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	0,75	7,08	0,8	1,20	3,72	0,8	0,91	6,27	0,82	1,3
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	1,95	12,66	0,2	2,80	7,02	2,2	1,89	23,11	0,88	5,4
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	1,77	13,74	0,3	2,52	7,51	2,2	1,72	24,71	0,87	5,3
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	1,50	9,94	0,3	2,15	6,04	2,6	1,59	13,50	0,82	4,3
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,39	5,96	1,4	0,57	4,19	3,2	0,53	5,81	0,71	1,2

TABLEAU 3.6 – M_0 et C_e en sorption pour les modèles de BET, BET modifié et GAB.

Le paramètre E% calculé est faible pour chaque échantillon textile. Les procédés de sorption/désorption des textiles peuvent être modélisés à l'aide des modèles de BET, BET modifié et de GAB. Le modèle de BET modifié présente un paramètre M_0 , représentatif de la quantité d'eau prise en monocouche, supérieur à ceux des modèles de GAB et BET sauf dans le cas du PAN_{50%}-PET_{50%}-I en désorption. Pour tous les textiles en désorption et dans la majorité des cas en sorption, ce paramètre est suivi dans l'ordre croissant par les modèles de GAB et de BET. Cette observation est en accord avec la littérature (H. KIM, Y. SONG et YAM 1994). Les différentes suppositions d'applications des modèles, ainsi que leur domaine d'application peuvent être la cause de cette différence observée. Le paramètre C_e du BET (énergie d'interaction entre les molécules d'eau et la fibre) présente

généralement une valeur supérieure à celle du modèle de GAB (TIMMERMANN 2003). Généralement, l'énergie d'interaction entre l'eau et la fibre est plus importante que celle liant les molécules d'eau entre elles. En sorption, cette constatation n'est pas vérifiée à l'exception de l'échantillon PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I dont la valeur C_e mesurée avec le BET reste proche de celle obtenue avec le GAB.

Échantillons textiles	BET			BET modifié			GAB			
	M_0	C_e	E%	M_0	C_e	E%	M_0	C_e	K	E%
CO _{95%} -EA _{5%} -J	3,14	11,94	1,0	4,68	6,17	1,4	4,54	7,11	0,72	2,9
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	1,84	12,79	1,6	2,37	9,93	4,7	2,08	16,62	0,74	3,9
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	2,13	16,40	4,7	2,94	9,31	2,7	2,70	15,00	0,69	2,8
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	1,15	9,99	1,5	1,56	7,17	4,0	1,49	10,60	0,68	2,4
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	2,37	13,13	0,5	3,35	7,52	2,1	2,43	20,22	0,84	5,0
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	2,09	12,66	0,6	2,95	7,28	2,0	2,12	19,77	0,84	5,0
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	1,80	9,81	0,5	2,51	6,47	3,1	2,04	11,91	0,77	3,5
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,51	5,46	2,1	0,70	4,41	5,1	1,00	4,56	0,49	0,4

TABLEAU 3.7 – M_0 et C_e en désorption pour les modèles de BET, BET modifié et GAB.

L'analyse de Pearson est appliquée aux données issues des modèles de BET, BET modifié et de GAB en sorption selon le tableau 3.8 et en désorption selon le tableau 3.9. Cette analyse permet de rechercher les paramètres physiques du textile impactant les paramètres issus des modèles. En sorption et en désorption, le paramètre M_0 des trois modèles est corrélé positivement au taux de reprise en eau réel. Lorsque la capacité du matériau à emmagasiner de l'humidité augmente alors la proportion d'eau sorbée en monocouche devient plus importante. L'échantillon CO_{95%}-EA_{5%}-J constitué de coton, fibre très hydrophile, vont créer de nombreuses liaisons hydrogènes avec l'eau, par conséquent le paramètre M_0 mesuré est le plus élevé. De même, le PAN_{50%}-PET_{50%}-I prend peu d'eau en monocouche (M_0 faible) car il est constitué d'un pourcentage important de fibres PET à caractère hydrophobe formant très peu de liaisons avec les molécules d'eau. Selon l'analyse de Pearson en sorption, le paramètre C_e est partiellement et négativement corrélé à l'épaisseur dans le cas des trois modèles et à la masse surfacique pour le modèle de BET. En désorption, aucune corrélation n'est apparente. Les énergies d'interaction entre la fibre, entre les molécules d'eau directement en contact avec le textile et celles liées au-dessus de ces dernières diminuent avec l'augmentation de l'épaisseur et de la masse surfacique du textile. Les molécules d'eau en contact direct avec la fibre sont fortement liées à cette dernière et présente des énergies d'interaction importantes, tandis que les molécules d'eau en liaison indirecte avec le textile présentent des énergies d'interaction plus faible. Lorsque l'épaisseur ou la masse surfacique d'un textile augmente, la quantité de matière fibreuse pouvant emmagasiner de l'humidité augmente ce qui permet d'accroître le nombre de molécules d'eau en contact indirect avec ce dernier et piégées au sein de la structure fibreuse. Ces molécules d'eau forment

des liaisons faibles avec les autres molécules avec une énergie d'interaction inférieures à celles en contact direct avec le polymère.

Paramètres physiques	BET		BET modifié		GAB		
	M_0	C_e	M_0	C_e	M_0	C_e	K
Masse surfacique	-0,546	-0,725	-0,547	-0,501	-0,493	-0,615	-0,886
Épaisseur	-0,586	-0,784	-0,546	-0,724	-0,504	-0,791	-0,650
Masse volumique	0,499	0,215	0,453	0,332	0,499	0,259	-0,028
Porosité	-0,047	-0,346	-0,010	-0,406	0,026	-0,447	-0,121
Perméabilité à l'air	-0,581	0,206	-0,612	0,130	-0,675	0,238	0,027
Taux de reprise en eau réel	0,921	0,446	0,939	0,322	0,936	0,344	0,660

TABLEAU 3.8 – Analyse de Pearson des modèles BET, BET modifié et GAB en sorption.

Paramètres physiques	BET		BET modifié		GAB		
	M_0	C_e	M_0	C_e	M_0	C_e	K
Masse surfacique	-0,587	-0,548	-0,545	-0,455	-0,286	-0,719	-0,923
Épaisseur	-0,524	-0,305	-0,523	-0,008	-0,246	-0,567	-0,816
Masse volumique	0,421	-0,018	0,482	-0,337	0,583	-0,230	-0,074
Porosité	0,032	0,058	0,031	0,207	0,251	-0,309	-0,337
Perméabilité à l'air	-0,552	-0,130	-0,605	0,261	-0,813	0,533	0,161
Taux de reprise en eau réel	0,958	0,612	0,961	0,311	0,960	0,227	0,470

TABLEAU 3.9 – Analyse de Pearson des modèles BET, BET modifié et GAB en désorption.

Le paramètre K du modèle de GAB, constante d'énergie représentant la différence d'enthalpie de sorption entre les molécules d'eau placées en multicouche et celles situées sur les couches supérieures en liaisons avec ces dernières, est négativement corrélé avec la masse surfacique. Comme avec le paramètre C_e , l'énergie d'interaction des molécules de vapeur d'eau entre elles diminuent avec l'augmentation du nombre de couches jusqu'à se retrouver à l'état liquide. Un textile présentant une masse surfacique importante, augmente sa capacité à emmagasiner le nombre de couches de molécules de vapeur d'eau empilées les unes sur les autres et ainsi l'énergie d'interaction globale diminue.

Le taux de reprise en eau réel est tracé en fonction du paramètre M_0 pour les modèles BET, BET modifié et GAB selon la figure 3.12. Le coefficient de corrélation linéaire R^2 est plus important pour les modèles de BET modifié et de GAB. Les deux échantillons PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I sont ceux qui ont pour effet de diminuer le coefficient R^2 en s'éloignant de la droite de régression linéaire pour les trois modèles. La fibre de polyacrylate contenue dans ces tricots, de par sa capacité à gonfler au contact de l'eau, engendre ces écarts observés en stockant davantage d'eau au sein des fibres. Ce phénomène n'est pas visible avec le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J. Ce textile contient de l'élasthanne qui va diminuer ce phénomène. Les équations résultant de ces modèles permettent de fournir une approximation de la quantité d'eau prise en monocouche pour les textiles sans systématiquement réaliser des essais DVS.

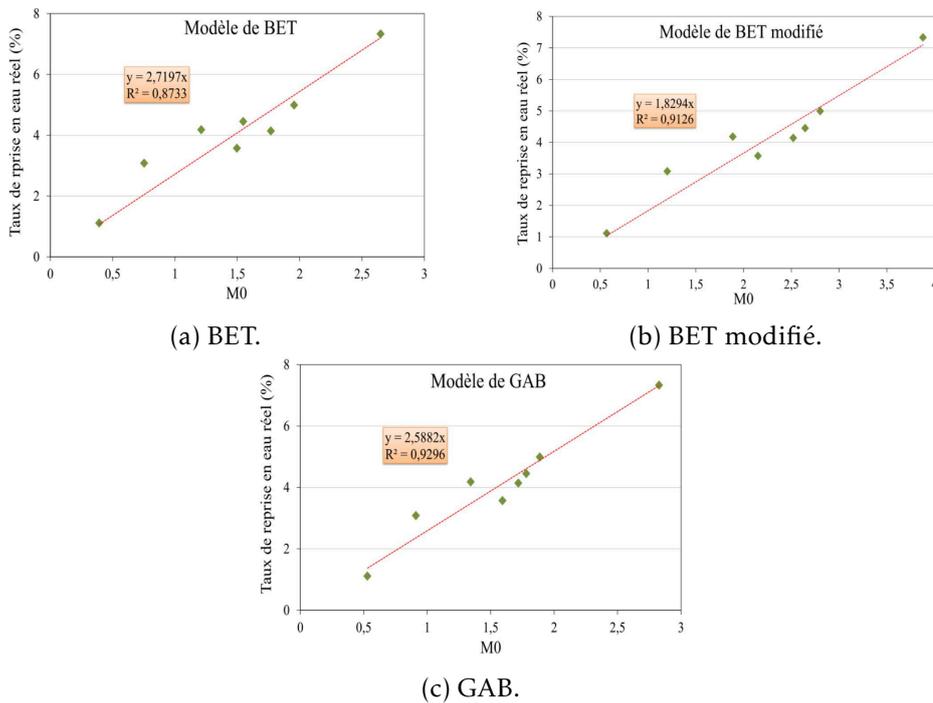


FIGURE 3.12 – Relation entre le taux de reprise en eau réel et le paramètre M_0 pour les modèles de BET, BET modifié et GAB.

3.1.3.2 Modèle de PEK

Contenu en eau

Les courbes représentant la sorption et la désorption en vapeur d'eau des textiles en fonction du taux d'humidité sont représentés en annexe C.1 pour l'ensemble des textiles. Les échelles des courbes sont différentes pour optimiser la visibilité de ces dernières. La quantité d'eau prise par le textile augmente avec l'humidité environnante pour les paramètres EMC représentant la quantité totale prise par ce dernier, MC_1 et MC_2 les mécanismes dit rapide (sites faciles d'accès) et lent (sites difficiles d'accès). La sorption en eau totale EMC est plus importante pour le $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$, suivi par $PAN_{66\%}-VI_{28\%}-EA_{6\%}-J$, $PET_{66\%}-VI_{28\%}-EA_{6\%}-J$, $PAN_{85\%}-VI_{15\%}-F$, $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_{6\%}-J$, $PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$, $PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_{7\%}-I$ et $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$. Le $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ est composé de fibres très hydrophiles ce qui lui permet d'emmagasiner davantage d'humidité que le $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$ composé d'une quantité importante de fibres PET à caractère hydrophobe. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau de l'annexe C.1.

- Échantillons contenant du polyacrylate

Les échantillons contenant du polyacrylate présentent des comportements différents en sorption et similaires en désorption (tableau 3.10). Les textiles $PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$ et $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_{6\%}-J$, constitués d'environ 15 % de fibres polyacrylate, prennent davantage d'eau que le $PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_{7\%}-I$ plus hydro-

phobe. Les écarts d'eau pris entre les mécanismes MC_1 et MC_2 sont importants. En sorption, l'échantillon $PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$ emmagasine de l'eau en priorité selon le processus rapide à faible humidité jusqu'à 41 %HR, puis selon le mécanisme lent. A faible humidité, les molécules de vapeur d'eau créent des liaisons hydrogènes sur les sites faciles d'accès comme à la surface ou au sein des zones amorphes du textile. Par la suite à plus haute humidité, une fois que ces sites sont saturés, la sorption a lieu au sein de la structure fibreuse dans des zones plus difficiles d'accès comme dans les pores et à la surface des zones cristallines. Pour le $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_6\%-J$, le mécanisme de sorption prédominant est celui du mécanisme lent. A faible humidité, les molécules d'eau pénètrent directement la structure fibreuse et sont adsorbées à la surface et dans les zones amorphes du textile. Contrairement au $PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_7\%-I$, cet échantillon contient de l'élasthanne, fibre à caractère hydrophobe (WEIDMANN 2010), pouvant influencer le comportement du $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_6\%-J$ en diminuant sa capacité à prendre l'eau selon le processus rapide au niveau des sites faciles d'accès. Le $PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_7\%-I$, composé d'un fil de $PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$ et de $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$, emmagasine l'eau principalement selon le processus rapide à faible humidité et selon le procédé lent à partir de 61 %HR. Le comportement est similaire au $PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$ mais avec un changement de comportement qui a lieu à plus haute humidité de par sa composition. En désorption, le processus dit rapide prédomine sur l'ensemble des paliers d'humidité pour les textiles contenant du polyacrylate. En effet, lorsque l'humidité environnante augmente, la quantité d'eau pénétrant la structure fibreuse devient de plus en plus importante ce qui a pour effet d'écarter les chaînes polymères des fibres. Le mouvement de ces chaînes permet aux molécules d'eau d'atteindre de nouveaux sites de sorption auparavant inaccessibles. Dans ce cas, lors de la désorption les molécules d'eau sont évacuées des sites qui sont devenus maintenant faciles d'accès (mécanisme rapide MC_1). Ce phénomène est confirmé lorsque les courbes de sorption et de désorption sont comparées pour chaque mécanisme. Pour le mécanisme dit rapide, la quantité d'eau prise en sorption est moins importante que celle désorbée et le phénomène inverse est observé pour le mécanisme lent prenant davantage d'eau en sorption qu'en désorption. La modification de la structure fibreuse lors de la sorption, permet de désorber l'eau selon des sites faciles d'accès même si initialement ceux-ci étaient difficilement accessibles.

- Échantillons contenant de la viscosse

Les échantillons contenant de la viscosse ont un comportement similaire en sorption et en désorption (tableau 3.11). Les textiles $PAN_{66\%}-VI_{28\%}-EA_6\%-J$ et $PET_{66\%}-VI_{28\%}-EA_6\%-J$ constitués à 28 % de fibres de viscosse créent davantage de liaisons avec les molécules d'eau que l'échantillon $PAN_{85\%}-VI_{15\%}-F$ composé à 15 % de ces mêmes fibres. Les écarts observés entre la sorption rapide (MC_1) et lente (MC_2) sont proches sur l'ensemble des paliers d'humidité. A faible humidité jusqu'à 40 %HR pour le $PAN_{66\%}-VI_{28\%}-EA_6\%-J$ et jusqu'à 30 %HR pour les autres échantillons ($PET_{66\%}-VI_{28\%}-EA_6\%-J$, $PAN_{85\%}-VI_{15\%}-F$), la quantité d'eau prise

en sorption est effectuée de manière identique selon les procédés rapide et lent. Les molécules de vapeur d'eau sont sorbées sur les sites faciles d'accès comme à la surface et dans les zones amorphes du textile ; et également au niveau des sites difficiles d'accès c'est-à-dire dans les pores et à la surface des zones cristallines. Au-delà de ces paliers d'humidité, la sorption est réalisée prioritairement selon le mécanisme rapide. A plus haute humidité, davantage de liaisons sont réalisées entre les molécules d'eau et le textile à la surface et dans les zones amorphes le constituant. En désorption, le comportement des échantillons viscoses est similaire à celui des textiles contenant du polyacrylate. Les molécules d'eau sont évacuées du textile principalement selon le procédé rapide. En comparant les courbes de sorption et de désorption pour chaque mécanisme, une certaine quantité d'eau prise selon le procédé lent est désorbée selon le processus rapide car de par l'évolution de la structure fibreuse, les sites auparavant inaccessibles deviennent facilement accessibles lors de la désorption. La quantité d'eau désorbant selon le procédé rapide et manquante au niveau du procédé lent est définie dans la littérature comme une quantité d'« eau additionnelle » (KOHLER et al. 2003).

Échantillons textiles	Sorption		Désorption		Sorption/Désorption
	Mécanismes	Sites	Mécanismes	Sites	
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-41 %HR : $MC_1 > MC_2$ 41-98 %HR : $MC_1 < MC_2$	10-41 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
		41-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines			
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	$MC_1 < MC_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	10-61 %HR : $MC_1 > MC_2$ 61-98 %HR : $MC_1 < MC_2$	10-61 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
		61-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines			

TABLEAU 3.10 – Résumé de l'analyse du contenu en eau pour les échantillons avec polyacrylate.

- Autres échantillons

Les deux autres échantillons CO_{95%}-EA_{5%}-J et PAN_{50%}-PET_{50%}-I ont un comportement similaires en sorption et en désorption (tableau 3.12). Ces textiles différent

principalement par la quantité d'eau prise lorsque l'humidité environnante augmente. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J est constitué de fibres de coton très hydrophiles avec une capacité à créer de nombreuses liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau de par le M₀ important calculée à partir des modèles de BET, BET modifié et GAB. Ce textile va perdre une quantité d'eau importante au cours du test contrairement à PAN_{50%}-PET_{50%}-I constitué de fibres hydrophobes avec une faible affinité avec les molécules d'eau. La quantité totale d'eau prise par PAN_{50%}-PET_{50%}-I est très inférieure à celle du CO_{95%}-EA_{5%}-J. Cependant pour ces deux échantillons, la sorption est principalement réalisée selon le processus rapide c'est-à-dire à la surface et dans les zones amorphes du matériau fibreux. En désorption, le même phénomène est observé, les molécules de vapeur d'eau quittent la structure fibreuse au niveau des sites faciles d'accès. Contrairement aux autres textiles dans le cas du CO_{95%}-EA_{5%}-J, en comparant les courbes de sorption et de désorption pour chaque mécanisme, la quantité « d'eau additionnelle » est désorbée selon le processus lent plutôt que rapide. Ceci peut-être causé par la capacité du coton à gonfler en contact avec l'eau formant des liaisons hydrogènes très énergétiques et fortement liées. Ce phénomène modifie la disposition des sites de désorption au sein de la structure fibreuse et retarder le départ des molécules d'eau de cette dernière. Dans le cas du PAN_{50%}-PET_{50%}-I, son comportement est similaire aux autres échantillons textiles.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption		Sorption/Désorption
	Mécanismes	Sites	Mécanismes	Sites	
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR : $MC_1 = MC_2$ 40-98 %HR : $MC_1 > MC_2$	10-40 %HR : Surface du textile et zones amorphes; 40-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
		10-30 %HR : Surface du textile et zones amorphes;			
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	10-30 %HR : $MC_1 = MC_2$ 30-98 %HR : $MC_1 > MC_2$	10-30 %HR : Surface du textile et zones amorphes; 30-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 30-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$

TABLEAU 3.11 – Résumé de l'analyse du contenu en eau pour les échantillons avec viscose.

Échantillons textiles	Sorptions		Désorption		Sorptions/Désorption
	Mécanismes	Sites	Mécanismes	Sites	
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile	$MC_{1,S} > MC_{1,D}$ $MC_{2,S} < MC_{2,D}$
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$	et zones amorphes	$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$

TABLEAU 3.12 – Résumé de l'analyse du contenu en eau pour les autres échantillons.

Temps

Les temps caractéristiques t_1 et t_2 représentent les temps que met le textile à stabiliser sa masse à chaque palier d'humidité lors des phénomènes de sorption et de désorption. Pour l'ensemble des échantillons textiles, les temps associés au processus rapide (t_1) sont inférieurs à ceux associés au processus lent (t_2). Ce phénomène est corrélé à différents travaux issus de la littérature (CAS HILL, NEWMAN et NORTON 2010; HILL et al. 2011; POPESCU, CAS HILL et KENNEDY 2016). La stabilisation de la masse du textile prend moins de temps lorsque les molécules sont prises principalement aux niveaux des sites de sorption/désorption faciles d'accès plutôt que pour les sites situés au sein de la matière fibreuse (pores, cavité, surface des cristallines). Ainsi, le processus rapide est associé à un temps caractéristique court tandis que le processus lent à un temps de sorption/désorption long. Dans le cas des matières contenant du polyacrylate et pour les échantillons très et peu hydrophiles (CO_{95%}-EA_{5%}-J et PAN_{50%}-PET_{50%}-I), le paramètre t_1 associé au processus rapide est important aux faibles et hautes humidité, et relativement constant dans les autres zones. Aux extrémités, le processus de sorption/désorption est ralenti et des liaisons ont encore lieu selon ce procédé au niveau des sites faciles d'accès (KOHLE et al. 2003; ZAIHAN, CURLING et al. 2010). En regardant l'évolution des temps t_2 caractérisant les processus lent, des valeurs plus importantes sont observées aux humidités moyennes. A faible humidité, les sites situés au sein de la matrice fibreuse sont difficilement accessibles et peu de molécules d'eau sont prises selon ce procédé. Cela permet de stabiliser plus rapidement la masse du textile car peu de liaisons ont lieu contrairement au paramètre t_1 caractérisant la sorption sur les nombreux sites présent en surface et dans les zones amorphes de la fibre. Le temps de stabilisation du textile est plus lente car davantage d'eau est emmagasiné suivant ce procédé. A haute humidité, les molécules d'eau en contact direct avec la fibre occupent presque la totalité des sites initialement disponibles et seule la sorption au-dessus des premières molécules d'eau en contact avec la fibre est possible ce qui correspond au processus rapide. Dans ce cas, le paramètre t_1 mesure des temps plus long et le temps t_2 est plus faible car peu de sites sont encore disponibles pour ce mécanisme. Pour les textiles constitués de fibres viscosse, ces phénomènes sont difficilement visibles.

Module d'élasticité

Le module d'élasticité caractérise la difficulté des molécules d'eau à pénétrer la structure fibreuse par la déformation élastique de cette dernière. Les efforts internes, E_1

selon le procédé rapide et E_2 lent, appliqués par les molécules d'eau diminuent lorsque l'humidité augmente pour l'ensemble des échantillons textiles des courbes fournies en annexe C.3. Les molécules d'eau vont avoir un effet « plastifiant » sur la structure fibreuse en augmentant sa flexibilité par la réduction du nombre de liaisons entre les fibres polymères au fur et à mesure que le nombre de molécules d'eau augmente au sein du textile (CAS HILL et XIE 2011 ; POPESCU et CAS HILL 2013 ; CAS HILL, RAMSAY et al. 2012 ; ZAIHAN, CURLING et al. 2010 ; XIE et al. 2011). Les modules d'élasticité sont les plus importants pour les échantillon PAN_{50%}-PET_{50%}-I et les plus faibles pour le CO_{95%}-EA_{5%}-J dans le cas de E_1 . Pour les textiles constitués de fibres hydrophobes montrant peu d'affinité avec les molécules d'eau, celles-ci doivent appliquer une contrainte importante sur la structure fibreuse pour créer des liaisons au sein de celle-ci. Pour des matières à caractère hydrophile, l'interaction forte entre les fibres et les molécules d'eau permet à ces dernières de s'insérer facilement au sein de la structure fibreuse sans créer d'efforts mécanique importants. Une faible valeur des modules d'élasticité caractérise une meilleure capacité de déformation de la structure fibreuse. Les résultats obtenus dans l'étude du module d'élasticité pour l'ensemble des échantillons textiles sont résumés dans le tableau de l'annexe C.2. Les résultats obtenus avec les modules d'élasticité ont un comportement opposé à ceux du contenu en eau. Cela signifie que la capacité du textile à prendre l'eau est étroitement liée à la difficulté des molécules de vapeur d'eau à pénétrer la structure fibreuse.

- Échantillons contenant du polyacrylate

Les fibres de polyacrylates présentent un comportement différent en sorption et similaire en désorption (tableau 3.13). Le PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I constitué de fibres plus hydrophobes que les autres textiles (PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J) présentent des valeurs E_2 plus importantes. Les molécules d'eau ont plus de difficulté à accéder aux sites de sorption situés au sein des pores et à la surface des zones cristallines contrairement au PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J où de plus faibles valeurs sont mesurées. Sur les sites de sorption associés au procédé rapide, les molécules d'eau y accèdent plus difficilement dans le cas de l'échantillon PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J. Pour le PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, la sorption est plus difficile au niveau des pores et à la surface des zones cristallines jusqu'à 41 %HR. Par la suite les zones situées à la surface et au sein des zones amorphes nécessitent un effort important des molécules d'eau pour y accéder. Dans le cas du PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I le même phénomène est observé mais à partir de 61 %HR. Pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, la contrainte appliquée par les molécules d'eau pour atteindre les sites situés à la surface de la fibre et dans les zones amorphes est importante. Dans le cas de la désorption, les molécules d'eau désorbent plus difficilement à partir des sites situés au niveau des pores et à la surface des zones cristallines du textile. En comparant les courbes de sorption et de désorption pour chaque mécanisme, les valeurs des modules d'élasticité obtenues en sorption sont supérieures à celles mesurées lors de la désorption. Cette observation est en concordance avec la littérature (IGLESIAS 1981 ; POPESCU et CAS HILL 2013 ; CAS HILL, RAMSAY et al. 2012). La sorption de la première

molécule d'eau demande d'appliquer sur la structure fibreuse un effort plus important que lorsque la dernière molécule d'eau quitte l'échantillon textile.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption	
	Mécanismes	Sites difficiles d'accès	Mécanismes	Sites difficiles d'accès
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-41 %HR : $E_1 < E_2$	10-41 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 41-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines
	41-98 %HR : $E_1 > E_2$			
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	$E_1 > E_2$	Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	10-61 %HR : $E_1 < E_2$	10-61 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 61-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	
	61-98 %HR : $E_1 > E_2$			

TABLEAU 3.13 – Résumé de l'analyse du module d'élasticité pour les échantillons avec polyacrylate.

- Échantillons contenant de la viscose

Les échantillons contenant de la viscose présentent un comportement similaire lors de la sorption et de la désorption (tableau 3.14). Les modules d'élasticité mesurés pour le fil PAN_{85%}-VI_{15%}-F est plus important que ceux des échantillons textiles PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J contenant 28 % de fibres de viscose. Ces derniers, plus hydrophiles, permettent aux molécules d'eau de rentrer plus facilement au sein de leur structure fibreuse. A faible taux d'humidité jusqu'à 30 %HR pour PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et à 40 %HR pour les autres textiles, les molécules d'eau accèdent difficilement aux sites situés à la surface du textile et des pores, ainsi qu'au sein des régions amorphes et cristallines. Au-delà de ces paliers d'humidité, seuls les sites situés au niveau des pores et à la surface des zones cristallines demandent aux molécules d'eau davantage d'efforts pour les atteindre. En comparant les courbes de sorption/désorption pour chaque mécanisme, les résultats obtenus sont différents. Pour le mécanisme rapide, comme avec les matières contenant du polyacrylate, le module E_1 mesuré en sorption est supérieur à celui déterminé en désorption. Les molécules d'eau ont plus de difficulté à pénétrer une matière fibreuse sèche plutôt qu'à quitter un environnement déjà mouillé. Dans le cas du module E_2 associé au mécanisme lent, le phénomène opposé est observé. Il est plus difficile pour les molécules d'eau de quitter la structure fibreuse aux niveaux des sites situés dans les pores

et à la surface des cristallites plutôt que de les atteindre lors de la sorption. La rigidité de la structure fibreuse est plus importante et ne permet pas de désorber aussi facilement les molécules d'eau que pour les échantillons contenant du polyacrylate.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption	
	Mécanismes	Sites difficiles d'accès	Mécanismes	Sites difficiles d'accès
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR : $E_1 = E_2$ 40-98 %HR : $E_1 < E_2$	10-40 %HR : Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines
		40-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines		
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	10-30 %HR : $E_1 = E_2$ 30-98 %HR : $E_1 < E_2$	10-30 %HR : Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 30-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	

TABLEAU 3.14 – Résumé de l'analyse du module d'élasticité pour les échantillons avec viscosse.

- Autres échantillons

Dans le cas du PAN_{50%}-PET_{50%}-I, les molécules d'eau atteignent difficilement les sites de sorption disponibles (modules E_1 et E_2 importants) de par la faible affinité de la fibre avec l'eau (tableau 3.15). Pour le CO_{95%}-EA_{5%}-J, les valeurs des modules sont faibles traduisant une capacité de la structure fibreuse à se déformer et à créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau plutôt qu'entre les fibres de coton. Les modules associés au mécanisme lent montrent qu'il est plus difficile pour les molécules d'eau d'atteindre ces sites plutôt que ceux situés à la surface et dans les zones amorphes du textile. En comparant les courbes de sorption et de désorption, le CO_{95%}-EA_{5%}-J a un comportement similaire aux échantillons contenant du polyacrylate et le PAN_{50%}-PET_{50%}-I à ceux contenant de la viscosse. La structure fibreuse du PAN_{50%}-PET_{50%}-I est plus rigide que les autres textiles de par les fortes interactions existantes entre les fibres plutôt qu'avec les molécules d'eau. Ces liaisons sont difficilement rompues par les molécules d'eau qui, en fonction de l'évolution de la structure fibreuse

durant les cycles de sorption et de désorption, peuvent se retrouver bloquer dans l'enchevêtrement des fibres composant le textile.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption	
	Mécanismes	Sites difficiles d'accès	Mécanismes	Sites difficiles d'accès
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines

TABLEAU 3.15 – Résumé de l'analyse du module d'élasticité pour les autres échantillons.

Module de viscosité

Le module de viscosité traduit la capacité des chaînes polymères constituant le textile à se déplacer entre elles de manière définitive sans revenir systématiquement à leur position initiale. Ce paramètre diminue lorsque l'humidité environnante augmente (courbes en annexe C.4). Ce comportement est similaire à celui des modules d'élasticités. Les molécules d'eau entrant en contact avec la structure fibreuse vont « plastifier » cette dernière et le mouvement des chaînes polymères est facilité avec l'augmentation des liaisons hydrogènes créées entre les molécules d'eau et le textile (BARBA et al. 2013). Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau de l'annexe C.3.

- Échantillons contenant du polyacrylate

Les modules de viscosité mesurés pour PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I sont plus importants que ceux déterminés pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{85%}-PAC_{15%}-I (tableau 3.16). Pour les échantillons contenant du polyacrylate, lors de la sorption, le module de viscosité associé au mécanisme lent est plus important jusqu'à 80, 83 et 92 %HR respectivement pour les échantillons PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I. Les chaînes polymères se déplacent plus difficilement au niveau des sites situés au sein des pores, et à la surface des zones cristallines pour permettre aux molécules d'eau de s'y positionner. Au-delà de ces humidités et au niveau des sites faciles d'accès, ces chaînes ont un mouvement restreint. La limite d'expansion de la structure fibreuse est atteinte aux hautes humidités. Lors de la désorption, les molécules d'eau quittent les zones de sorption, situées au niveau des interstices (pores, cavités) et à la surface des régions cristallines, avec davantage de difficulté.

- Échantillons contenant de la viscosé

Dans le cas des échantillons contenant de la viscosé, les modules de viscosité présentent des valeurs similaires (tableau 3.17). Aux faibles humidités jusqu'à 40 %HR pour PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et 30 %HR pour les autres textiles, les chaînes polymères se déplacent difficilement sur toutes les zones contenant

des sites de sorption disponibles pour les molécules d'eau. Au-delà de ces humidités, la sorption sur les sites situés au sein de la structure fibreuse c'est-à-dire au niveau des pores et à la surface des zones cristallines est difficilement réalisable.

Échantillons textiles	Sorption	Désorption
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-80 %HR :	$\eta_1 < \eta_2$
	$\eta_1 < \eta_2$	
	80-98 %HR :	
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	$\eta_1 > \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	10-83 %HR :	
	$\eta_1 < \eta_2$	
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	83-98 %HR :	$\eta_1 < \eta_2$
	$\eta_1 > \eta_2$	
	10-92 %HR :	
	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	92-98 %HR :	
	$\eta_1 > \eta_2$	

TABLEAU 3.16 – Résumé de l'analyse du module de viscosité pour les échantillons avec polyacrylate.

Échantillons textiles	Sorption	Désorption
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR :	$\eta_1 < \eta_2$
	$\eta_1 = \eta_2$	
	40-98 %HR :	
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	10-30 %HR :	
	$\eta_1 = \eta_2$	
	30-98 %HR :	$\eta_1 < \eta_2$
	$\eta_1 < \eta_2$	
	$\eta_1 < \eta_2$	

TABLEAU 3.17 – Résumé de l'analyse du module de viscosité pour les échantillons avec viscose.

- Autres échantillons

Le module de viscosité associé au procédé lent (η_2) est plus important dans le cas du PAN_{50%}-PET_{50%}-I que pour le CO_{95%}-EA_{5%}-J (tableau 3.18). De par sa structure très cristalline (fibres PET), les molécules d'eau pénètrent difficilement au sein de la structure fibreuse à cause de l'extension limitée des chaînes polymères constituant ce textile. La structure du CO_{95%}-EA_{5%}-J est davantage flexible et facilite la sorption des molécules d'eau au niveau des pores et à la surface des zones cristallines. Pour le module associé au processus rapide (η_1), aucune différence significative n'est observée entre les textiles. En sorption et en désorption,

le module de viscosité η_2 est supérieur à celui associé au processus rapide. Les chaînes polymères se déplacent plus difficilement au sein du matériau qu'à la surface et au sein des zones amorphes. Dans le cas du CO_{95%}-EA_{5%}-J, η_2 est plus important en sorption qu'en désorption. Il est plus difficile pour un matériau initialement sec de se déformer que dans le cas d'un textile déjà mouillé.

Échantillons textiles	Sorption	Désorption
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$

TABLEAU 3.18 – Résumé de l'analyse du module de viscosité pour les autres échantillons.

Hystérésis

Lorsqu'une molécule d'eau pénètre à l'intérieur du textile, les chaînes polymères constituant la structure fibreuse s'écartent en créant des nanopores pour laisser les molécules d'eau s'y insérer. Lors de la désorption, ces nanopores disparaissent lorsque celles-ci quittent la structure fibreuse et les liaisons entre les fibres se reforment (CAS HILL, NEWMAN et NORTON 2010; CAS HILL, RAMSAY et al. 2012). En dessous de la température de transition vitreuse T_g , le volume libre de la structure est insuffisant pour permettre sa déformation sans la coopération de l'ensemble des autres chaînes polymères constituant le textile. Ainsi, à cause de la rigidité de cette structure, le textile est incapable de réagir instantanément à la sorption et à la désorption des molécules d'eau (CAS HILL, RAMSAY et al. 2012; KEATING et al. 2013). Ce temps de retard engendre un phénomène d'hystérésis (CAS HILL, NEWMAN et NORTON 2010). Dans le cas opposé, lorsque la T_g est atteinte, suffisamment d'espace est disponible au sein de la structure fibreuse pour que les molécules d'eau puissent y entrer. Les chaînes polymères plus mobiles s'écartent facilement. Dans ce cas, la structure fibreuse réagit instantanément en se déformant rapidement au passage des molécules de vapeur d'eau (CAS HILL et XIE 2011; CAS HILL, KEATING et al. 2012; POPESCU et CAS HILL 2013). La température fixée lors des essais DVS est de 35 °C. Cette température est inférieure à la T_g des polymères constituant les textiles, ainsi le phénomène d'hystérésis est visible pour l'ensemble des échantillons textiles. L'hystérésis total de chaque échantillon est représenté selon la figure 3.13. Les courbes augmentent des faibles humidités jusqu'au moyennes pour réduire brusquement à haute humidité. A faible humidité, peu de liaisons sont créés entre les molécules d'eau et la fibre ainsi la différence mesurée entre les phénomènes de sorption et de désorption est faible. A haute humidité, la diminution brusque de l'hystérésis est associée à l'effet de « plastification » des molécules d'eau rendant la structure fibreuse davantage flexible (POPESCU, CAS HILL et KENNEDY 2016). Le CO_{95%}-EA_{5%}-J présente les plus importantes valeurs d'hystérésis à haute humidité. La capacité de la fibre de coton à gonfler en changeant sa structure engendre une différence d'humidité mesurée importante entre les processus de sorption et de désorption. Les échantillons contenant des fibres de polyacrylate comme le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J présentent des valeurs d'hystérésis

importantes pour de moyennes humidités (entre 20 et 60 %HR). Pour les échantillons constitués de viscose, l'hystérésis est constante et augmente légèrement dans les zones d'humidités comprises entre 50 et 80 %HR. Le PAN_{50%}-PET_{50%}-I de par sa structure rigide présente une très faible hystérésis sur l'ensemble des paliers d'humidités. Ainsi, la nature des fibres contenues dans les échantillons textiles influencent le phénomène d'hystérésis.

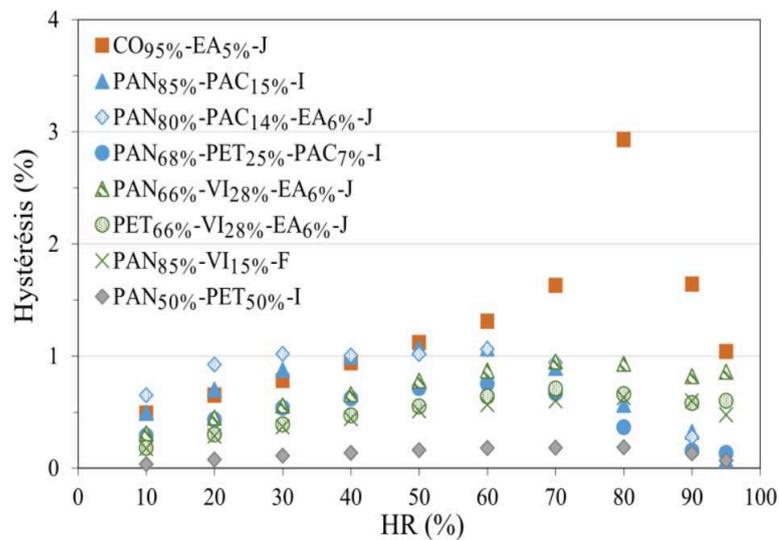


FIGURE 3.13 – Hystérésis de l'ensemble des échantillons textiles.

La surface de la zone d'hystérésis est calculée pour l'ensemble des échantillons textiles dans le tableau 3.19. Dans le cas d'un échantillon très hydrophile comme le CO_{95%}-EA_{5%}-J, l'aire de l'hystérésis est importante. La différence entre la quantité d'eau emmagasinée ou désorbée par le textile est conséquente de selon la capacité de la structure fibreuse à se déformer en créant de nombreuses liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. Pour le PAN_{50%}-PET_{50%}-I contenant une part non négligeable de zones cristallines dans sa structure, la surface d'hystérésis mesurée est la plus faible. Les fibres PET ont peu d'affinité avec les molécules d'eau, ainsi les liaisons interfibres sont très énergétiques et difficiles à casser pour laisser les molécules d'eau s'y insérer. Les autres échantillons textiles présentent des valeurs intermédiaires qui sont corrélées à leur taux de reprise en réel. Les aires d'hystérésis des échantillons contenant 15 % de fibres viscose sont inférieures à celles calculées pour ceux contenant 15 % de fibres polyacrylate plus hydrophiles.

Les mécanismes rapide et lent influencent le phénomène d'hystérésis (annexe C.5). Pour l'ensemble des échantillons textiles, l'hystérésis est principalement causé par le mécanisme rapide à l'exception du CO_{95%}-EA_{5%}-J. Pour des valeurs positives, davantage de molécules d'eau sont relarguées par le matériau fibreux plutôt que retenues par ce dernier. En désorption pour le procédé rapide, les sites concernés sont ceux initialement présents à faible et moyenne humidités, en addition à ceux qui sont devenus facilement

accessibles à haute humidité absent durant le processus de sorption. Pour le procédé lent, dans le cas du CO_{95%}-EA_{5%}-J composé de fibres très hygroscopiques, la fibre gonfle à haute humidité modifiant la structure fibreuse et permettant aux molécules d'eau d'accéder aux sites auparavant inaccessibles à faible humidité. Ainsi, davantage d'eau est désorbée des sites situés au sein du textile. Pour l'ensemble des échantillons textiles sauf le CO_{95%}-EA_{5%}-J, des valeurs négatives d'hystérésis sont mesurées. Dans ce cas, la quantité d'eau prise en sorption est plus importante que celle désorbée. Ce phénomène est appelé « eau additionnelle ». Lors de la déformation de la structure fibreuse à haute humidité, le type de sites sur lesquels les molécules d'eau sont initialement prises changent. Pour les échantillons contenant des fibres polacrylate, les valeurs négatives pour le procédé lent sont observées aux hautes humidités à partir de 50, 60 et 70 %HR respectivement pour le PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I. Les échantillons de viscose présentent une hystérésis négative pour le procédé lent sur l'ensemble des paliers d'humidités. Le comportement de CO_{95%}-EA_{5%}-J, composé en partie de fibres naturelles, est cohérent avec l'étude réalisée par Popescu et al. (POPESCU et CAS HILL 2013). Les courbes d'hystérésis des mécanismes lent et rapide obtenues avec les fibres synthétiques diffèrent de celles obtenues avec les fibres naturelles où le mécanisme lent prédomine sur l'ensemble des paliers d'humidités.

Échantillons textiles	Aire de l'hystérésis
CO _{95%} -EA _{5%} -J	116
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	69
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	75
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	46
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	63
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	45
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	41
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	11

TABLEAU 3.19 – Aire de l'hystérésis des échantillons textiles.

3.1.3.3 Modèle HH

L'ensemble des coefficients et des courbes du modèle HH sont données en annexe C.6 et C.4. Dans ce chapitre, un exemple de courbes M_h et M_s obtenues pour les textiles CO_{95%}-EA_{5%}-J et PAN_{50%}-PET_{50%}-I, les paramètres extraits des modèles de PEK (EMC, MC₁, MC₂) sont représentés en figure 3.14. Le E% calculé est inférieur à 10 % indiquant que le modèle HH est adapté à la modélisation des données issues des essais DVS.

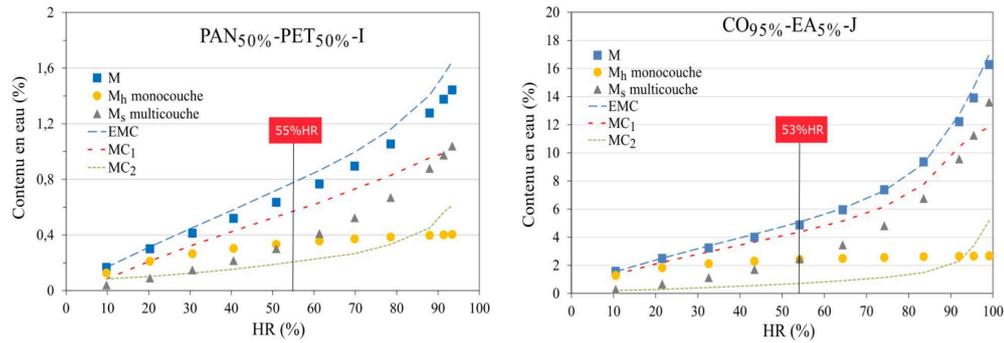


FIGURE 3.14 – Courbes des modèles HH et PEK.

Sur cette figure, l'évolution des courbes augmente avec l'augmentation de l'humidité du milieu. Les paramètres EMC et M correspondant respectivement à la quantité totale d'eau prise par le textile pour les modèles de PEK et HH sont corrélés. Kohler et al. (KOHLER et al. 2003) a suggéré la possible existence d'une relation entre ces modèles mais souvent pour ces auteurs aucune équation n'est apparente (ZAIHAN, CAS HILL et al. 2009; CAS HILL, AJ NORTON et NEWMAN 2010; ZAIHAN, CURLING et al. 2010). Les équations 3.34 et 3.35, développées dans cette étude, permettent d'exprimer M_h et M_s du modèle HH en fonction des paramètres MC_1 et MC_2 du modèle de PEK.

$$M_h = \left(1 - \frac{\%HR}{100}\right) \times MC_1 + \frac{\%HR}{100} \times MC_2 \quad (3.34)$$

$$M_s = \frac{\%HR}{100} \times MC_1 + \left(1 - \frac{\%HR}{100}\right) \times MC_2 \quad (3.35)$$

Les coefficients MC_1 et MC_2 sont inversés pour les textiles PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I contenant du polyacrylate dont les mécanismes de sorption diffèrent des autres échantillons. Les courbes de la figure 3.15 permettent de vérifier la différence entre les équations M_h et M_s calculées et celles issues directement du modèle HH pour les textiles PAN_{50%}-PET_{50%}-I et CO_{95%}-EA_{5%}-J. Les courbes sont données en annexe C.7 pour l'ensemble des échantillons textiles.

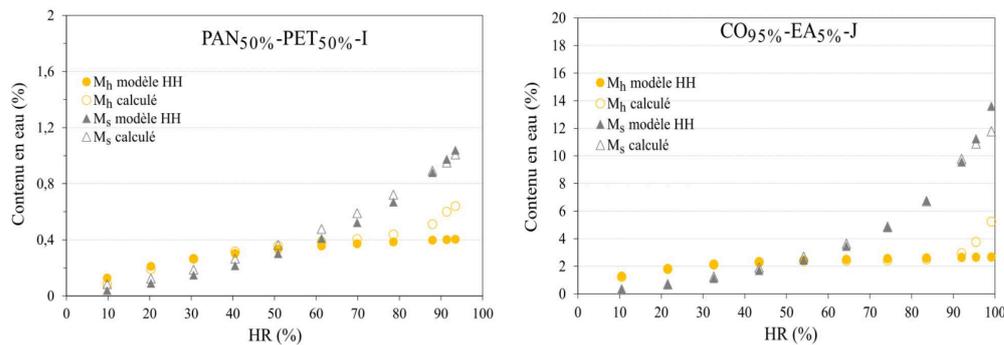


FIGURE 3.15 – Courbes montrant la différence entre les paramètres M_h et M_s calculés avec les équations et ceux directement issus du modèle HH.

A haute humidité, les courbes M_h et M_s calculées pour les échantillons $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ et $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$ suivent les courbes M_h et M_s issues directement du modèle HH. Seuls ces échantillons présentent les meilleures corrélations entre les courbes tandis que pour les autres échantillons un écart important apparaît à haute humidité. Les équations développées précédemment sont principalement vérifiées pour des échantillons très hydrophiles ou très hydrophobes. Pour les autres textiles à haute humidité, celles-ci ne permettent pas de suivre correctement les valeurs extraites du modèle HH. Cependant, cette modélisation permet de suggérer que la sorption des molécules de vapeur d'eau selon les processus rapide (MC_1) et lent (MC_2) est réalisée de manière simultanée en monocouche et en multicouche. L'intersection d'humidité relative située entre la courbe M_h , représentant la quantité d'eau prise en monocouche, et la courbe M_s en multicouche, est proche pour l'ensemble des échantillons textiles entre 49 et 56 %HR quelque soit la composition des échantillons textiles (tableau 3.20). D'après l'analyse de Pearson résumé dans le tableau 3.21, cette donnée n'est corrélée à aucun paramètre physique caractérisant les textiles.

Échantillons textiles	Modèle HH		
	W	E%	Palier HR
$CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$	588	2,0	53
$PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$	1311	1,2	52
$PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_{6\%}-J$	955	2,7	49
$PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_{7\%}-I$	2023	1,4	50
$PAN_{66\%}-VI_{28\%}-EA_{6\%}-J$	881	5,5	53
$PET_{66\%}-VI_{28\%}-EA_{6\%}-J$	971	5,0	54
$PAN_{85\%}-VI_{15\%}-F$	1061	4,3	56
$PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$	3322	1,1	55

TABLEAU 3.20 – Résultats obtenus pour le modèle HH en sorption.

Paramètres physiques	W	Palier HR
Masse surfacique	0,812	0,192
Épaisseur	0,677	-0,154
Masse volumique	-0,073	0,163
Porosité	0,142	-0,320
Perméabilité à l'air	0,321	0,086
Taux de reprise en eau réel	-0,762	-0,231

TABLEAU 3.21 – Analyse de Pearson du modèle HH.

Le paramètre W , extrait du modèle HH, est inversement proportionnel au nombre de sites de sorption disponibles à la surface de la fibre. Une valeur élevée représente une faible capacité du textile à créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau et dans le cas contraire, le nombre de sites disponibles est important. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J constitué de fibres très hygroscopiques présente le plus faible coefficient W stipulant qu'un nombre non négligeable de sites au niveau de l'échantillon textile ont la capacité de créer des liaisons hydrogènes avec la fibre ce qui n'est pas le cas avec PAN_{50%}-PET_{50%}-I constitué de fibres PET formant chimiquement peu de liaisons hydrogènes avec l'eau (tableau 3.20). Selon l'analyse de Pearson, ce paramètre est corrélé partiellement et négativement avec le taux de reprise en eau car un textile composé de fibres hygroscopiques va présenter une meilleure affinité avec les molécules d'eau en donnant la possibilité à celles-ci de créer de nombreuses liaisons hydrogènes avec les fibres. Cette forte affinité se traduit par une faible valeur du coefficient W . Ce paramètre diminue avec l'augmentation du taux de reprise en eau des textiles. De plus, W est également positivement corrélé avec la masse surfacique, cela signifie que le nombre de sites présentant des affinités avec les molécules d'eau diminue avec l'augmentation de la masse surfacique du textile. Un matériau compact augmente la difficulté des molécules de vapeur d'eau à accéder aux sites de sorption disponibles au sein du textile. L'enchevêtrement fibreux bloque le passage des molécules d'eau et diminue par conséquent la capacité du textile à emmagasiner de l'humidité comme a pu le constater Bhourri et al. (BHOURI, BENNASRALLAH et PERRE 2012).

3.1.3.4 Modèle de Young-Nelson

Les coefficients calculés à partir du modèle Young-Nelson sont données dans le tableau 3.22 et en annexe C.5. La figure 3.16 montre respectivement la sorption en monocouche, à l'extérieur du matériau et à l'intérieur du matériau pour l'ensemble des échantillons textiles.

Échantillons textiles	Modèle de Young-Nelson				E%
	Palier HR	$M_{\text{monocouche}}$	M_{externe}	M_{interne}	
CO _{95%} -EA _{5%} -J	43	3,70	12,38	4,50	11,3
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	41	3,56	9,24	-1,51	3,7
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	46	6,12	11,46	-4,01	3,2
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	42	1,86	4,77	-0,34	4,0
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	48	9,93	17,97	-10,51	5,0
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	48	8,79	18,47	-9,19	4,7
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	48	5,26	12,33	-4,33	3,7
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	31	0,60	1,32	0,16	0,5

TABLEAU 3.22 – Résultats obtenus pour le modèle Young-Nelson en sorption.

D'après la figure 3.16a, la sorption en monocouche est plus importante pour PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J suivi par les échantillons PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, PAN_{85%}-VI_{15%}-F, CO_{95%}-EA_{5%}-J, PAN_{85%}-PAC_{15%}-I, PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I et PAN_{50%}-PET_{50%}-I. Contrairement à ce qu'il a été montré avec les modèles de BET, BET modifié et GAB (paramètre M_0), la sorption en monocouche est plus importante pour les textiles contenant de la viscose et notamment ceux constitués de 28 % de ces fibres (PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J). Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J contenant 14 % de fibres polyacrylate a un comportement similaire avec les échantillons contenant 15 % de viscose et la quantité d'eau prise est supérieure à celle du CO_{95%}-EA_{5%}-J. Cela signifie que la composition des textiles n'est pas le seul paramètre influençant la sorption en monocouche. Les autres échantillons à base de polyacrylate (PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I) prennent moins d'eau à la surface du matériau fibreux tandis que le PAN_{50%}-PET_{50%}-I constitué de 50 % de fibre PET présente de faibles valeurs ce qui est en concordance avec sa faible capacité à créer des liaisons hydrogènes avec l'eau (paramètre W important défini avec le modèle HH). Le textile PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I a un comportement intermédiaire à PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et à PAN_{50%}-PET_{50%}-I car il est constitué d'un fil de chaque textile. La quantité d'eau totale prise à l'extérieur du matériau (figure 3.16b) concerne celle prise en monocouche et en multicouche. Le classement des matières est similaire à la sorption en monocouche. Selon la figure 3.16c, la sorption au sein du matériau est négative pour l'ensemble des échantillons textiles sauf dans le cas de CO_{95%}-EA_{5%}-J et du PAN_{50%}-PET_{50%}-I présentant de faibles valeurs. Des valeurs négatives signifient que l'eau est facilement évacuée de l'intérieur vers l'extérieur (figures 2.13, 2.14, 2.15 et 2.16) en mouillant peu le textile. Dans le cas du CO_{95%}-EA_{5%}-J, l'humidité entrant au sein du matériau fait gonfler la fibre de coton et permet au textile d'emmagasiner une quantité importante d'humidité au sein de ce dernier. Ce textile présente un faible indice de transport R (annexe B.1) signifiant que l'humidité est peu évacuée vers l'extérieur et les molécules d'eau restent piégées au sein de la structure fibreuse. Le PAN_{50%}-PET_{50%}-I de par sa structure cristalline prend

peu d'humidité au sein du textile et celle-ci est transmise vers le milieu extérieur. Une analyse de Pearson est réalisée (tableau 3.23) pour déterminer les paramètres influençant la sorption en monocouche $M_{\text{monocouche}}$, à l'extérieur M_{externe} et à l'intérieur M_{interne} du matériau à 98 %HR. Les courbes de sorption monocouche et externe se coupent à une humidité qui est comprise entre 31 et 48 %HR pour l'ensemble des échantillons textiles selon les courbes de l'annexe C.8.

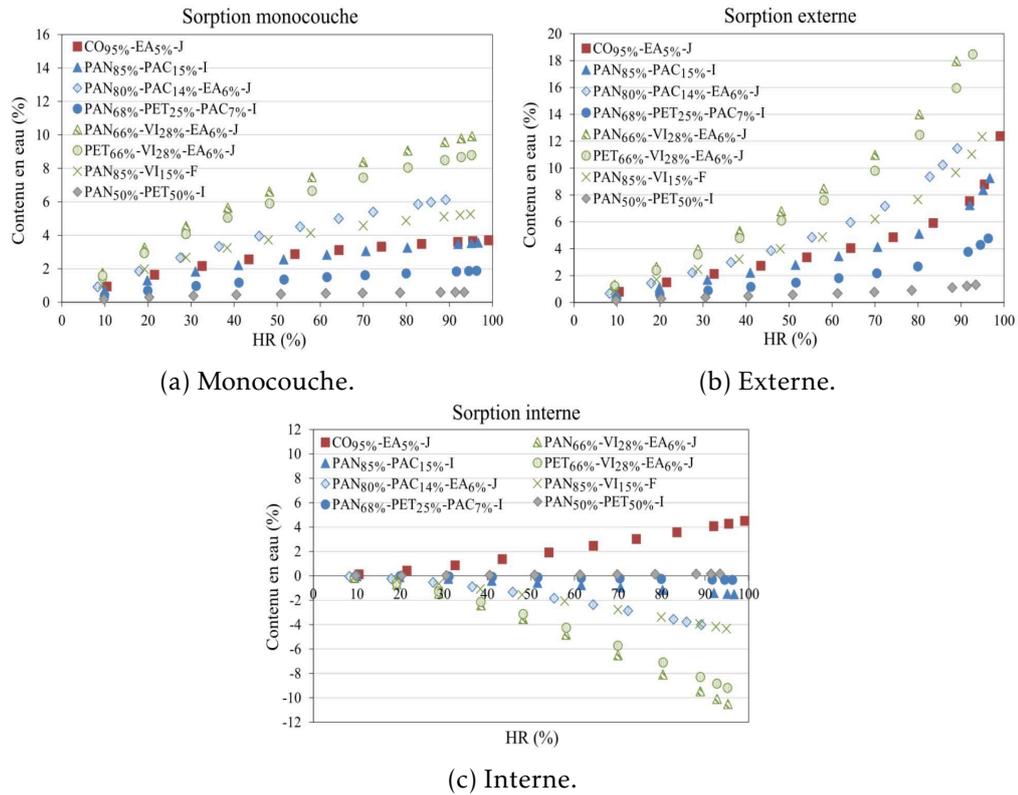


FIGURE 3.16 – Modèle de Young-Nelson : sorption monocouche, à l'extérieur et à l'intérieur du matériau textile.

Paramètres physiques	Palier HR	$M_{\text{monocouche}}$	M_{externe}	M_{interne}
Masse surfacique	-0,886	-0,747	-0,781	0,578
Épaisseur	-0,842	-0,873	-0,845	0,729
Masse volumique	-0,219	-0,014	0,147	0,335
Porosité	-0,456	-0,594	-0,404	0,733
Perméabilité à l'air	0,005	0,185	-0,005	-0,614
Taux de reprise en eau réel	0,382	0,383	0,562	0,136

TABLEAU 3.23 – Analyse de Pearson du modèle de Young-Nelson en sorption.

Le palier de transition HR entre la sorption monocouche et la sorption externe com-

prenant les molécules d'eau en liaison direct avec la fibre et celles liées par-dessus ces dernières est corrélé partiellement et négativement avec la masse surfacique et l'épaisseur. Pour les échantillons textiles présentant une épaisseur et une masse surfacique faible, ce palier de transition est mesuré à plus haute humidité avec une importante prise en eau à 98 %HR en monocouche ($M_{\text{monocouche}}$) et à l'extérieur du matériau (M_{externe}). Avec une épaisseur faible, la quantité de matière diminue et les sites de sorption sont facilement accessibles pour les molécules d'eau contrairement à un matériau épais où les sites sont plus difficiles d'accès par l'enchevêtrement des fibrilles à la surface de la fibre limitant la sorption en monocouche et en multicouche. Ainsi, pour des textiles avec une faible masse surfacique la sorption monocouche et externe sont plus importantes. Le paramètre (M_{interne}) est corrélé partiellement et positivement à l'épaisseur. Lorsque l'épaisseur du matériau augmente alors la quantité de matière et le nombre de sites disponibles à la sorption des molécules d'eau au sein des pores augmente.

3.1.3.5 Modèle de Park

Les paramètres A_L , K_H , K_a , n extraits du modèle de Park sont résumés dans le tableau 3.24 en sorption et dans le tableau 3.25 en désorption. Le Park présente une valeur de E% faible pour l'ensemble des échantillons textiles ce qui signifie que ce modèle est adapté à la modélisation des essais DVS. Le paramètre B_L ne peut être défini à cause du manque de valeurs disponibles en-dessous de $a_w = 0,1$.

Le paramètre A_L présente des valeurs importantes pour le textile CO_{95%}-EA_{5%}-J le très hydrophile et possédant davantage de sites de sorption disponibles pour les molécules d'eau contrairement au PAN_{50%}-PET_{50%}-I constitué de fibres hydrophobes présentant une valeur A_L très faible. Pour les autres paramètres, aucune corrélation apparente n'est obtenue avec les caractéristiques physiques du textile. Ainsi, une étude de Pearson est appliquée à ces données pour obtenir des informations complémentaires (tableaux 3.26 en sorption et 3.27 en désorption).

Échantillons textiles	Modèle de Park				
	A_L	K_H	K_a	n	E%
CO _{95%} -EA _{5%} -J	2,72	4,91	9,69	6,60	1,7
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	0,30	3,68	5,03	9,14	1,8
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	0,29	4,92	7,87	9,06	2,6
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	0,13	2,29	2,65	7,76	1,9
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,59	5,96	17,57	18,18	2,6
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,59	5,30	15,00	17,49	2,4
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	0,39	4,51	8,82	17,66	1,3
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$1,00 \times 10^{-10}$	1,28	0,74	14,04	4,6

TABLEAU 3.24 – Paramètres extraits du modèle de Park en sorption.

Échantillons textiles	Modèle de Park				
	A_L	K_H	K_a	n	E%
CO _{95%} -EA _{5%} -J	2,69	5,82	7,54	4,33	1,5
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	1,44	3,84	4,00	12,50	0,4
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	1,44	4,91	16,32	19,86	1,5
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	0,56	2,93	1,88	16,17	0,4
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,84	6,86	14,35	17,20	1,2
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,72	6,04	12,73	16,83	1,1
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	0,58	5,06	6,36	15,55	0,5
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$6,02 \times 10^{-5}$	0,81	0,73	0,86	2,8

TABLEAU 3.25 – Paramètres extraits du modèle de Park en désorption.

Paramètres physiques	A_L	K_H	K_a	n
Masse surfacique	-0,083	-0,784	-0,700	-0,209
Épaisseur	-0,114	-0,829	-0,866	-0,538
Masse volumique	0,792	0,093	0,207	-0,236
Porosité	0,368	-0,410	-0,505	-0,729
Perméabilité à l'air	-0,826	-0,181	0,015	0,544
Taux de reprise en eau réel	0,874	0,672	0,532	-0,353

TABLEAU 3.26 – Analyse de Pearson du modèle de Park en sorption.

Paramètres physiques	A_L	K_H	K_a	n
Masse surfacique	-0,186	-0,831	-0,568	-0,788
Épaisseur	0,035	-0,864	-0,674	-0,610
Masse volumique	0,505	0,144	0,043	-0,599
Porosité	0,511	-0,382	-0,424	-0,437
Perméabilité à l'air	-0,750	-0,189	-0,121	0,398
Taux de reprise en eau réel	0,915	0,700	0,487	0,005

TABLEAU 3.27 – Analyse de Pearson du modèle de Park en désorption.

Dans le cas de la sorption, A_L est corrélé négativement et partiellement à la perméabilité à l'air ainsi que positivement et partiellement au taux de reprise en eau et à la masse volumique. Ce paramètre représente le nombre de sites présent à la surface de la fibre et créant des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. Il augmente avec l'affinité de la fibre à capter et à emmagasiner des molécules d'eau car dans ce cas davantage de sites de sorption sont disponibles à la surface du textile. De plus, pour un textile plus compact possédant une densité ou une masse volumique plus importante, le nombre de sites disponibles représentés par le paramètre A_L augmente également. Lorsqu'un

matériau présente une perméabilité à l'air élevé, cela signifie que l'espace entre les fils augmente et que l'espace interfibre d'un fil compact diminue. Dans ce cas, une partie des molécules de vapeur d'eau vont passer à travers le textile sans être prises à la surface de la fibre et diminuer ainsi le nombre de sites de sorption utilisé. Les paramètres K_H et K_a sont corrélés négativement et partiellement avec la masse surfacique et l'épaisseur. Lorsque la compacité du textile augmente avec la masse surfacique et l'épaisseur, les molécules d'eau forment davantage de liaisons directes avec la fibre plutôt qu'entre elles. Ainsi, le nombre d'agrégats formé entre les molécules d'eau représenté par K_a diminue. La pente de l'isotherme de sorption diminue également car une quantité moins importante de molécules d'eau peuvent remplir les pores et les espaces vides interfibres. Le paramètre n est corrélé négativement et partiellement avec la porosité. Il représente le nombre de molécules d'eau regroupé entre elles et formant des agrégats. Pour un textile poreux, ce nombre diminue car celles-ci, de par leur faible énergie d'interaction entre molécules, sont plus mobiles et forment peu de liaisons avec le textile.

En désorption, le paramètre A_L est de nouveau corrélé partiellement et négativement avec la perméabilité à l'air et positivement avec le taux de reprise en eau. Contrairement au phénomène de sorption, la corrélation avec la masse volumique devient inexistante. Durant la sorption, la structure fibreuse évolue ainsi que le nombre de sites de sorption/désorption accessibles au sein du textile. Le paramètre K_H est comme précédemment corrélé partiellement et négativement à la masse surfacique et à l'épaisseur tandis que pour K_a ce n'est plus le cas. Le paramètre n , quant à lui, est maintenant corrélé partiellement et négativement à la masse surfacique. Le nombre de molécules d'eau par agrégat diminue avec l'augmentation de la masse surfacique. En effet, davantage de molécules d'eau forment des liaisons directes avec la fibre plutôt qu'entre molécules car lors de la sorption, la structure fibreuse évolue et des sites de sorption qui étaient auparavant inaccessibles deviennent maintenant accessibles.

3.1.3.6 Conclusion

Suite à la modélisation des essais DVS, les mécanismes de sorption des molécules de vapeur d'eau sont différents selon la composition des échantillons textiles (avec polyacrylate, viscose, échantillons très hydrophile et très hydrophobe).

Échantillons contenant du polyacrylate

Selon le modèle PEK, à faible humidité, le processus rapide prédomine pour deux des matières PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I. Pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J seulement le processus lent prédomine sur l'ensemble des paliers d'humidité. Au-delà de 60 %HR, la sorption est principalement réalisée au sein de la structure fibreuse sur les sites difficiles d'accès (mécanisme lent). Les écarts mesurés pour le contenu en eau entre les deux mécanismes (rapide et lent) sont plus importants comparés aux matières contenant de la viscose. Pour les modèles HH et de Young-Nelson, les paliers HR de transition entre la sorption monocouche et multicouche sont compris entre 41 et 53 %HR. La quantité d'eau prise en monocouche définie par les modèles de BET,

BET modifié et GAB est comprise entre 0,75 et 2,64. Ces valeurs sont en concordances avec le nombre de sites disponibles pour la sorption des molécules d'eau (W et A_L). La figure 3.17 résume l'ensemble des informations issues des modèles permettant de décrire la sorption en eau des échantillons contenant du polycarylate.

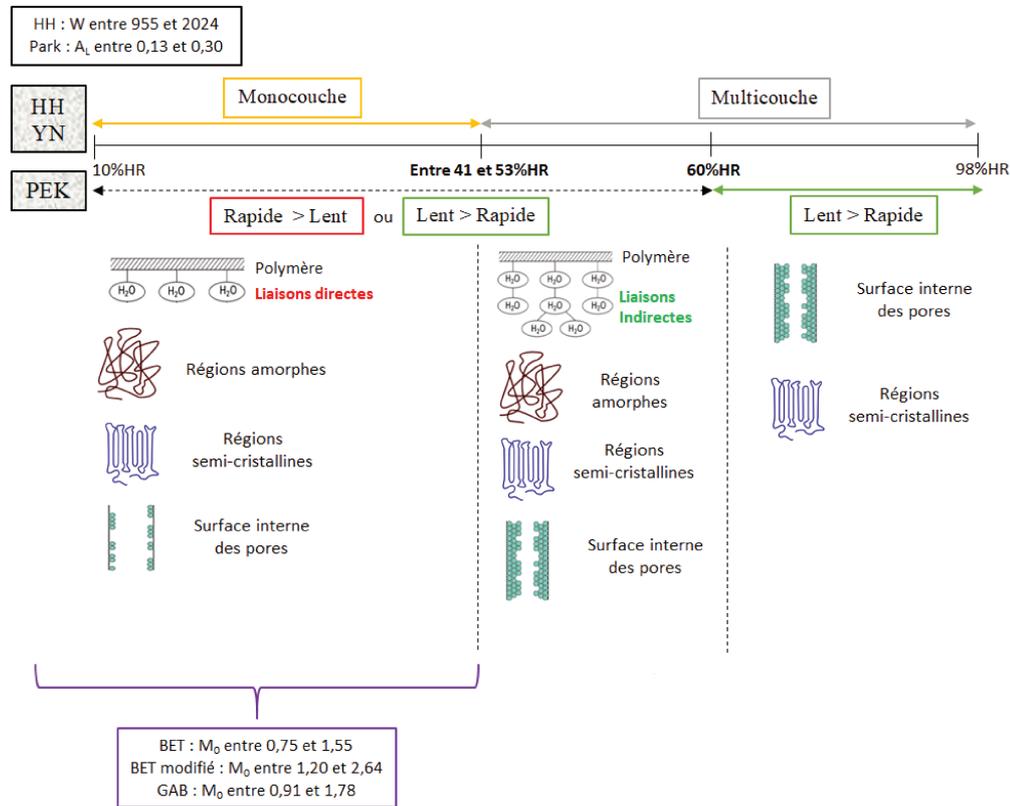


FIGURE 3.17 – Résumé des mécanismes de sorption des échantillons contenant des fibres de polyacrylate.

Échantillons contenant de la viscosse

Pour le modèle de PEK, lors de la sorption et à faible humidité, le textile ou les fils prennent la même quantité d'eau à la surface et au sein de la structure fibreuse. Aux $HR > 40\%$, le mécanisme rapide correspondant à la sorption au niveau des sites faciles d'accès prédomine. Cependant, les variations de masse du textile mesurées pour chacun des mécanismes restent proche; c'est-à-dire qu'une quantité non négligeable d'eau est également emmagasinée par l'échantillon textile sur les sites de sorption plus difficilement accessibles (pores, cavités, surface des cristallites). Lors de la désorption, le mécanisme prédominant est celui dit rapide pour les matières contenant de la viscosse. Les modèles HH et de Young-Nelson montrent que la transition entre la sorption dite monocouche et multicouche s'effectue entre 53 et 56 %HR. Le nombre de sites de sorption disponibles pour créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau

est supérieur aux échantillons contenant du polyacrylate (W et A_L). Les modèles de BET, BET modifié et GAB estiment que la quantité d'eau prise en monocouche se situe entre 1,47 et 2,80. En sorption pour les matières contenant de la viscose, le résumé de l'ensemble des modèles est représenté selon la figure 3.18.

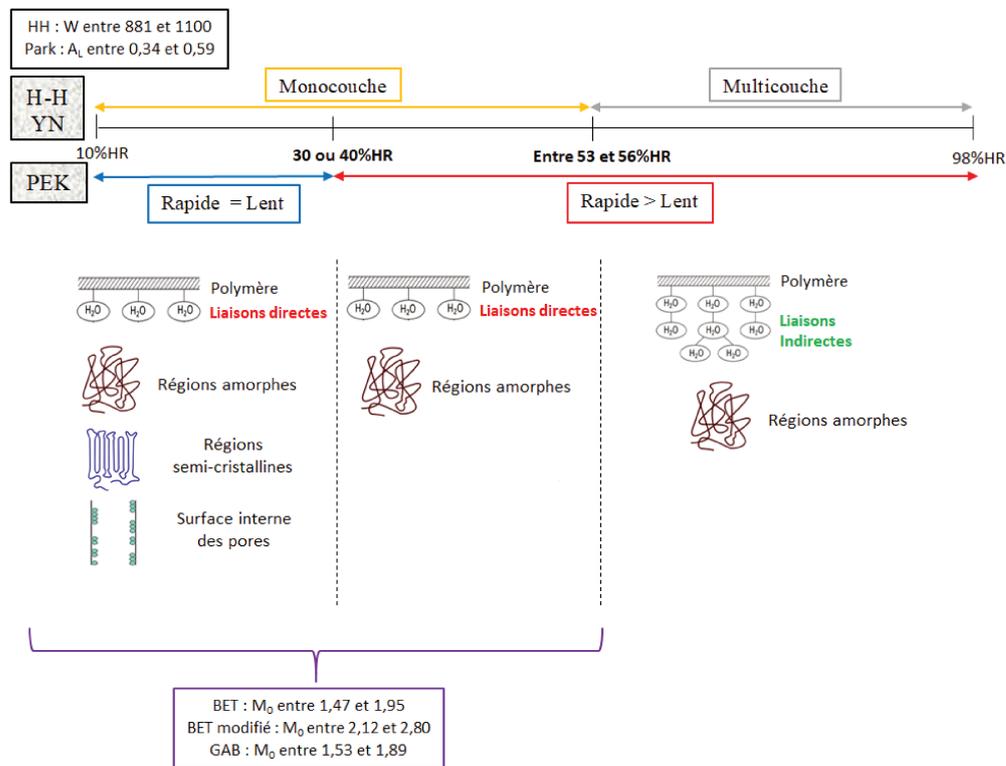


FIGURE 3.18 – Résumé des mécanismes de sorption des échantillons contenant des fibres de viscose.

Autres échantillons

Selon le modèle de PEK, lors de la sorption et de la désorption, le mécanisme dit rapide prédomine de manière significative sur l'ensemble des paliers HR. Pour les modèles HH et de Young-Nelson, les paliers de transition sont situés entre 31 et 55 %HR. La quantité de sites disponibles pour la sorption des molécules d'eau est très importante dans le cas du $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ et faible pour $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$. Les modèles de BET, BET modifié et de GAB estiment une quantité d'eau prise en monocouche située entre 2,65 et 3,88 pour le $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ et entre 0,39 et 0,57 pour le $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$. L'ensemble des données issues des modèles étudiés est résumé dans la figure 3.19 dans le cas de la sorption pour les échantillons $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ et $PAN_{50\%}-PET_{50\%}-I$.

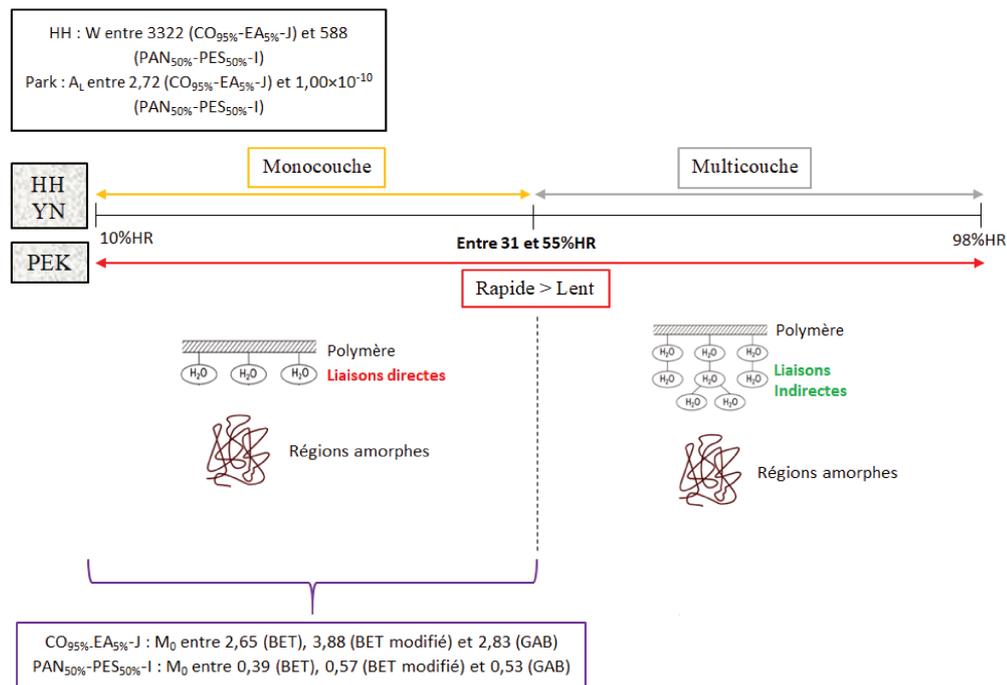


FIGURE 3.19 – Résumé des mécanismes de sorption des échantillons CO_{95%}-EA_{5%}-J et PAN_{50%}-PET_{50%}-I.

3.2 Réalisation d'un banc de mesure, essais en dynamique

Les travaux suivants se focalisent sur l'étude de la gestion hydrique des matériaux. Le but est de développer un système qui permet de mesurer les transferts hydriques à travers les textiles en se rapprochant des conditions réelles au porté. La lame d'air présente entre la peau et le textile est le lieu de nombreux échanges hydriques et thermiques entre le corps et l'environnement extérieur. Cette lame d'air appelée microclimat impacte le confort des vêtements. D'après la littérature, la résistance thermique, la résistance à la vapeur d'eau et le taux de transmission de la vapeur d'eau (WVTR) des textiles mesurés avec une lame d'air (épaisseur comprise entre 5 et 10 mm) sont supérieurs à ceux n'en comportant pas (MACRAE, LAING et WILSON 2011 ; A. DAS, ALAGIRUSAMY et al. 2012 ; LAING et al. 2010 ; HES et ARAUJO 2010). Le microclimat est rarement modélisé par les appareils décrits dans la littérature. Par ailleurs, les échanges entre notre corps et l'environnement sont rarement statiques ; ils fluctuent continuellement au cours de la journée. Il est alors nécessaire que le dispositif utilisé permette d'étudier la réponse dynamique des textiles lorsque l'humidité environnante fluctue. Cet outil a pour ambition d'être un support et une aide à la décision dans l'élaboration de nouveaux mélanges fibreux.

Pour répondre à ces contraintes, le choix a été d'instrumenter le Skin Model existant en lui ajoutant un module supplémentaire appelé cadre dans la suite de l'étude.

3.2.1 Construction du banc de mesure

La structure et l'instrumentation du cadre sont décrits dans cette partie.

3.2.1.1 Réalisation du cadre

Le cadre d'une taille de $322 \times 322 \text{ mm}^2$ (figure 3.20) est positionné sur la plaque chauffante gardée transpirante du Skin Model. Il est fabriqué en aluminium pour permettre l'homogénéisation des flux de chaleur à l'intérieur de sa structure et se décompose en trois parties. La première partie consiste en une plaque inférieure fixée à la plaque centrale par des vis. Comme le test est réalisé en isotherme, la plaque inférieure va empêcher les fuites de vapeur ou d'eau liquide en-dessous du cadre. Au sommet de la plaque centrale dévidée, un filet de polyéthylène comportant des ouvertures de $2 \times 2 \text{ cm}^2$ est positionné dans le but de maintenir le textile à plat en évitant l'effet « ventre ». La hauteur de la plaque centrale (10 mm) correspond à l'épaisseur du microclimat où les échanges hydriques ont lieu. Les capteurs d'humidité sont positionnés à l'intérieur de la plaque centrale. Des supports en composites, constitués de fibres végétales et de polymères imperméables à l'eau, sont posés sur la surface de la plaque inférieure et maintiennent les capteurs en position (figure 3.21). Un passage pour le raccordement des capteurs a été créé à l'extrémité droite de la plaque centrale. Une fois le textile mis en position sur le grillage, un couvercle est positionné sur celui-ci pour limiter le passage des flux hydriques sur les côtés. Afin d'assurer l'étanchéité totale du système, des joints d'isolation en caoutchouc sont collés sur la surface supérieure de la plaque centrale et sous le couvercle. Des vis maintiennent le couvercle en position et leur serrage assure le contact entre les joints. Dans le but de limiter le passage de l'humidité à travers les vis, leurs têtes sont recouvertes d'un ruban adhésif. Un flux d'air de 1 m.s^{-1} passe horizontalement à la surface du système.

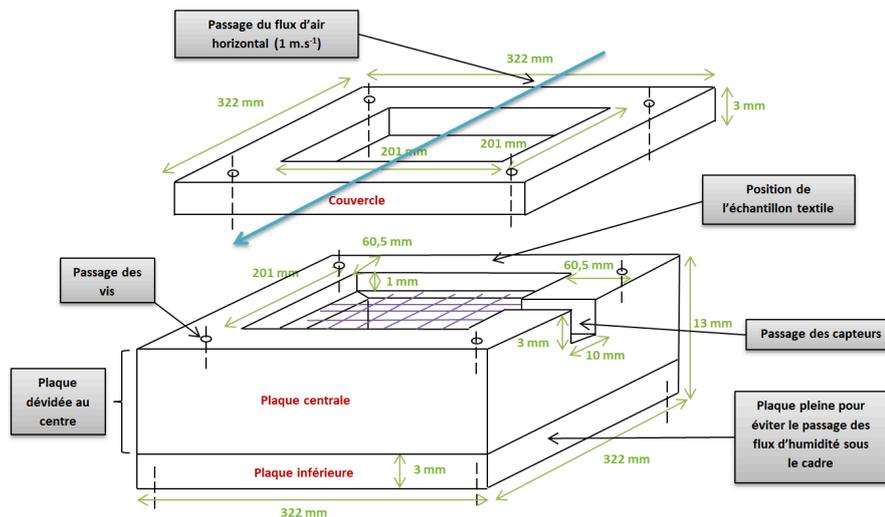


FIGURE 3.20 – Représentation schématique du cadre.

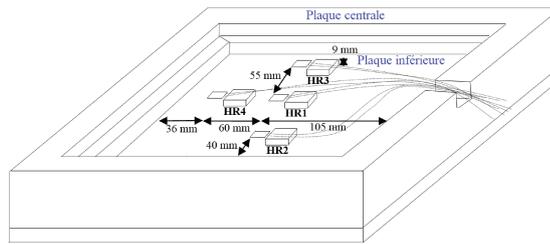


FIGURE 3.21 – Position des capteurs à la surface de la plaque inférieure.

3.2.1.2 Instrumentation du cadre

Choix des capteurs

En fonction des conditions d'utilisation, il est nécessaire de choisir un capteur d'humidité permettant de mesurer le plus précisément possible les flux hydriques. Ce capteur doit être également robuste dans le temps. Différents capteurs d'humidité existent tels que les capteurs d'humidité résistif, capacitif et à conductivité thermique.

- Capteurs d'humidité résistif

Les capteurs d'humidité résistif sont classés en deux catégories, i.e., types 1 et 2.

(a) Type 1

Le capteur RH (figure 3.22), permettant d'évaluer l'humidité dans l'air, est connecté à une alimentation de 5 V. Il est composé d'un substrat (céramique) recouvert avec une électrode métallique et d'un polymère hygroscopique. La résistance R_T est connectée à la masse. Quand le capteur absorbe l'humidité, des groupes ioniques se dissocient et augmentent sa conductivité électrique. Par conséquent, la tension de sortie entre les deux résistances varie également (PoBot 2015; GoTRONIC 2015; CONRAD 2016).

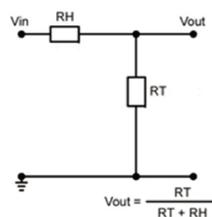


FIGURE 3.22 – Capteur résistif de type 1 (GoTRONIC 2015).

(b) Type 2

Un élément sensible (figure 3.23a) composé de plusieurs couches de matériaux, est intégré à un circuit électrique selon la figure 3.23b. Le principe de fonctionnement de ce système est le même que pour le type 1 (TEXAS 2015).

Le tableau 3.28 résume les avantages et inconvénients des capteurs d'humidité résistif.

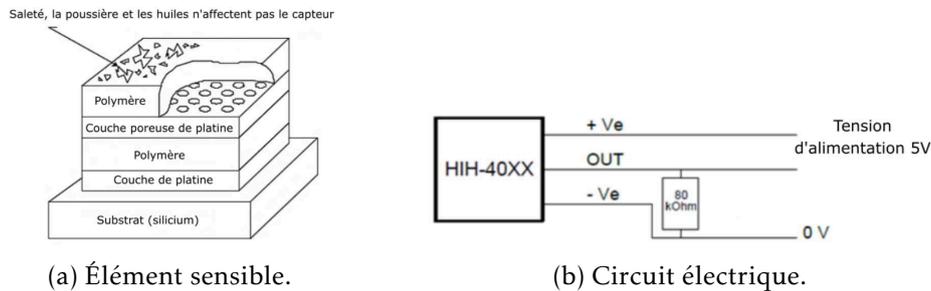


FIGURE 3.23 – Capteur résistif de type 2 (adaptée de TEXAS 2015).

Capteur d'humidité résistif	
Avantages	Petite taille. Faible coût. Stabilité à long terme.
Inconvénients	Sensible à la condensation et aux larges variations de température. Précision moyenne : entre ± 3 et 5 %HR.

TABLEAU 3.28 – Avantages et inconvénients des capteurs d'humidité résistif (TEXAS 2015; GoTRONIC 2015).

• Capteurs d'humidité capacitif

Un capteur d'humidité capacitif est constitué de différents éléments (figure 3.24), une lame de polymère hygroscopique (absorbe l'humidité) et de deux électrodes métalliques poreuses. L'ensemble fonctionne comme un condensateur. Lorsque le polymère absorbe les molécules d'eau, son volume augmente ainsi que la distance entre les électrodes. Cela engendre la variation de la capacité du condensateur (MORELL 2016). Le tableau 3.29 résume les avantages et les inconvénients de ce type de capteur.

Capteur d'humidité capacitif	
Avantages	Résiste à la condensation, à l'usure, aux produits chimiques. Très bonne précision de ± 2 %HR.
Inconvénients	Stabilité à long terme limitée.

TABLEAU 3.29 – Avantages et inconvénients des capteurs d'humidité capacitif (MORELL 2016).

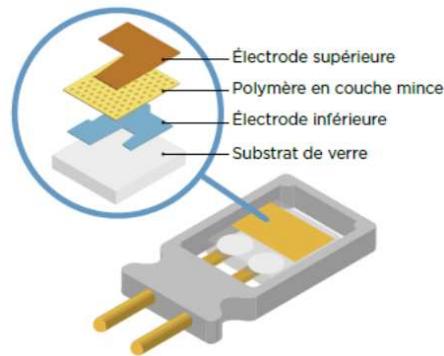


FIGURE 3.24 – Capteur capacitif (adaptée de MORELL 2016).

- Capteurs d'humidité à conductivité thermique

Ce capteur est constitué de deux thermistors. L'un est enfermé hermétiquement dans de l'azote sec et l'autre est exposé à l'atmosphère environnante (figure 3.25). La différence de résistance entre les deux thermistors engendre une tension proportionnelle à l'humidité mesurée (MORELL 2016; OHMIC 2015). Les avantages et les inconvénients de ce capteur sont résumés dans le tableau 3.30.

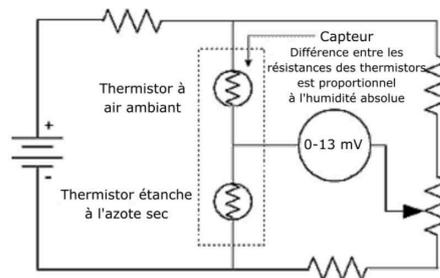


FIGURE 3.25 – Capteurs d'humidité à conductivité thermique (adaptée de OHMIC 2015).

Capteur d'humidité à conductivité thermique	
Avantages	Principalement utilisé aux hautes températures. Résistant aux vapeurs chimiques. Précision de $\pm 0,5\%HR$ à $100\text{ }^\circ\text{C}$.
Inconvénients	Précision de $\pm 5\%HR$ à $40\text{ }^\circ\text{C}$. Sensible aux gaz dont les propriétés thermiques sont différentes de l'azote sec.

TABLEAU 3.30 – Avantages et inconvénients des capteurs d'humidité à conductivité thermique (OHMIC 2015).

- Capteur retenu

Initialement, les capteurs capacitif ont été choisis pour instrumenter le cadre car ceux-ci présentent une bonne précision à $\pm 2\%$ HR. Cependant, la robustesse de ces capteurs dans le temps est limitée. Les capteurs d'humidité résistif ont finalement été sélectionné pour répondre à l'ensemble des critères nécessaire aux conditions d'essai. Ils permettent de mesurer avec une précision moyenne l'humidité, de dimension réduite et avec une bonne stabilité à long terme (5%HR). Les capteurs EFS-10 (Conrad, France) représentés en figure 3.26 sont utilisés pour l'instrumentation du cadre.



FIGURE 3.26 – Photographie du capteur d'humidité résistif EFS-10 (CONRAD 2016).

Mise en place des capteurs

Le cadre est équipé de quatre capteurs d'humidité résistif EFS-10 de Conrad®. L'impédance du capteur varie entre 1,5 k Ω et 3 M Ω . Cette variation est mesurée en plaçant le capteur dans un circuit électrique, illustré à la figure 3.27, alimenté par un générateur basse fréquence réglé à 1 kHz. Les autres résistances ont une impédance fixe de 100 k Ω . Le signal alternatif (AC) est récupéré par un dispositif d'acquisition Keithley. La plage de mesure de ces capteurs se situe entre 20 et 90 %HR avec un temps de réponse de 12 secondes.

Calibration des capteurs

Avant le test, les capteurs doivent être étalonnés. Cette étape est réalisée en utilisant comme référence une sonde d'humidité capacitive Testo 435 de Conrad®. Sa précision de mesure est de 3 %HR. Dans une chambre climatique, le capteur positionné le plus près possible de la sonde est soumis à différents paliers d'humidités de 40 à 90 %HR avec un pas de 10 %HR. A partir des données récupérées par les logiciels exceLINUX (capteurs d'humidité) et Testo Comfort X35, une équation d'étalonnage spécifique à chaque capteur est définie comme dans le cas du capteur HR1 (figure 3.28). Cette équation polynomiale de degré quatre relie la tension mesurée dans le circuit électrique avec l'humidité ambiante de l'enceinte climatique.

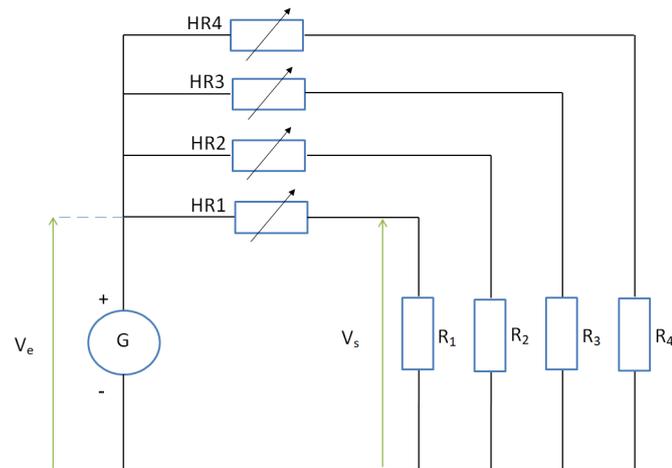


FIGURE 3.27 – Schéma électrique.

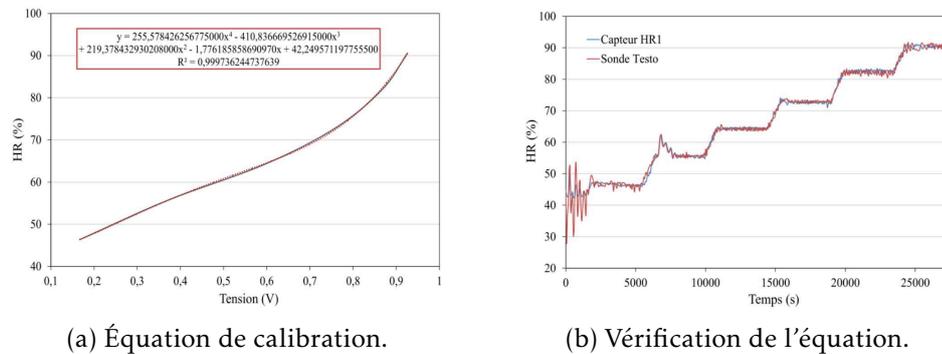


FIGURE 3.28 – Exemple d'équation de calibration calculé pour le capteur HR1.

3.2.2 Protocoles de caractérisation

Deux protocoles ont été développés avec le cadre. Le premier étudie le transfert forcé du passage de la vapeur d'eau à travers le textile en faisant varier les conditions d'humidité du milieu (chambre climatique), tandis que le second mesure le passage de la vapeur d'eau à travers le tricot suite à l'évaporation de l'eau liquide en contact avec la plaque inférieure.

3.2.2.1 Protocole 1 : transfert forcé de la vapeur d'eau

Le test est réalisé en isotherme pour mesurer uniquement les flux de vapeur d'eau traversant le textile. La température est fixée à 35 °C et représente celle définie à la surface de la peau. En utilisant une chambre climatique, un échantillon textile est soumis à une rampe d'humidité de 40 à 90 %HR avec une vitesse de 10%.min⁻¹ pour simuler une transpiration soudaine. Avant et après cette rampe, des paliers à 40 et 90 %HR,

respectivement d'une durée de une heure, sont réglés. Ce protocole est utilisé pour tester l'effet barrière en dynamique des textiles au passage d'un flux de vapeur d'eau selon la figure 3.29. Si un textile laisse passer la vapeur d'eau, la rampe d'humidité obtenue dans le microclimat suit celle de la chambre climatique, de sorte que le textile a peu d'influence sur le flux de vapeur d'eau. Dans le cas contraire, l'humidité à l'intérieur du microclimat est inférieure à celle de la chambre climatique et les molécules de vapeur d'eau mettent davantage de temps à traverser le textile. Les capteurs sont placés dans le cadre à la surface de la plaque inférieure. Différents tricots de nature (polyester, coton, etc.) et de contexture (jersey, interlock 1 × 1) différents ont été testés avec ce dispositif. L'analyse des mesures est effectuée au moyen du logiciel TableCurve en modélisant les résultats par une sigmoïde (figure 3.30). La pente caractérisant la vitesse de transfert des molécules d'eau à travers le textile est mesurée ainsi que le temps T_1 représentant le point de départ du phénomène linéaire. Un même échantillon a été caractérisé trois fois car au-delà les matières contenant du PET se dégradent.

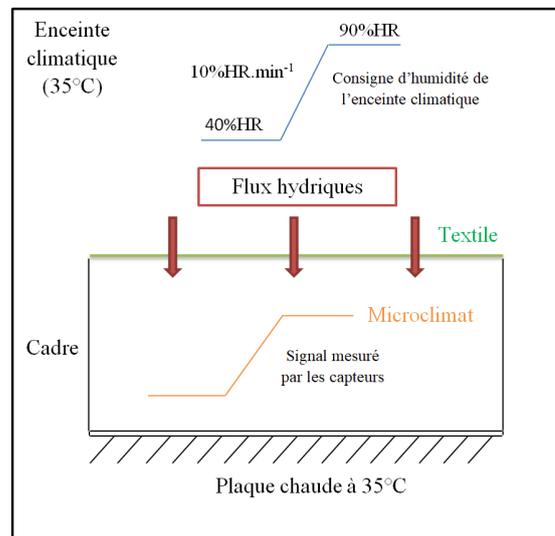


FIGURE 3.29 – Schéma explicatif du protocole 1.

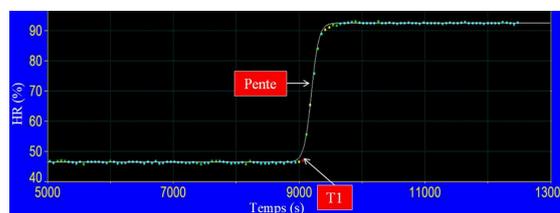


FIGURE 3.30 – Modélisation des essais en sigmoïde.

3.2.2.2 Protocole 2 : évaporation de l'eau liquide

Un second protocole est proposé pour obtenir des informations supplémentaires sur le comportement hydrique des textiles. Contrairement au protocole 1, les échanges hydriques ne sont pas forcés. 80 ml d'eau liquide est inséré au fond du cadre au niveau de la plaque inférieure. L'environnement de l'enceinte climatique est réglé à (35 °C, 40 %HR). L'évaporation de l'eau sous forme vapeur est mesurée par les capteurs d'humidité résistif (figure 3.31) et les flux hydriques sont réalisés dans le sens opposé au protocole 1.

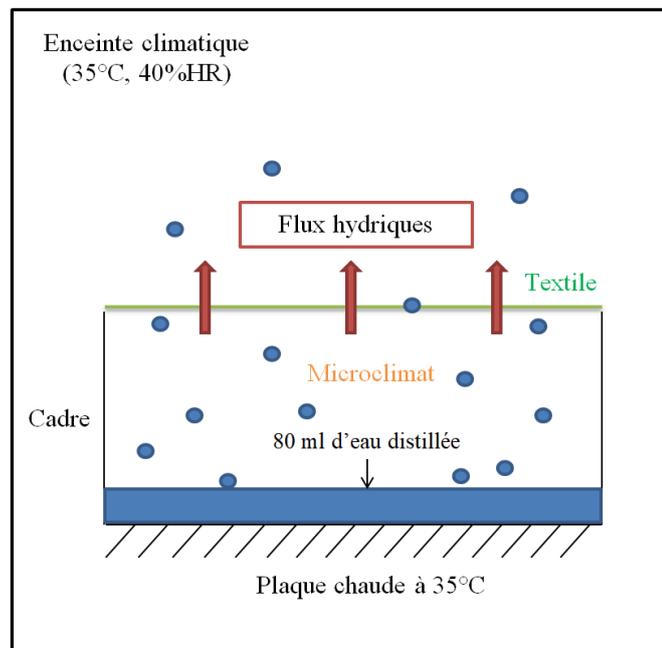


FIGURE 3.31 – Schéma explicatif du protocole 2.

3.2.3 Résultats et interprétation

3.2.3.1 Protocole 1

Reproductibilité du protocole

Pour définir la reproductibilité des données, les tests sont répétés trois fois et le coefficient de variation (CV%) calculé permet de montrer les variations des résultats obtenus. Une valeur de CV% inférieure à 10 % est considérée comme correcte. Selon les tableaux 3.31, 3.32, 3.33 et 3.34, les vitesses de transfert d'humidité et le temps T_1 mesurés avec le protocole ont un CV% inférieur à 10 %. Cela signifie que les résultats obtenus sont reproductibles et que le protocole mis en place est validé.

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne pente (%HR.min ⁻¹)
CO _{95%} -EA _{5%} -J CV%	7,9 ± 0,1 0,1	7,6 ± 0,1 0,1	8,8 ± 0,1 0,1	8,5 ± 0,3 0,3	8,1 ± 0,5 0,5
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9,3 ± 0,1 1,4	9,0 ± 0,3 3,0	9,8 ± 0,1 1,6	9,6 ± 0,2 1,7	9,2 ± 0,3 3,5
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J CV%	9,2 ± 0,1 1,6	9,3 ± 0,1 1,0	9,7 ± 0,2 2,0	9,8 ± 0,1 1,6	9,5 ± 0,3 3,2
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8,7 ± 0,1 1,7	8,4 ± 0,1 1,3	9,4 ± 0,2 1,9	9,3 ± 0,1 0,5	9,0 ± 0,4 4,9
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8,3 ± 0,2 2,1	8,2 ± 0,2 2,4	9,0 ± 0,2 2,2	8,9 ± 0,1 1,5	8,6 ± 0,4 4,5
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9,1 ± 0,4 3,1	8,2 ± 0,3 2,9	10,1 ± 0,3 3,4	9,2 ± 0,3 3,0	9,1 ± 0,7 8,3
PET _{95%} -EA _{5%} -J CV%	10,3 ± 0,1 0,4	10,5 ± 0,1 0,4	10,4 ± 0,1 0,4	10,7 ± 0,1 0,6	10,5 ± 0,1 1,4

TABLEAU 3.31 – Résultats des pentes mesurées avec le cadre pour les textiles jersey.

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne pente (%HR.min ⁻¹)
CO _{100%} -I CV%	7,9 ± 0,3 3,9	7,4 ± 0,3 4,6	8,6 ± 0,3 3,9	8,7 ± 0,3 4,0	8,0 ± 0,6 7,4
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I CV%	9,3 ± 0,5 5,1	9,1 ± 0,5 5,8	9,5 ± 0,4 4,8	9,7 ± 0,3 3,6	9,3 ± 0,4 4,8
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I CV%	10,0 ± 0,3 2,7	9,8 ± 0,3 3,1	10,1 ± 0,2 1,8	10,3 ± 0,2 2,2	10,2 ± 0,3 2,7
PAN _{50%} -PET _{50%} -I CV%	10,3 ± 0,1 1,5	10,3 ± 0,1 1,5	10,3 ± 0,2 1,6	10,7 ± 0,2 1,9	10,4 ± 0,2 2,1

TABLEAU 3.32 – Résultats des pentes mesurées avec le cadre pour les textiles interlock 1 × 1.

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne T_1 (s)
CO _{95%} -EA _{5%} -J CV%	9037 ± 29 0,3	9033 ± 29 0,3	9045 ± 29 0,3	9040 ± 27 0,3	9039 ± 27 0,3
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9027 ± 44 0,5	9026 ± 44 0,5	9034 ± 44 0,5	9015 ± 57 0,6	9026 ± 47 0,5
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J CV%	9016 ± 63 0,7	9017 ± 64 0,7	9023 ± 65 0,7	9015 ± 68 0,8	9018 ± 56 0,6
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8997 ± 58 0,6	8996 ± 59 0,6	9006 ± 59 0,7	8997 ± 63 0,7	8999 ± 51 0,6
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	9007 ± 61 0,7	9009 ± 65 0,7	9014 ± 61 0,7	9004 ± 64 0,7	9009 ± 54 0,6
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9045 ± 62 0,7	9034 ± 61 0,7	9039 ± 62 0,7	9032 ± 61 0,7	9038 ± 57 0,6
PET _{95%} -EA _{5%} -J CV%	9090 ± 25 0,3	9091 ± 25 0,3	9095 ± 25 0,3	9089 ± 24 0,3	9091 ± 22 0,2

TABLEAU 3.33 – Résultats des temps T_1 mesurés avec le cadre pour les textiles jersey.

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne T_1 (s)
CO _{100%} -I CV%	9038 ± 47 0,5	9040 ± 45 0,5	9044 ± 43 0,5	9033 ± 45 0,5	9039 ± 44 0,5
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I CV%	9041 ± 38 0,4	9041 ± 39 0,4	9050 ± 38 0,4	9041 ± 39 0,4	9043 ± 38 0,4
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I CV%	9045 ± 51 0,6	9046 ± 51 0,6	9053 ± 52 0,6	9044 ± 52 0,6	9047 ± 50 0,5
PAN _{50%} -PET _{50%} -I CV%	9067 ± 13 0,1	9068 ± 14 0,1	9074 ± 13 0,1	9065 ± 13 0,1	9068 ± 12 0,1

TABLEAU 3.34 – Résultats des temps T_1 mesurés avec le cadre pour les textiles interlock 1 × 1.

Influence de l'emplacement des capteurs

Les analyses statistiques sont effectuées avec le logiciel R 3.4.1. Le test t pour les échantillons appariés est appliqué aux données obtenues (pentes) pour tous les échantillons textiles testés. Ce test permet d'analyser si les différences de mesures observées entre les capteurs sont significatives ou non en fonction de leur emplacement. Avant d'effectuer ce test, la symétrie des données est vérifiée pour chaque capteur au moyen d'un histogramme, en calculant la moyenne et la médiane. Lorsque la moyenne et la médiane sont proches et que les données visibles sur l'histogramme sont symétriques par rapport au plan médian alors la distribution suit potentiellement une loi normale. Pour affirmer cette supposition, il faut également tracer les résidus (droite de Henry), calculer les tests de Shapiro et de Kolmogorov-Smirnov. Si le paramètre de probabilité

p calculé est supérieur à 0,05, l'hypothèse H_0 est vérifiée signifiant que la distribution est normale. Dans le cas contraire ($p < 0,05$) l'hypothèse alternative est confirmée, la distribution ne suit pas une loi normale. Si la distribution normale n'est pas vérifiée, le test de Friedman sera appliqué. Ce test est utilisé pour déterminer si la distribution d'au moins un capteur est différente des autres. Dans ce cas, deux hypothèses sont exprimées en fonction du paramètre p calculé. Si $p > 0,05$, l'hypothèse nulle H_0 affirmant que la distribution des capteurs est équivalente est vérifiée. Si $p < 0,05$, l'hypothèse nulle est rejetée et l'hypothèse alternative H_1 affirmant qu'au moins un capteur a une distribution différente des autres capteurs est établie.

- Mesure des pentes

Selon le tableau 3.35, les moyennes et les médianes de chaque capteur sont équivalentes, les valeurs obtenues sont proches. Cependant, d'après les histogrammes et les droites de Henry (annexe D.5), les données ne semblent pas suivre une distribution normale. Elles ne sont pas symétriques sur l'histogramme et ne forment pas une droite sur le graphique de la droite de Henry. Pour les tests de Shapiro et de Kolmogorov-Smirnov, l'hypothèse H_0 consiste à affirmer que les données suivent une distribution normale ($p > 0,05$) et l'hypothèse alternative signifie le contraire ($p < 0,05$). Dans notre cas, la valeur p du test de Shapiro est supérieure à 0,05 uniquement pour le capteur HR4, ce qui indique que la distribution est normale pour celui-ci (hypothèse H_0). Dans le cas du test de Kolmogorov-Smirnov, les distributions des capteurs ne suivent pas une distribution normale car le p mesuré est inférieur à 0,05. Le test Shapiro est sensible à la taille de l'échantillon. Lorsque le nombre d'échantillons est faible, ce test est moins significatif et l'hypothèse H_0 a tendance à être acceptée. Sinon, pour un grand nombre d'échantillons textiles, H_0 sera plus facilement rejeté. Ainsi, il est toujours préférable d'utiliser ce test avec un autre pour confirmer les résultats obtenus. Dans notre cas, la taille de l'échantillon est petit ce qui explique pourquoi H_0 est accepté pour le capteur HR4 contrairement au test de Kolmogorov-Smirnov. Les conclusions reçues par les deux tests sont différentes dans le cas du capteur HR4, ainsi de manière générale l'ensemble des données ne suit pas une distribution normale. Dans ce cas, le test de Friedman est appliqué. La valeur p obtenue pour celle-ci est inférieure à 0,05 et l'hypothèse H_0 (les distributions sont équivalentes) est rejetée. Ainsi, au moins un capteur a une distribution différente de celle des autres capteurs. Cela signifie que la position des capteurs dans le microclimat a un impact sur la mesure des flux hydriques. La boîte à moustache des mesures de pente est tracée pour visualiser la distribution des données calculées pour chaque capteur. La précision des capteurs est de $\pm 5\%$ HR et la différence observée sur le graphique (figure 3.32a) est inférieure à cette sensibilité. Par conséquent, la vitesse moyenne de transfert d'humidité mesurée par les capteurs et pour chaque textile est utilisée dans la suite de l'étude. L'impact de l'emplacement des capteurs sur les mesures obtenues est négligé en raison de la sensibilité de mesure de ces derniers.

- Mesure des temps T_1

Le calcul des moyennes, médianes (tableau 3.36) et le tracé des droites de Henry et des histogrammes par capteur (figure en annexe D.6) indiquent que les distributions des temps mesurés ne suivent pas une loi normale. Les valeurs de $p < 0,05$ pour les tests de Shapiro et de Kolmogorov-Smirnov confirment ces résultats. Ainsi, le test de Friedman est appliqué par la suite pour étudier l'équivalence des distributions. Pour ce test, l'hypothèse H_0 est rejetée. L'hypothèse alternative indique qu'au moins un capteur présente une distribution différente des autres capteurs. D'après le graphique (figure 3.32b), la différence observée entre les capteurs est faible. Pour la suite de l'étude, la moyenne des temps T_1 de chaque capteur est utilisée.

Capteurs	HR1	HR2	HR3	HR4
Moyenne (%HR.min ⁻¹)	9,01	8,62	9,58	9,44
Médiane (%HR.min ⁻¹)	9,14	8,54	9,65	9,39
Test de Shapiro	$p = 0,012$	$p = 0,023$	$p = 0,002$	$p = 0,087$
Test de Kolmogorov-Smirnov	$p = 5,439 \times 10^{-13}$	$p = 1,201 \times 10^{-11}$	$p = 8,515 \times 10^{-14}$	$p = 8,773 \times 10^{-13}$
Test de Friedman	$p < 2,200 \times 10^{-16}$			

TABLEAU 3.35 – Résultats statistiques des pentes mesurées.

Capteurs	HR1	HR2	HR3	HR4
Moyenne (s)	9040	9039	9045	9036
Médiane (s)	9054	9052	9058	9049
Test de Shapiro	$p = 0,015$	$p = 0,012$	$p = 0,002$	$p = 0,001$
Test de Kolmogorov-Smirnov	$p < 2,200 \times 10^{-16}$	$p < 2,200 \times 10^{-16}$	$p < 2,200 \times 10^{-16}$	$p < 2,200 \times 10^{-16}$
Test de Friedman	$p < 2,200 \times 10^{-16}$			

TABLEAU 3.36 – Résultats statistiques des temps T_1 .

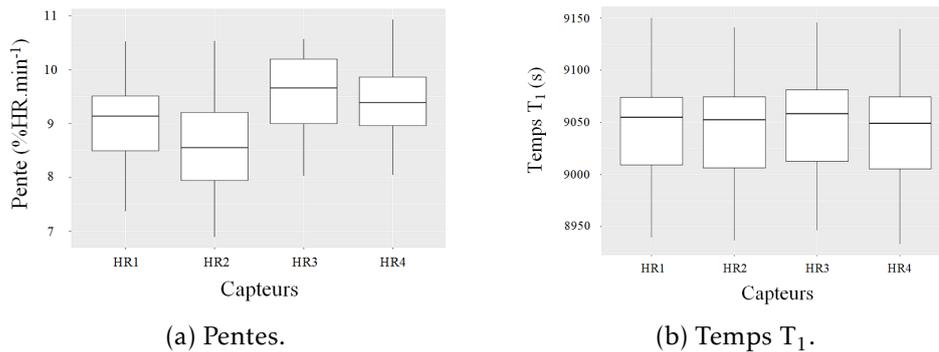


FIGURE 3.32 – Boîte à moustaches de la distribution des pentes et des temps T_1 mesurés par capteur.

Influence des propriétés physiques et thermo-hydriques

L'influence des paramètres physiques et thermo-hydriques des textiles (annexe A.2) sur la pente et le temps T_1 a été étudié en appliquant deux modèles de régression linéaire multiple, respectivement les modèles 1 et 2.

- Modèle 1

Le premier modèle étudie l'impact des paramètres physiques des textiles sur la pente et le temps T_1 . La régression linéaire du modèle 1 est définie selon l'équation 3.36.

$$Y_{\text{Pente ou } T_1} = \beta_0 + \beta_1 \times X_{\text{Masse surfacique}} + \beta_2 \times X_{\text{Épaisseur}} + \beta_3 \times X_{\text{Taux de reprise en eau réel}} + \beta_4 \times X_{\text{Contexture Jersey}} \quad (3.36)$$

Avec β_0 l'ordonnée à l'origine, β_i sont les coefficients déterminés avec le logiciel R associés aux variables explicatives X_i du modèle.

Les coefficients calculés à partir du modèle 1 sont donnés dans le tableau 3.37. L'histogramme, la courbe de Henry (figure en annexe D.7) et le test de Shapiro ($p > 0,05$) indiquent que les résidus suivent une distribution normale et valide l'application du modèle 1 pour les pentes et le temps T_1 .

(a) $p < 0,05$

En considérant le paramètre de probabilité p à 0,05, cela signifie que l'intervalle de confiance donné au modèle est de 95%. L'intervalle considéré comporte 95% des valeurs mesurées. Le taux de reprise en eau réel a une influence statistiquement significative sur les pentes (figure 3.33). Lorsque la pente est importante, la vapeur d'eau passe facilement à travers le textile. Dans le cas contraire (pente faible), l'enclenchement du procédé de désorption et/ou le transfert des molécules d'eau à travers le textile est retardé. Les valeurs de pentes sont faibles pour les échantillons contenant des fibres hautement hygroscopiques comme les échantillons $CO_{100\%}$ -I et $CO_{95\%}$ -EA_{5%}-J.

Dans ce cas, le transfert d'humidité vers l'environnement externe est ralenti car les fibres emmagasinent une part de l'humidité à l'intérieur du textile. Par contre, les valeurs sont importantes pour les échantillons composés de fibres à faible affinité avec les molécules de vapeur d'eau comme PAN_{50%}-PET_{50%}-I et PET_{95%}-EA_{5%}-J. Quand l'échantillon crée peu de liaisons avec les molécules de vapeur d'eau, l'humidité est rapidement transférée à l'environnement extérieur sans être retenue par les fibres.

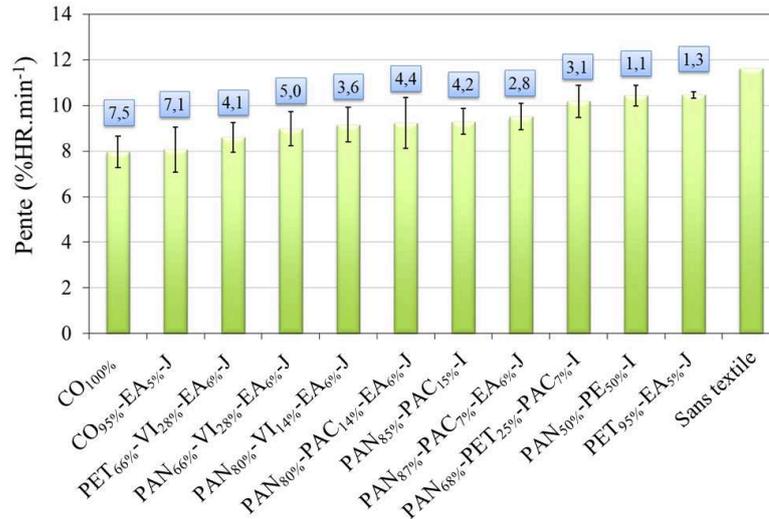


FIGURE 3.33 – Pentés mesurées inversement corrélées avec le taux de reprise en eau réel.

En fonction de la probabilité p mesuré pour chaque paramètre du modèle, deux intervalles de confiance sont appliqués au modèle. Dans le premier cas, le p est fixé à 0,05 ce qui signifie que 95% des données sont considérées. Un autre intervalle est défini en considérant que 80% des données se situent dans la zone considérée.

(b) $0,05 < p < 0,20$

L'intervalle de confiance du modèle est diminué à 80% pour élargir la population de données considérées. Les p mesurés pour la contexture dans le cas de la pente, la masse surfacique et le taux de reprise en eau réel pour le temps T_1 sont compris dans cet intervalle. Par rapport aux tricots interlock, la pente mesurée pour les textiles jersey est inférieure de 0,41 unité (tableau 3.37). Le transfert des molécules de vapeur d'eau à partir d'un textile jersey est plus rapide que pour un tricot interlock où le contact interfils et interfibres permet de retenir les molécules de vapeur d'eau. L'impact de la contexture en général sur les mesures de pente et T_1 est analysé sans dissocier la contexture jersey et interlock 1×1 en utilisant la fonction « drop1 ». Un p de 0,137 est mesuré avec celle-ci ; cette valeur indique que la contexture des textiles a un impact sur la vitesse de transfert d'humidité pour les données comprises dans l'intervalle

de confiance de 80%. La masse surfacique influence positivement les temps T_1 . Un temps important est mesuré pour un textile épais. La diffusion des molécules d'eau au sein du textile est ralentie par les fibres en quantité plus importante dans le mélange. Le commencement du procédé de désorption et/ou de transfert des molécules d'eau démarre après les textiles de faibles épaisseurs. Le taux de reprise en eau réel a un impact négatif sur le temps T_1 mesuré. Les textiles présentant une faible affinité avec les molécules d'eau débutent le transfert d'humidité tardivement.

Modèle 1	Pente		T_1	
	β	p	β	p
β_0	11,4410	$3,960 \times 10^{-6}$	8973,6946	$2,060 \times 10^{-14}$
Masse surfacique	-0,0004	0,952	0,7596	0,116
Épaisseur	-0,3013	0,685	-34,2555	0,519
Taux de reprise en eau réel	-0,3925	$2,920 \times 10^{-5}$	-4,6524	0,195
Contexture jersey	-0,4149	0,137	-6,9291	0,707
r^2		0,9112		0,5207
r^2 ajustée		0,8667		0,2811
Erreur résiduelle standard		0,2863		20,3000
Test de Shapiro		0,1959		0,7249

TABLEAU 3.37 – Modèle 1 des mesures de pente et T_1 .

- Modèle 2

Le modèle 2 étudie l'impact de certaines propriétés thermo-hydrrique sur la pente et les temps T_1 (équation 3.37).

$$Y_{\text{Pente ou } T_1} = \beta_0 + \beta_1 \times X_{\text{Perméabilité à l'air}} + \beta_2 \times X_{\text{WT}_{\text{Top}}} + \beta_3 \times X_{\text{R}} + \beta_4 \times X_{\text{R}_{\text{ct}}} + \beta_5 \times X_{\text{W}_d} \quad (3.37)$$

Les coefficients β_0 et β_i du modèle 2 sont définis dans le tableau 3.38.

La normalité des résidus est vérifiée de nouveau en traçant l'histogramme et la droite de Henry (figures de l'annexe D.8). Avec le test de Shapiro, la valeur p est supérieure à 0,05 ; ce qui confirme que les résidus suivent une loi normale.

Pour ce modèle, l'intervalle de confiance appliqué est de 80% car à 95% aucun paramètre n'influence statistiquement les pentes et les temps T_1 mesurés. Les paramètres WT_{top} et R des résultats MMT influencent les mesures des pentes. Une vitesse de désorption rapide des molécules d'eau à travers le textile implique

un temps faible nécessaire pour mouiller la surface dirigée vers l'environnement de l'enceinte climatique. Dans ce cas, le paramètre R, caractérisant la différence de liquide accumulée entre les deux faces du textile, est important. L'humidité contenue dans le tricot est facilement désorbée. Un textile, caractérisé par une perméabilité à l'air élevée, mesure un temps T_1 faible. Le procédé de désorption est enclenché en avance pour les tricots dont les écarts interfibres et interfils sont importants.

Modèles 2	Pente		T_1	
	β	p	β	p
β_0	8,5480	0,287	9260,1254	0,001
Perméabilité à l'air	-0,0006	0,677	-0,0619	0,111
WT_{Top}	-0,0631	0,170	0,6086	0,393
R	0,0067	0,161	-0,0863	0,275
R_{ct}	-11,4464	0,873	1099,9404	0,453
W_d	6,5499	0,619	-451,3387	0,166
r^2		0,9009		0,9555
r^2 ajustée		0,6532		0,8442
Erreur résiduelle standard		0,4715		8,8700
Test de Shapiro		0,5586		0,7306

TABLEAU 3.38 – Modèle 2 des mesures de pente et T_1 .

Influence du type de matière

Les pentes et les temps mesurés sont regroupés selon la nature des fibres constituant les mélanges (figure 3.34).

- Avec polyacrylate

Les deux textiles jersey ($PAN_{87\%}-PAC_{7\%}-EA_{6\%}-J$ et $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_{6\%}-J$) amorcent le processus de désorption en avance sur les textiles interlock ($PAN_{85\%}-PAC_{15\%}-I$ et $PAN_{68\%}-PET_{25\%}-PAC_{7\%}-I$). La structure du jersey, plus ouverte, permet aux molécules de vapeur d'eau de passer plus facilement à travers les interstices et les pores du textile (figure 3.34a). Les textiles interlock sont plus perméables à l'air que les jersey, dans ce cas, le temps T_1 diminue. Les molécules de vapeur d'eau sont rapidement désorbées et/ou transférées des tricots interlock. Le textile contenant moins de polyacrylate dans son mélange transfère plus rapidement l'humidité vers le milieu extérieur (pente plus importante). Cette observation est moins évidente pour les textiles jersey. La fibre de polyacrylate crée de nombreuses liaisons avec les molécules d'eau en retardant son transfert lorsque son pourcentage dans le mélange est élevé.

- Avec viscose

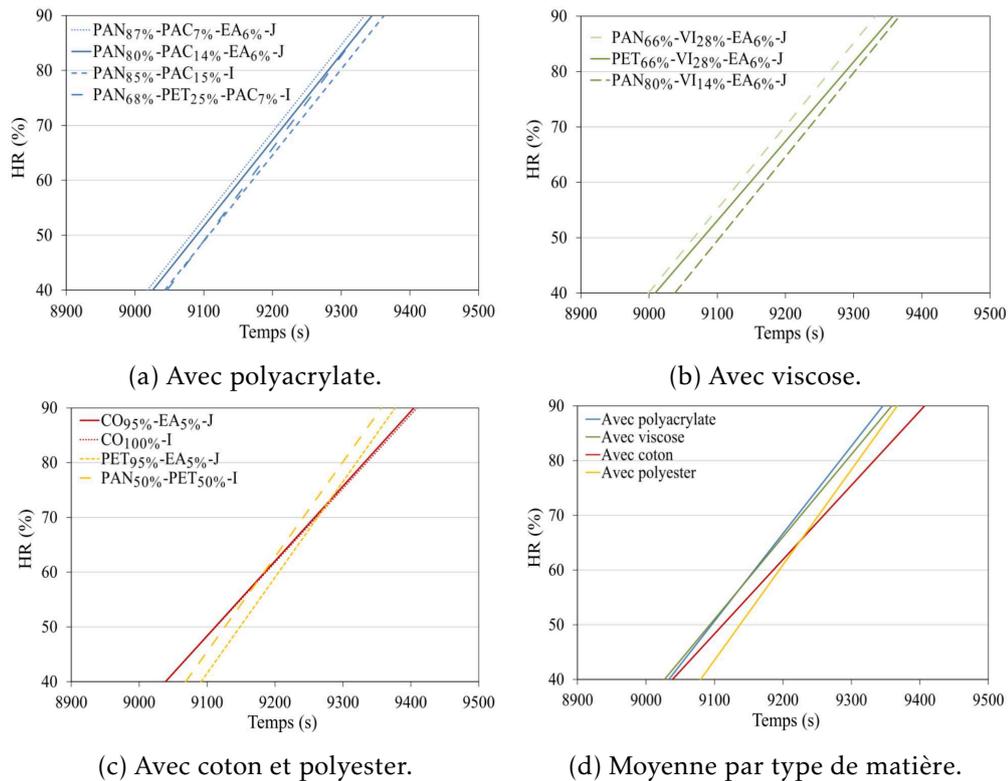
Les échantillons contenant 28 % de viscose ($\text{PAN}_{66\%}\text{-VI}_{28\%}\text{-EA}_{6\%}\text{-J}$ et $\text{PET}_{66\%}\text{-VI}_{28\%}\text{-EA}_{6\%}\text{-J}$) commencent à transférer l'humidité au palier 40 %HR avant l'échantillon contenant 14 % de ces fibres (figure 3.34b). Le $\text{PET}_{66\%}\text{-VI}_{28\%}\text{-EA}_{6\%}\text{-J}$ est légèrement en retard par rapport au $\text{PAN}_{66\%}\text{-VI}_{28\%}\text{-EA}_{6\%}\text{-J}$. Dans le cas des échantillons constitués de viscose, l'ajout du pourcentage de cette fibre augmentant l'hydrophilie du textile, diminue le temps T_1 . Les premières molécules de vapeur d'eau sont évacuées plus rapidement du tricot. La vitesse de transfert d'humidité est similaire pour l'ensemble des textiles sauf pour le $\text{PET}_{66\%}\text{-VI}_{28\%}\text{-EA}_{6\%}\text{-J}$.

- Avec coton et polyester

Les échantillons contenant du coton ($\text{CO}_{95\%}\text{-EA}_{5\%}\text{-J}$ et $\text{CO}_{100\%}\text{-I}$) ont des comportements similaires (figure 3.34c). Ces tricots évacuent l'humidité en avance par rapport aux matières hydrophobes ($\text{PAN}_{50\%}\text{-PET}_{50\%}\text{-I}$ et $\text{PET}_{95\%}\text{-EA}_{5\%}\text{-J}$) avec des vitesses de transfert plus faibles. Le coton est une matière très hydrophile. Elle a tendance à retenir l'eau au sein des fibres et les molécules d'eau sont difficilement désorbées vers le milieu extérieur (résultats MMT). Les pentes mesurées pour les textiles contenant une quantité importante de fibres PET sont importantes à cause de leur faible capacité à retenir l'humidité au sein de leur structure fibreuse. Le temps T_1 est important pour les textiles hydrophobes caractérisés par un faible taux de reprise en eau. Par ailleurs, l'indice R est supérieur à celui des matières hydrophiles. L'humidité est plus facilement évacuée vers l'environnement ambiant. Le $\text{PAN}_{50\%}\text{-PET}_{50\%}\text{-I}$ moins hydrophobe que le $\text{PET}_{95\%}\text{-EA}_{5\%}\text{-J}$ transfère l'humidité avec un temps T_1 plus faible.

- Ensemble des matières

Les pentes et les temps T_1 mesurés sont moyennés en fonction de la nature des fibres contenues dans les textiles (figure 3.34d). Les matières contenant de la viscose transfèrent l'humidité avant ceux contenant du polyacrylate, du coton et du polyester. Les pentes mesurées pour les échantillons coton sont les plus faibles, les molécules de vapeur d'eau désorbent difficilement à partir de ces textiles contrairement à ceux contenant une quantité importante de fibres polyester. Les tricots à base de polyacrylate débutent le processus de transfert d'humidité après ceux contenant de la viscose mais avec une vitesse supérieure. Le coton commence à désorber après les matières contenant de la viscose et du polyacrylate (temps T_1 plus important) à cause de sa capacité à retenir les molécules d'eau au sein du textile. Cependant, les échantillons contenant des fibres polyester mettent davantage de temps à enclencher le processus de transfert d'humidité. Ces fibres hydrophobes créent peu de liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau en les acheminant difficilement au sein du textile pour les évacuer par la suite hors du tricot.

FIGURE 3.34 – Représentation des pentes et des temps T_1 mesurés.

Conclusion

Les mesures réalisées avec le cadre (pente et temps T_1) sont reproductibles. L'étude est réalisée en moyennant l'ensemble des résultats obtenus par chaque capteur. L'influence de l'emplacement des capteurs au sein du microclimat du cadre est négligée à cause de leur sensibilité ($\pm 5\%HR$). Selon les modèles 1 et 2 (régression linéaire multiple), les pentes mesurées (vitesse de transfert de l'humidité) sont significativement influencées par le taux de reprise en eau réel pour un intervalle de confiance fixée à 95%. Un textile très hydrophile relargue l'humidité lentement contrairement à un textile hydrophobe présentant peu d'affinité avec les molécules de vapeur d'eau. La contexture, le temps WT_{Top} et le paramètre R ont également un impact sur les mesures des pentes pour un intervalle de confiance fixé à 80%. Un textile de contexture jersey avec un de temps de mouillage faible et un transfert de l'humidité R important évacue rapidement l'humidité une fois que le processus de désorption est enclenché. Les temps T_1 dépendent de la masse surfacique, du taux de reprise en eau réel et de la perméabilité à l'air. Un textile dense, avec une perméabilité à l'air et un taux de reprise en eau réel faible va retarder la désorption des molécules de vapeur d'eau vers le milieu environnant.

3.2.3.2 Protocole 2

La courbe représentée en figure 3.35 donne un exemple des résultats obtenus avec le protocole 2 pour le tricot PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J. Les capteurs mesurent des humidités différentes en fonction de leur emplacement dans le cadre (figure 3.35). L'humidité mesurée par les capteurs, placés sur des socles dans le microclimat, est importante lorsque le test commence car l'eau est toujours sous forme liquide. Par l'existence d'une différence de gradient d'humidité entre le microclimat et l'environnement de l'enceinte climatique, l'eau s'évapore au cours du temps avec une diminution progressive du taux d'humidité mesuré par les capteurs. Lorsque la quantité d'eau présente au sein du microclimat n'est plus suffisante pour maintenir un environnement humide, l'humidité relative mesurée par les capteurs diminue brusquement (pente) pour se stabiliser aux faibles humidités lorsque le microclimat est complètement asséché. Le capteur HR4, situé à l'extrémité du dispositif, mesure un assèchement plus rapide de la surface du cadre contrairement aux capteurs HR1, HR2 et HR3. Pendant le test, l'eau liquide se concentre au centre du cadre au fur et à mesure que les molécules d'eau traversent le textile. La pente évaporative et le temps t mesuré avant la chute soudaine d'humidité permettent de caractériser la capacité des textiles à assécher le microclimat. Si la pente mesurée est importante alors les molécules d'eau sont facilement transférées à travers le textile. Le temps t est faible quand le tricot assèche rapidement le microclimat et dans le cas contraire (temps t important), il va permettre de maintenir plus longtemps l'humidité au sein du microclimat en jouant un rôle « tampon ».

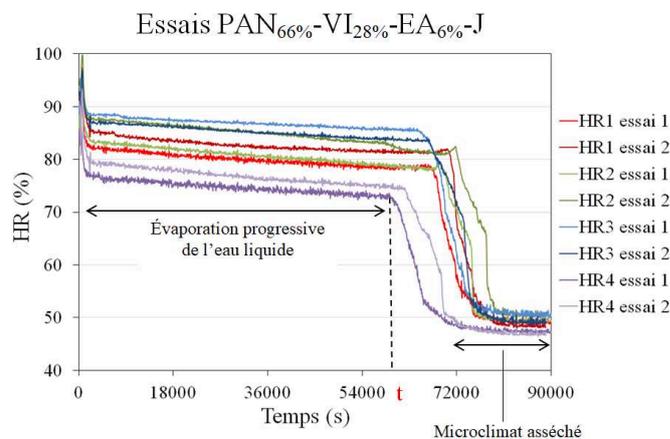


FIGURE 3.35 – Essais PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J selon le protocole 2.

Les résultats obtenus avec le protocole 2 permettent d'affirmer que les essais ne sont pas reproductibles pour un même capteur. Les problèmes de reproductibilité peuvent être causés par la dégradation de l'état de surface de la plaque inférieure ou d'une défaillance électronique. Après avoir positionné une mousse à la surface de la plaque inférieure et changé l'alimentation du circuit électrique (signal non stable au cours du temps), les résultats obtenus ne sont toujours pas reproductibles. Lors des essais, la

répartition de l'eau liquide au fond du cadre ne s'évapore pas de manière identique entre les essais. Cette différence de comportement des molécules d'eau liquide engendre la non-reproductibilité des résultats.

3.2.4 Conclusion

Un banc d'essai a été créé pour étudier les transferts hydriques à travers les textiles. L'instrumentation du Skin Model permet d'étudier l'impact du microclimat sur ces échanges et le comportement des textiles lorsqu'ils sont soumis à une variation soudaine d'humidité (essais dynamiques). Différents protocoles ont été développés. Le premier protocole impose une augmentation soudaine de l'humidité environnante, les transferts hydriques sont forcés à travers les textiles. La vitesse de transfert des molécules de vapeur d'eau à travers les textiles est principalement impactée par la nature des fibres (intervalle de confiance du modèle à 95%). Un textile très hydrophile va créer de nombreuses liaisons avec les molécules d'eau et ralentir leur désorption vers l'environnement extérieur ; la pente mesurée est faible. Dans le cas contraire, un tricot hydrophobe laisse facilement passer les molécules de vapeur d'eau à travers les pores sans les retenir au sein de la structure fibreuse (pente importante). Pour un intervalle de confiance fixé à 80%, la contexture, le WT_{Top} et le paramètre R influencent également les pentes mesurées. Le temps T_1 , caractérisant le début du processus de désorption et/ou de transfert des molécules de vapeur d'eau, est sensible à la nature des fibres et aux caractéristiques physiques du textile (masse surfacique, perméabilité à l'air). Les temps T_1 sont faibles pour les matières contenant de la viscose, suivis par ceux contenant du polyacrylate, du coton et du polyester. Le second protocole étudie l'évaporation de l'eau liquide à travers les matériaux fibreux. Ce protocole n'a pas pu être fiabilisé car la répartition de l'eau liquide pendant le test n'est pas similaire entre les essais.

3.3 Conclusion

L'évaluation des transferts quasi-statiques par la méthode DVS a permis d'apporter des informations sur le comportement hydrique des textiles. En fonction de la nature des fibres constituant les mélanges, les comportements en sorption/désorption sont différents si l'échantillon est constitué de fibres polyacrylate, viscose, coton ou polyester.

L'évaluation des transferts hydriques en dynamique est possible par l'instrumentation du Skin Model au moyen d'un cadre. Le protocole permet d'évaluer la vitesse de désorption et/ou de transfert des molécules de vapeur d'eau à travers le textile et le temps de déclenchement de ce phénomène. De nouveau, suivant la nature des fibres, les résultats observés varient. D'autres paramètres influencent également ces résultats comme le temps de mouillage WT_{top} , l'indice de transport R et la contexture pour les pentes. La masse surfacique et la perméabilité à l'air des textiles impactent le commencement du processus de transfert d'humidité T_1 vers le milieu extérieur. Les résultats obtenus avec ces deux méthodes, i.e. DVS et cadre vont être comparés lors du chapitre 4.

Bibliographie

- ABELÉ, C et al. (2009). *Transferts d'humidité à travers les parois. Evaluer les risques de condensation*.
- AGUERRE, RJ, C SUAREZ et PE VIOLLAZ (1989). « New BET type multilayer sorption isotherms ». In : *Part II : Modelling water sorption in foods. Lebensm.* 22, p. 192-195.
- ALIX, S et al. (2014). « Pressure impact of autoclave treatment on water sorption and pectin composition of flax cellulosic-fibres ». In : *Carbohydrate polymers* 102, p. 21-29.
- BARBA, C et al. (2013). « Moisture sorption/desorption of protein fibres ». In : *Thermochimica acta* 552, p. 70-76.
- BEN AMAR, S (1998). « Étude expérimentale et modélisation des transferts de masse et de chaleur a travers un tissu vestimentaire en régime dynamique : phénomène de sorption, de mouillage et de capillarité ». Thèse de doct. Nice.
- BESSADOK, A et al. (2007). « Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties ». In : *Composites science and technology* 67.3-4, p. 685-697.
- BHOURI, N, S BENNASRALLAH et P PERRE (2012). « Influence of geometrical structure on sorption isotherms of Jersey and yarns made of cotton at two temperatures ». In : *Microporous and Mesoporous Materials* 163, p. 76-84.
- BRADLEY, RS (1936). « Polymolecular adsorbed films. Part I. The adsorption of argon on salt crystals at low temperatures, and the determination of surface fields ». In : *Journal of the Chemical Society*, p. 1467-1474.
- BRUNAUER, S, PH EMMETT et E TELLER (1938). « Adsorption of gases in multimolecular layers ». In : *Journal of the American chemical society* 60.2, p. 309-319.
- CAURIE, M (1970). « A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods ». In : *International Journal of Food Science and Technology* 5.3, p. 301-307.
- CEYLAN, Ö, F GOUBET et K DE CLERCK (2014). « Dynamic moisture sorption behavior of cotton fibers with natural brown pigments ». In : *Cellulose* 21.3, p. 1149-1161.
- EL-CHAKAR, E (1994). « Transfert d'eau liquide dans les parois du bâtiment ». Thèse de doct. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- CHEN, CS et JT CLAYTON (1971). « The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials ». In : *Transactions of the ASAE* 14.5, p. 927-0929.
- CHUNG, DS et HB PFOST (1967). « Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products Part II : Development of the general isotherm equation ». In : *Transactions of the ASAE* 10.4, p. 552-0555.
- CONRAD (8 fév. 2016). *Capteur d'humidité*. URL : <https://www.conrad.fr/ce/fr/product/156545/Capteur-dhumidite-BB-Thermo-Technik-CON-EFS10-Plage-de-mesure-20-90-HR-1-pcs>.
- DAIAN, JF (1986). « Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment. » Thèse de doct. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.

- DAS, A, R ALAGIRUSAMY et al. (2012). « Study on heat transmission through multilayer clothing assemblies under different convective modes ». In : *Journal of The Textile Institute* 103.7, p. 777-786.
- DAY, DL et GL NELSON (1965). « Desorption isotherms for wheat ». In : *Transactions of the ASAE* 8.2, p. 293-0297.
- DERBEL, H (1990). « Modélisation dynamique des transferts de chaleur et d'humidité à travers le vêtement : couplage avec deux modèles de thermorégulation humaine ». Thèse de doct. Toulouse 3.
- DONNARUMMA, D et al. (2015). « Water evaporation from porous media by Dynamic Vapor Sorption ». In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 480, p. 159-164.
- DUFORESTEL, T (1992). « Bases météorologiques et modèles pour la simulation du comportement hygrothermique des composants et ouvrages du bâtiment ». Thèse de doct. ENPC.
- FOLLAIN, N et al. (2016). « Water sorption behaviour of two series of PHA/montmorillonite films and determination of the mean water cluster size ». In : *Physical Chemistry Chemical Physics* 18.30, p. 20345-20356.
- FOURMENTIN, M (2015). « Impact de la répartition et des transferts d'eau sur les propriétés des matériaux de construction à base de chaux formulées ». Thèse de doct. Université Paris-Est.
- FREUNDLICH, H et HS HATFIELD (1926). *Colloid and capillary chemistry*. Methuen et Co. Ltd; London.
- GOTRONIC (18 nov. 2015). *Capteur d'humidité résistif*. URL : <http://www.gotronic.fr/art-capteur-d-humidite-resistif-h25k5a-11551.htm>.
- HALSEY, G (1948). « Physical adsorption on non-uniform surfaces ». In : *The Journal of Chemical Physics* 16.10, p. 931-937.
- HARKINS, WD et G JURA (1944). « Surfaces of solids. XIII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the areas occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid ». In : *Journal of the American Chemical Society* 66.8, p. 1366-1373.
- HEARLE, JWS et WE MORTON (2008). *Physical properties of textile fibres*. Elsevier.
- HENDERSON, SM (1952). « A basic concept of equilibrium moisture ». In : *Agricultural Engineering* 33, p. 29-32.
- HES, L et M de ARAUJO (2010). « Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow ». In : *Textile Research Journal* 80.14, p. 1488-1497.
- HILL, CAS, BA KEATING et al. (2012). « A rheological description of the water vapour sorption kinetics behaviour of wood invoking a model using a canonical assembly of Kelvin-Voigt elements and a possible link with sorption hysteresis ». In : *Holzfor-schung* 66.1, p. 35-47.
- HILL, CAS, G NEWMAN et A NORTON (2010). « The water vapor sorption behavior of flax fibers—Analysis using the parallel exponential kinetics model and determination

- of the activation energies of sorption ». In : *Journal of applied polymer science* 116.4, p. 2166-2173.
- HILL, CAS, A NORTON et G NEWMAN (2009). « The water vapor sorption behavior of natural fibers ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 112.3, p. 1524-1537.
- HILL, CAS, AJ NORTON et G NEWMAN (2010). « The water vapour sorption properties of Sitka spruce determined using a dynamic vapour sorption apparatus ». In : *Wood Science and Technology* 44.3, p. 497-514.
- HILL, CAS, J RAMSAY et al. (2012). « The water vapour sorption properties of thermally modified and densified wood ». In : *Journal of Materials Science* 47.7, p. 3191-3197.
- HILL, CAS et Y XIE (2011). « The dynamic water vapour sorption properties of natural fibres and viscoelastic behaviour of the cell wall : is there a link between sorption kinetics and hysteresis? » In : *Journal of materials science* 46.11, p. 3738-3748.
- HILL, C et al. (2011). « Influence of earlywood/latewood and ring position upon water vapour sorption properties of Sitka spruce ». In : *International Wood Products Journal* 2.1, p. 12-19.
- IGLESIAS, HA (1981). « An equation for fitting uncommon water sorption isotherms in foods. » In : *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 14, p. 105.
- ISSAADI, N (2015). « Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.
- JALALUDIN, Z et al. (2010). « Analysis of water vapour sorption of oleo-thermal modified wood of *Acacia mangium* and *Endospermum malaccense* by a parallel exponential kinetics model and according to the Hailwood-Horrobin model ». In : *Holzforschung* 64.6, p. 763-770.
- KACHRIMANIS, K et al. (2006). « Dynamic moisture sorption and desorption of standard and silicified microcrystalline cellulose ». In : *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 64.3, p. 307-315.
- KEATING, BA et al. (2013). « The water vapor sorption behavior of a galactomannan cellulose nanocomposite film analyzed using parallel exponential kinetics and the Kelvin-Voigt viscoelastic model ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 129.4, p. 2352-2359.
- KIM, HK, Y SONG et KL YAM (1994). « Water sorption characteristics of dried red peppers (*Capsicum annum* L.) » In : *International journal of food science and technology* 29.3, p. 339-345.
- KOHLER, R et al. (2003). « A numeric model for the kinetics of water vapor sorption on cellulosic reinforcement fibers ». In : *Composite Interfaces* 10.2-3, p. 255-276.
- KÜHN, I (1967). « A generalized potential theory of adsorption : I. The derivation of a general equation for adsorption isotherms ». In : *Journal of Colloid and Interface Science* 23.4, p. 563-571.
- LAING, RM et al. (2010). « Standard test methods adapted to better simulate fabrics in use ». In : *Textile Research Journal* 80.12, p. 1138-1150.

- LELIÉVRE, D (2015). « Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés ». Thèse de doct. Lorient.
- MACRAE, BA, RM LAING et CA WILSON (2011). « Importance of air spaces when comparing fabric thermal resistance ». In : *Textile Research Journal* 81.19, p. 1963-1965.
- MCHIRGUI, W (2012). « Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.
- MIZRAHI, S, TP LABUZA et M KAREL (1970). « Computer-aided predictions of extent of browning in dehydrated cabbage ». In : *Journal of Food Science* 35.6, p. 799-803.
- MORELL, M (20 mar. 2016). *Med-Hycos - les Données*. URL : <http://medhycos.mp1.ird.fr/fr/t1.tecisensorsi&gn=humidite.inc.html>.
- AL-MUHTASEB, AH, WAM McMINN et TRA MAGEE (2002). « Moisture sorption isotherm characteristics of food products : a review ». In : *Food and Bioproducts Processing* 80.2, p. 118-128.
- MURAILLE, L et al. (2015). « Impact of lignin on water sorption properties of bioinspired self-assemblies of lignocellulosic polymers ». In : *European Polymer Journal* 64, p. 21-35.
- NICKERSON, RF (1954). « Cotton Fiber : Microscopic Characteristics ». In : *Matthews "Textile Fibers," 6th Edit., Mauersberger, HR, Editor, Wiley, New York*, p. 151-182.
- OHMIC (2 déc. 2015). *Capteur à conductivité thermique*. URL : https://www.ohmic-instruments.com/home/?page_id=46.
- OKUBAYASHI, S, UJ GRIESSER et T BECHTOLD (2004). « A kinetic study of moisture sorption and desorption on lyocell fibers ». In : *Carbohydrate Polymers* 58.3, p. 293-299.
- ORMONDROYD, GA et al. (2017). « The water vapour sorption characteristics and kinetics of different wool types ». In : *The Journal of The Textile Institute* 108.7, p. 1198-1210.
- OSWIN, CR (1946). « The kinetics of package life. III. The isotherm ». In : *Journal of the Society of Chemical Industry* 65.12, p. 419-421.
- PAN, N et P GIBSON (2006). *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Woodhead Publishing.
- PELEG, M (1993). « Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms 1 ». In : *Journal of Food Process Engineering* 16.1, p. 21-37.
- PENG, G et al. (2007). « Modeling of water sorption isotherm for corn starch ». In : *Journal of Food Engineering* 80.2, p. 562-567.
- POBOT (25 jan. 2015). *Capteur d'humidité résistif*. URL : <http://www.pobot.org/Capteur-d-humidite-resistif.html>.
- POPESCU, CM et CAS HILL (2013). « The water vapour adsorption-desorption behaviour of naturally aged *Tilia cordata* Mill. wood ». In : *Polymer degradation and stability* 98.9, p. 1804-1813.
- POPESCU, CM, CAS HILL, S CURLING et al. (2014). « The water vapour sorption behaviour of acetylated birch wood : how acetylation affects the sorption isotherm and accessible hydroxyl content ». In : *Journal of materials science* 49.5, p. 2362-2371.

- POPESCU, CM, CAS HILL et C KENNEDY (2016). « Variation in the sorption properties of historic parchment evaluated by dynamic water vapour sorption ». In : *Journal of Cultural Heritage* 17, p. 87-94.
- ROSE, DA (1963). « Water movement in porous materials : Part 1-Isothermal vapour transfer ». In : *British Journal of Applied Physics* 14.5, p. 256.
- SAHA, D et HA GRAPPE (2017). « Adsorption properties of activated carbon fibers ». In : *Activated Carbon Fiber and Textiles*. Elsevier, p. 143-165.
- SANGWICHEN, C, GL ARANOVICH et MD DONOHUE (2002). « Density functional theory predictions of adsorption isotherms with hysteresis loops ». In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 206.1-3, p. 313-320.
- SING, KSW (1985). « Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity ». In : *Pure and applied chemistry* 57.4, p. 603-619.
- SMITH, SE (1947). « The sorption of water vapor by high polymers ». In : *Journal of the American Chemical Society* 69.3, p. 646-651.
- TEXAS, Instruments (12 déc. 2015). *HIH-3610-003 Datasheet*. URL : <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/82433/HONEYWELL/HH-3610-003/1243/3/HH-3610-003.html>.
- TIMMERMANN, EO (2003). « Multilayer sorption parameters : BET or GAB values? » In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 220.1-3, p. 235-260.
- TRELOAR, LRG (1952). « The absorption of water by hair, and its dependence on applied stress ». In : *Transactions of the Faraday Society* 48, p. 567-576.
- URQUHART, AR et AM WILLIAMS (1924). « The effect of temperature on the absorption of water by soda-boiled cotton ». In : *Journal of the Textile Institute Transactions* 15.12, T559-T572.
- VAN DEN BERG, C (1984). « Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption ». In : *Engineering science in the food industry*, p. 311-321.
- WEIDMANN, D (2010). *Aide-mémoire Textiles techniques*. Dunod.
- XIE, Y et al. (2011). « The water vapour sorption behaviour of three celluloses : analysis using parallel exponential kinetics and interpretation using the Kelvin-Voigt viscoelastic model ». In : *Cellulose* 18.3, p. 517-530.
- YANNIOTIS, S et J BLAHOVEC (2009). « Model analysis of sorption isotherms ». In : *LWT-Food Science and Technology* 42.10, p. 1688-1695.
- YOUNG, JH et GL NELSON (1967). « Research of hysteresis between sorption and desorption isotherms of wheat ». In : *Transactions of the ASAE* 10.6, p. 756-0761.
- ZAIHAN, J, S CURLING et al. (2010). « The kinetics of water vapour sorption : analysis using parallel exponential kinetics model on six Malaysian hardwoods ». In : *Journal of Tropical Forest Science*, p. 107-117.
- ZAIHAN, J, CAS HILL et al. (2009). « Moisture adsorption isotherms of *Acacia mangium* and *Endospermum malaccense* using dynamic vapour sorption ». In : *Journal of Tropical Forest Science*, p. 277-285.

ZHANG, Z (2014). « Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials ». Thèse de doct. Université Paris-Est.

Comparaison entre les méthodes de mesures

4.1 Comparaison entre le Skin Model, le DVS, le récipient renversé avec desiccant et le cadre	181
4.1.1 Comparaison des mesures avec le cadre et le DVS	182
4.1.2 Influence de la contexture sur la pente, I_{mt} et W_d	183
4.1.3 Conclusion	183
4.2 Comparaison entre les essais au porté, DVS, MMT et cadre	184
4.2.1 Comparaison entre les essais au porté et le DVS en sorption	184
4.2.1.1 Première étude	184
4.2.1.2 Seconde étude	185
4.2.1.3 Conclusion	186
4.2.2 Comparaison des essais au porté avec le MMT, le cadre et le DVS	186
4.2.2.1 Comparaison entre les essais au porté et le MMT . .	186
4.2.2.2 Comparaison des résultats MMT avec ceux du cadre	187
4.2.2.3 Comparaison entre le cadre et le DVS en désorption.	189
4.2.2.4 Conclusion	189
4.3 Conclusion	190

4.1 Comparaison entre le Skin Model, le DVS, le récipient renversé avec desiccant et le cadre

La méthode développée avec le cadre est comparée aux résultats du DVS, du récipient renversé avec desiccant et des indices I_{mt} et W_d mesurés. Les variations de prises en

masses des échantillons en DVS, les résultats du cadre, du Skin Model et du récipient renversé avec desiccant sont données dans le tableau 4.1.

Échantillons textiles	DVS (ΔEMC entre 40 et 90 %HR)	Aire Hystérésis	Pente (%HR.min ⁻¹)	I_{mt}	W_d (g.m ⁻² .h ⁻¹ .Pa ⁻¹)
CO _{95%} -EA _{5%} -J	8,3 ± 0,2	116	8,2 ± 0,5	/	/
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	4,1 ± 0,1	45	9,4 ± 0,4	0,60	0,38
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	4,7 ± 0,2	75	9,4 ± 0,3	0,56	0,45
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	2,4 ± 0,2	69	10,1 ± 0,3	0,54	0,39
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	5,3 ± 0,2	63	9,0 ± 0,4	0,52	0,46
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	4,7 ± 0,1	45	8,6 ± 0,4	0,49	0,45
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	3,4 ± 0,1	41	9,1 ± 0,7	/	/
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,8 ± 0,1	11	10,4 ± 0,2	0,42	0,34

TABLEAU 4.1 – Comparaison des données issus du cadre, DVS, Skin Model et du récipient renversé avec desiccant.

4.1.1 Comparaison des mesures avec le cadre et le DVS

Selon le tableau 4.1, pour tous les échantillons, les résultats montrent une tendance inversée entre la vitesse de transfert d'humidité et les résultats du DVS. Pour PAN_{50%}-PET_{50%}-I, la vitesse mesurée avec le cadre est significative lorsque les variations de masse et l'aire de l'hystérésis sont les plus faibles (test DVS). Le transfert d'humidité entre l'environnement extérieur et le microclimat est important pour un textile emmagasinant une faible quantité de molécules de vapeur d'eau dans ses fibres en créant peu de liaisons hydrogènes avec celles-ci (quantité élevée de fibres PET). Dans ce cas, les sites disponibles permettant de créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau sont rapidement saturés. L'hystérésis, représentant la différence de quantité d'eau prise entre les processus de sorption et de désorption, est faible pour PAN_{50%}-PET_{50%}-I car peu de molécules d'eau sont retenues dans la structure fibreuse. Elles diffusent à travers le textile en peu de temps et sont facilement évacuées vers l'environnement extérieur. Au contraire, pour les échantillons ayant une forte affinité avec l'eau comme le tricot CO_{95%}-EA_{5%}-J, la vitesse de transfert d'humidité lors de la désorption est faible alors que les valeurs issues du DVS sont importantes. La masse de l'échantillon augmente considérablement en raison de sa forte affinité avec la vapeur d'eau et de nombreuses liaisons hydrogènes sont formées. Les molécules d'eau sont sorbées et maintenues dans les fibres tant que tous les sites de sorption ne sont pas remplis. Peu de molécules passent directement à travers les pores du textile. Une fois tous les sites remplis, le gradient d'humidité, entre le microclimat et l'environnement extérieur, force le transfert d'humidité à travers le textile jusqu'à ce que les molécules d'eau s'évaporent du textile. Le taux de reprise en eau, représentant l'affinité des tricots avec les molécules d'eau, est

positivement corrélé avec la variation de masse et l'aire de l'hystérésis mesurée. Quand le textile présente une forte affinité avec l'eau, les données mesurées avec le DVS sont les plus importantes et la quantité d'eau stockée dans les fibres est conséquente. Dans ce cas, la pente mesurée est faible et les transferts hydriques sont ralentis lors de la désorption. Pour les échantillons PAN_{85%}-PAC_{15%}-I et PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, les vitesses mesurées sont similaires mais une différence est visible sur les résultats du DVS, la quantité de vapeur d'eau absorbée dans le tricot n'est pas la même. La sensibilité des capteurs du cadre est inférieure à ceux du DVS, ce qui peut expliquer que la vitesse de transfert d'humidité ne semble pas être affectée par la variation de masse pour ces échantillons.

4.1.2 Influence de la contexture sur la pente, I_{mt} et W_d

Les tricots interlock PAN_{50%}-PET_{50%}-I, PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I, PAN_{85%}-PAC_{15%}-I ont un W_d inférieur aux échantillons jersey (PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J). Les molécules de vapeur d'eau sont plus facilement piégées à l'intérieur de la structure fibreuse ou adsorbées à la surface des fibres lorsqu'elles traversent le tricot interlock 1 × 1. Dans le cas d'un tricot jersey, les espaces entre les fibres et les interfils sont plus importants et les molécules d'eau passent facilement à travers les pores du tissu sans créer de liaisons hydrogènes avec le matériau fibreux. Selon Yoon et Bucklet (YOON et BUCKLEY 1984), la résistance à la vapeur d'eau dépend davantage de la géométrie du textile que des propriétés physiques des fibres. Pour une valeur W_d faible, I_{mt} l'indice de perméabilité est inférieur pour l'échantillon PAN_{50%}-PET_{50%}-I. Cet indice, mesuré à partir du Skin Model dans des conditions stationnaires, représente la capacité du textile à être respirant. Cette caractéristique décrit un tricot avec une isolation thermique élevée et une faible résistance au passage de la vapeur d'eau. Il est moins respirant dans le cas d'un interlock 1 × 1 en raison de la forme de sa structure. Les différences de valeurs I_{mt} entre les tricots sont faibles et ne permettent pas de les discriminer. La vitesse de désorption d'humidité mesurée (pente) permet de caractériser la capacité de l'échantillon à évacuer facilement l'humidité vers le milieu environnant. Dans le cas de la méthode du récipient renversé avec desiccant, le transfert d'humidité a lieu sans être forcé entre deux environnements présentant un taux d'humidité différent. Ces transferts sont plus importants dans le cas de tricots jersey, tandis que les valeurs W_d sont plus faibles pour les textiles interlock. La pente mesurée avec le cadre est inversement corrélée avec la capacité des fibres à créer des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. La contexture du tricot a moins d'impact sur ces mesures. Un textile hydrophile a tendance à retenir les molécules de vapeur d'eau au sein des fibres par des liaisons hydrogènes. Elles désorbent plus difficilement du textile avec une vitesse faible.

4.1.3 Conclusion

L'étude du comportement hydrique des textiles mesurés avec le DVS ne tient pas compte de la contexture car les échantillons sont coupés finement avant d'être position-

nés sur une balance de précision. La nature des fibres influence considérablement la quantité d'eau absorbée et désorbée lors de ce test. Dans le cas de la méthode avec le cadre, la vitesse de transfert d'humidité est influencée principalement par les fibres hydrophiles ou hydrophobes. Le transfert d'humidité est forcé et ce test ne permet pas d'étudier de manière significative l'impact de la contexture des textiles. Par conséquent, les mesures obtenues avec le cadre sont inversement corrélées aux résultats du DVS. Les tests du DVS et du cadre permettent de discriminer le comportement hydrique des textiles principalement en fonction du type de fibres composant les mélanges. Le cadre a l'avantage de se rapprocher des conditions réelles de test au porté. En effet, ce test permet de modéliser l'effet du microclimat sur les échanges hydriques et les tests effectués en dynamique. La perméabilité à la vapeur d'eau déterminée à partir de la méthode du récipient renversé avec desiccant étudie le transfert hydrique à travers le textile lorsqu'il est soumis à un gradient d'humidité. Selon la structure du tricot, les valeurs W_d varient tandis qu'entre les échantillons d'une même contexture, les différences observées sont minimales. Lorsque ce paramètre augmente, la capacité du tricot à stocker l'eau dans ses fibres augmente également. Pour des textiles jersey, la vapeur d'eau passe facilement à travers celui-ci (pores, intersetics). Les molécules d'eau peuvent accéder à davantage de sites de sorption et augmenter la capacité du tricot à créer des liaisons hydrogènes avec celles-ci. Ce test peut être utilisé pour déterminer l'impact de la contexture sur le comportement hydrique des textiles. En ce qui concerne les valeurs I_{mt} obtenues avec le Skin Model, les différences observées entre les tricots ne semblent pas dépendre de la nature des fibres ou de la contexture du textile. Cependant, ce paramètre augmente avec la surface de l'hystérésis. La capacité du textile à laisser passer la vapeur d'eau est associée à celle du mouvement des chaînes polymères le constituant. Cette évolution de structure permet aux molécules de rentrer facilement ou non à l'intérieur du textile. Dans notre cas, ce test fournit des informations sur la capacité des textiles à modifier leur structure au fur et à mesure que les molécules d'eau les traversent. Ce phénomène entraîne une variation de la quantité d'eau stockée entre les procédés de sorption et de désorption.

4.2 Comparaison entre les essais au porté, DVS, MMT et cadre

4.2.1 Comparaison entre les essais au porté et le DVS en sorption

Les résultats des essais DermScan sont comparés à ceux du DVS entre 35 et 55 %HR. Pendant les tests au porté, l'humidité mesurée est proche de 40 %HR. La contribution des mécanismes rapide et lent, définis selon le modèle de PEK, est étudiée en sorption.

4.2.1.1 Première étude

Selon le tableau 4.2, la contribution du paramètre MC_2 (mécanisme dit « lent ») sur la quantité totale d'eau prise est très faible pour le $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ (13-14 %) comparé au $PAN_{80\%}-PAC_{14\%}-EA_{6\%}-J$ (60 %). D'après les essais DermScan (figure 2.11), le $CO_{95\%}-EA_{5\%}-J$ a tendance à assécher la peau ($C=-1,6$) et la quantité d'eau prise selon le

mécanisme rapide est important pour ce textile (86-87 %). Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J présente une valeur de $C=5,2$. Ce textile permet de maintenir une certaine hydratation à la surface de la peau.

Échantillons textiles		$\frac{MC_1}{EMC}$	$\frac{MC_2}{EMC}$
CO _{95%} -EA _{5%} -J	40 %HR	87 %	13 %
	50 %HR	86 %	14 %
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	40 %HR	39 %	61 %
	50 %HR	40 %	60 %

TABLEAU 4.2 – Résultats DVS en sorption comparés à la première étude DermScan.

Lorsque la matière prend l'humidité au sein des fibres, un certain seuil d'hydratation cutanée est maintenu à la surface de la peau tandis que pour les textiles dont le mécanisme dominant est celui dit « rapide » (modèle de PEK), le tricot a tendance à assécher davantage la surface cutanée. Il serait intéressant de réaliser cette étude avec un textile hydrophobe contenant une quantité importante de fibres polyester.

4.2.1.2 Seconde étude

Dans cette seconde étude (tableau 4.3), le comportement des échantillons viscose est étudié pour trouver une alternative au mélange PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J n'asséchant pas la surface cutanée.

Échantillons textiles		$\frac{MC_1}{EMC}$	$\frac{MC_2}{EMC}$
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	40 %HR	57 %	43 %
	50 %HR	56 %	44 %
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	40 %HR	50 %	50 %
	50 %HR	56 %	44 %
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	40 %HR	39 %	61 %
	50 %HR	40 %	60 %

TABLEAU 4.3 – Résultats DVS en sorption comparés à la seconde étude DermScan.

Le classement des matières pour les essais DermScan dépend de la capacité de l'échantillon à prendre l'eau au sein des fibres plutôt qu'aux niveaux des sites faciles d'accès (surface et zones amorphes). La contribution du mécanisme « lent » doit être proche de celle du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J pour remplacer l'utilisation de la fibre polyacrylate. Le paramètre MC_1 ne semble pas impacter les tests au porté car même si les données mesurées sont différentes entre les échantillons PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, les résultats DermScan montrent que ces textiles ont un comportement proche (figure 2.12).

4.2.1.3 Conclusion

Les essais DermScan ont montré qu'un textile créant des liaisons avec les molécules d'eau au sein de la matière plutôt qu'aux niveaux des sites faciles d'accès (surface ou zones amorphes) proche de 40 %HR, va permettre de maintenir un taux d'hydratation à la surface de la peau (cas du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J). Dans le cas contraire, un textile prenant davantage d'eau selon le mécanisme « rapide » va assécher la surface cutanée (cas du CO_{95%}-EA_{5%}-J). Ces résultats sont à confirmer avec la réalisation d'essais supplémentaires avec des matières hydrophobes. Le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J, contenant de la viscose, présente un comportement similaire au PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J constitué de fibres polyacrylate lors des essais au porté. Le but étant de se rapprocher du comportement du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J lors des essais DermScan, le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J semble être une bonne alternative à ce mélange.

4.2.2 Comparaison des essais au porté avec le MMT, le cadre et le DVS

Les méthodes de caractérisation sont comparés aux résultats au porté dans le but de comprendre les paramètres influençant ces résultats. Le but final est de développer un textile sans polyacrylate se rapprochant du comportement au porté du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J permettant de maintenir un seuil d'hydratation optimum à la surface de la peau.

4.2.2.1 Comparaison entre les essais au porté et le MMT

La gestion hydrique des textiles (liquide) est étudiée au moyen du MMT. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J, PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J, PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J ont des comportements différents (figure 4.1 et tableau 4.4). Les données numériques des essais MMT sont détaillées dans le tableau de l'annexe B.1.

Échantillons textiles	WT _{Top} (s)	AR _{Top} (%·s ⁻¹)	SS _{Top} (mm·s ⁻¹)	R (%)
CO _{95%} -EA _{5%} -J	8,7 ± 0,6	86,3 ± 34,5	0,7 ± 0,1	87,1 ± 80,7
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	120,0 ± 0,0	4,5 ± 2,0	0,1 ± 0,1	961,9 ± 111,3
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	115,3 ± 1,2	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	853,5 ± 92,4
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	120,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	877,3 ± 42,3

TABLEAU 4.4 – Résultats MMT des échantillons testés au porté.

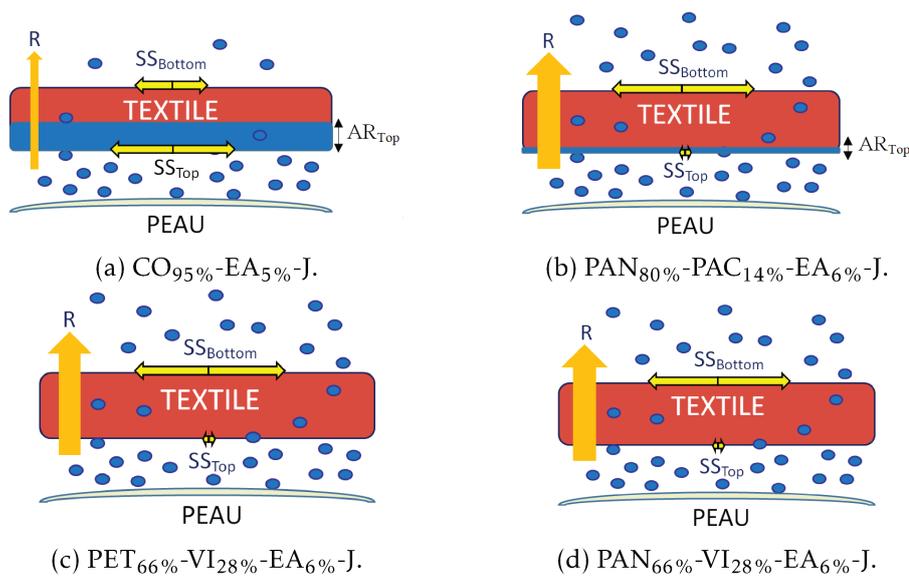


FIGURE 4.1 – Résultats MMT pour les échantillons testés au porté.

La surface du CO_{95%}-EA_{5%}-J crée rapidement des liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau liquide. Le paramètre WT_{Top} , représentant le temps nécessaire pour que les surfaces du textile commencent à être mouillées, est faible comparé aux autres tricots. Lors des essais au porté, le CO_{95%}-EA_{5%}-J assèche la surface cutanée. La surface intérieure du CO_{95%}-EA_{5%}-J, en contact avec la peau, est rapidement mouillée et cette humidité est faiblement transférée vers l'extérieur. L'eau est maintenue au sein du textile par l'affinité importante entre les fibres de coton et les molécules d'eau. Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J ont des temps de mouillure (WT_{Top}) similaires. Le PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J assèche plus rapidement la surface cutanée (essais au porté). Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J crée des liaisons en surface de la matière, les autres échantillons contenant de la viscose transmettent directement l'humidité au sein du textile en mouillant peu la surface en contact avec la peau. Le paramètre R, caractérisant le transport de l'humidité entre les deux faces du tricot, est élevé. L'eau est facilement évacuée vers l'environnement extérieur lors de la désorption.

4.2.2.2 Comparaison des résultats MMT avec ceux du cadre

Les courbes des échantillons testés avec le cadre (figure 4.2) mesurent l'humidité ayant été transférée à travers le textile. Les échantillons contenant de la viscose (PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J), transfèrent l'humidité (vapeur) vers le milieu extérieur plus rapidement que PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et CO_{95%}-EA_{5%}-J. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J prend davantage de temps pour transférer l'humidité à travers le textile. De nombreuses liaisons hydrogènes sont créées entre les fibres et les molécules d'eau retardant la vitesse de transfert. La pente mesurée, représentative de la vitesse de transfert des molécules d'eau, est faible (tableau 4.5). Dans le cas du PAN_{80%}-PAC_{14%}-

EA_{6%}-J, le temps T_1 mesuré est intermédiaire entre les tricots avec viscose et celui contenant du coton. Cependant, une fois que le processus de désorption débute, le transfert est rapide (pente importante).

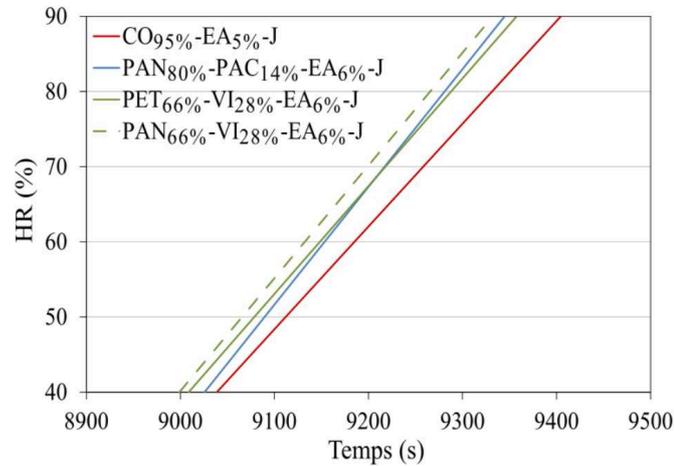


FIGURE 4.2 – Résultats du cadre pour les échantillons testés au porté.

Échantillons textiles	T_1 (s)	Pente (%HR.min ⁻¹)
CO _{95%} -EA _{5%} -J	9039 ± 27	8,2 ± 0,5
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	9026 ± 47	9,4 ± 0,3
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	9009 ± 54	8,6 ± 0,4
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	8999 ± 51	9,0 ± 0,4

TABLEAU 4.5 – Résultats du cadre pour les échantillons testés au porté.

Le paramètre R (MMT) et la pente (cadre) mesurés pour le PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J sont légèrement inférieurs au PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J. Sur les courbes obtenues avec le cadre, le transfert d'humidité du PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J à travers le textile est retardé. Par la suite, la vitesse de transfert des molécules d'eau à travers le textile est plus faible. Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J commence à désorber après les échantillons contenant de la viscose mais avec une vitesse élevée. L'humidité contenue au sein du textile est évacuée rapidement une fois que le processus de désorption est enclenché. Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J retient une certaine quantité d'humidité à sa surface en contact avec la peau retardant le transfert d'humidité contrairement aux échantillons avec viscose où les molécules d'eau sont rapidement transférées au sein du textile (résultats MMT). Le CO_{95%}-EA_{5%}-J commence à désorber l'humidité après les autres échantillons. L'eau est difficilement évacuée vers l'extérieur (faible R). La vitesse de transfert est lente confirmant les résultats obtenus avec le MMT.

4.2.2.3 Comparaison entre les essais avec cadre et le DVS en désorption

Les résultats obtenus avec le cadre représentent l'humidité transférée par le textile vers le milieu extérieur. Ils sont comparés à ceux du DVS en désorption pour les textiles testés au porté. Pour l'ensemble des textiles (figure 4.3), la quantité d'eau désorbée a lieu majoritairement selon le mécanisme rapide (au-dessus de 50 %).

En comparant les résultats avec ceux du cadre, le CO_{95%}-EA_{5%}-J et les échantillons viscose désorbent majoritairement selon le procédé rapide. A faible et moyenne humidités, la contribution de ce mécanisme est plus importante. La participation du mécanisme lent pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J est non négligeable lors du transfert d'humidité vers le milieu extérieur. Cet échantillon désorbe majoritairement suivant le procédé rapide (sites de désorption faciles d'accès) mais également selon le procédé lent (sites difficiles d'accès). L'évolution de la quantité d'eau est régulière entre 40 et 90%HR contrairement au CO_{95%}-EA_{5%}-J où à haute humidité la contribution du procédé rapide ($\frac{MC_1}{EMC}$) devient moins importante. L'évolution des mécanismes rapide et lent lors de la désorption ont des profils différents suivant le type de matière composant les échantillons. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J désorbe fortement à partir des sites faciles d'accès pour diminuer brusquement l'impact de ce mécanisme à plus haute humidité en ralentissant la vitesse de désorption des molécules de vapeur d'eau (pente faible). Pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J contenant du polyacrylate une vitesse de transfert d'humidité rapide (pente élevée) implique une désorption selon les deux procédés. Pour les échantillons contenant de la viscose, la désorption est très importante selon le procédé rapide pour diminuer à plus haute humidité.

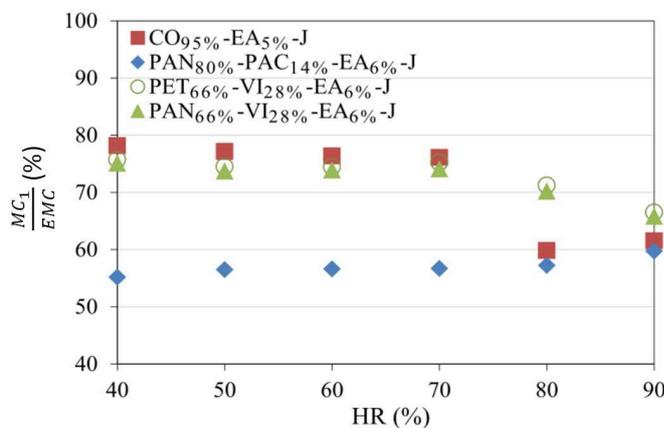


FIGURE 4.3 – Contribution du mécanisme rapide entre 40 et 90 %HR en désorption pour les échantillons testés au porté.

4.2.2.4 Conclusion

Lors de la première étude DermScan, le CO_{95%}-EA_{5%}-J assèche la surface cutanée après 4h. Les résultats obtenus avec le MMT indiquent que le temps nécessaire pour

mouiller la surface en contact avec la peau est très rapide. Les fibres de coton ont une affinité très importante avec les molécules d'eau et créent de nombreuses liaisons hydrogènes avec celles-ci. Par ailleurs, cette matière a du mal à désorber l'eau maintenue au sein de sa structure fibreuse (faible R). Ce comportement est visible sur les résultats obtenus avec le cadre. Le processus de désorption débute après les autres échantillons textiles avec une vitesse de transfert des molécules de vapeur d'eau lente (pente faible). Le textile emmagasine une quantité importante d'eau au sein de sa structure fibreuse ralentissant le processus de désorption. L'eau est majoritairement sorbée et désorbée selon le procédé rapide au niveau des sites faciles d'accès (à la surface et au sein des zones amorphes).

Le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J permet d'augmenter le taux d'hydratation cutanée après 4h. Une partie de l'humidité est sorbée à la surface du textile en contact avec la peau (AR_{Top}). Le temps nécessaire pour mouiller la surface intérieure est faible (WT_{Top}), ce qui permet, lors de la sorption, de limiter l'assèchement cutané tout en maintenant une certaine humidité. Entre 40 et 50 %HR, la contribution du mécanisme lent (modèle de PEK) est la plus importante. Le textile crée davantage de liaisons au niveau des sites difficiles d'accès (pores et surfaces des zones cristallines). Lors de la désorption, le procédé rapide prédomine avec une contribution non négligeable du mécanisme lent. Les résultats obtenus avec le cadre indiquent que la vitesse de transfert des molécules de vapeur d'eau vers le milieu extérieur est très importante lorsque le phénomène de désorption est enclenché. Ce textile désorbe rapidement l'humidité présente au sein de sa structure fibreuse (R important).

Le PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J emmagasine l'humidité et la transfère directement au sein du textile pour la désorber facilement vers le milieu extérieur. Le temps WT_{Top} est intermédiaire entre le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et le CO_{95%}-EA_{5%}-J. Ce tricot assèche davantage la surface cutanée, lors du processus de sorption, que le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et de manière négligeable par rapport au CO_{95%}-EA_{5%}-J. A 40 et 50 %HR, en sorption/désorption, le mécanisme prédominant est le procédé rapide. La désorption débute en avance par rapport aux échantillons contenant du polyacrylate et du coton avec une vitesse de désorption moyenne.

Le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J présente un comportement similaire au PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J en sorption et en désorption. Le paramètre WT_{Top} est similaire à celui du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J. En effet, lors des essais au porté, ce textile permet d'augmenter le taux d'hydratation de la surface cutanée avec des valeurs proches du PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J. Cependant, l'humidité au niveau de la surface intérieure en contact avec la peau n'est pas maintenue, mais elle est directement dirigée au sein du textile. Ce tricot démarre avec une légère avance le procédé de désorption par rapport au PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J. Davantage d'humidité est évacuée vers le milieu extérieur (R légèrement supérieur).

4.3 Conclusion

Les essais au porté indiquent que le CO_{95%}-EA_{5%}-J assèche considérablement la surface cutanée. Le PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J a un comportement neutre similaire à la

peau nue. Il ne permet pas d'augmenter le taux d'hydratation mais sans avoir un effet asséchant sur la peau. Le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J et le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J présentent des comportements similaires. Différentes méthodes de caractérisation sont réalisées afin de comprendre les mécanismes permettant de justifier les résultats obtenus au porté.

L'instrumentation du Skin Model par le cadre (entre 40 et 90 %HR) apporte des informations sur l'instant où le procédé de désorption démarre. La vitesse de transfert des molécules d'eau vers le milieu extérieur (pentes) est également mesurée. En comparant les textiles testés au porté, des différences de comportement sont visibles entre les matières contenant de la viscose, du polyacrylate et du coton. La vitesse de transfert d'humidité par le coton est ralentie par son affinité importante avec les molécules d'eau. Un textile comportant du polyacrylate désorbe rapidement l'humidité une fois que le processus de désorption est enclenché. Les échantillons à base de viscose désorbent en moins de temps les molécules d'eau vers le milieu extérieur avec une vitesse modérée. Les tests réalisés avec le MMT apportent des informations sur la gestion de l'eau liquide par les textiles. Un textile constitué de coton met moins de temps à créer des liaisons hydrogènes avec l'eau en surface qu'un textile contenant de la viscose ou du polyacrylate. Le CO_{95%}-EA_{5%}-J a tendance à garder au sein de sa structure fibreuse l'humidité en désorbant peu. Les autres matières vont transférer cette humidité facilement vers le milieu extérieur. Les essais DVS permettent de connaître la contribution des mécanismes rapide et lent (modèle de PEK) sur la sorption/désorption en vapeur d'eau des textiles. L'eau est principalement sorbée selon le mécanisme lent en sorption à 40 %HR pour le PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J et le PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J. En désorption, pour l'ensemble des textiles le mécanisme rapide prédomine sur le mécanisme lent. Par ailleurs, la quantité d'eau emmagasinée dans le tricot et l'hystérésis sont importants pour les textiles très hydrophiles comparés aux textiles hydrophobes. Ces résultats sont inversement corrélés avec les pentes mesurées. Une vitesse de transfert rapide est mesurée pour les textiles hydrophobes retenant peu l'humidité et une vitesse lente pour les textiles hydrophiles créant davantage de liaisons hydrogènes en ralentissant le transfert d'humidité. Le paramètre W_d du récipient renversé avec desiccant est influencé par la contexture du textile. La contexture d'un jersey, plus ouverte qu'une structure interlock, facilite le passage des molécules d'eau à travers le textile.

Les résultats obtenus lors des essais au porté dépendent principalement de la capacité de l'étoffe à créer rapidement des liaisons hydrogènes à la surface intérieure du tricot en contact avec la peau. Le type de mécanisme (à faible humidité) impliqué lors de la sorption va influencer le maintien ou non d'un certain taux d'hydratation à la surface de la peau après 4h. La nature des fibres utilisées engendre des comportements hydriques différents. Un textile très hydrophile va emmagasiner davantage d'humidité au sein du textile en asséchant la surface cutanée selon le mécanisme rapide.

Bibliographie

YOON, HN et A BUCKLEY (1984). « Improved comfort polyester : Part I : Transport properties and thermal comfort of polyester/cotton blend fabrics ». In : *Textile Research Journal* 54.5, p. 289-298.

Conclusion

L'objectif de cette thèse est de comprendre, analyser, et de modéliser les interactions sous-vêtement/peau par la création d'un banc d'essai référent. La compréhension des mécanismes hydriques mis en jeu est primordiale pour concevoir des textiles permettant d'optimiser le confort au porté.

Le premier chapitre a permis de définir les paramètres influençant le confort ainsi que l'impact de la nature des fibres et du style du vêtement sur celui-ci. Les méthodes et appareils existants, évaluant les propriétés des étoffes en lien avec le confort, ne permettent pas de modéliser les transferts hydriques en dynamique et l'influence du microclimat. Des essais au porté, proches des conditions réelles d'utilisation, sont réalisés pour confirmer les résultats obtenus avec ces tests. Ainsi, il est nécessaire de réaliser un banc de mesure permettant de trouver une alternative aux essais au porté généralement long et coûteux à mettre en place. Le second chapitre décrit les fibres utilisées et les méthodes usuelles mises en place pour caractériser les échantillons étudiés. Une étude de l'impact des paramètres physiques du textile sur les indices caractérisant les transferts thermo-hydriques est réalisée selon l'analyse de Pearson. Le troisième chapitre est divisé en deux grandes parties. La première s'axe sur les résultats obtenus avec le DVS, dispositif mesurant la quantité d'eau sorbée et désorbée par le textile à différent taux d'humidité. Les résultats sont analysés en appliquant des modèles de la littérature apportant des informations sur les mécanismes mis en jeu lors des procédés de sorption/désorption. Suivant la nature des fibres contenues dans les échantillons textiles, les comportements hydriques obtenus diffèrent en sorption et en désorption. La seconde partie de ce chapitre décrit le banc d'essai conçu pour caractériser les transferts hydriques en dynamique tout en modélisant les effets du microclimat sur ces transferts. La réalisation de ce dispositif a pour objectif d'être un outil d'aide à la décision dans la réalisation de nouveaux mélanges fibreux. Le protocole, fiabilisé et reproductible, mesure la vitesse de transfert des molécules de vapeur d'eau lors de la désorption et le temps précis où débute ce phénomène pour différents tricots. Les résultats permettent de discriminer les échantillons textiles entre eux selon la nature des fibres les composants. Le quatrième chapitre étudie les corrélations existantes entre les méthodes utilisées lors de cette étude (DVS, cadre, MMT, récipient renversé avec desiccant) et les résultats obtenus lors des essais au porté mesurant la capacité de l'étoffe à maintenir ou à assécher la surface cutanée. Les comportements des textiles observés lors des essais au porté sont fortement influencés par la capacité des fibres,

en contact avec la peau, à créer des liaisons hydrogènes rapidement avec les molécules de vapeur d'eau. Ce phénomène influence le maintien de l'humidité ou l'assèchement cutané. Le confort dépend également de la gestion globale hydrique des textiles en sorption/désorption. Certaines fibres retiennent l'humidité au sein de la structure fibreuse en désorbant peu vers le milieu extérieur engendrant une sensation de moiteur à long terme. D'autres textiles transfèrent rapidement voire progressivement l'excès d'humidité contenue dans les fibres. Le confort au porté est alors un équilibre entre les phénomènes mis en jeu lors des procédés de sorption et de désorption.

L'ensemble des connaissances et des outils développés dans cette thèse permettent de mieux appréhender la gestion hydrique des textiles synthétiques.

Bibliographie

- AATCC195 (2015). *SDLATLAS, Moisture Management Tester M290 MMT : Instruction Manual*.
- ABEGG, D (2009). *Les thermo TRP*.
- ABELÉ, C et al. (2009). *Transferts d'humidité à travers les parois. Evaluer les risques de condensation*.
- ADDIACTIVE (23 fév. 2016). *Mesurer l'hydratation*. URL : <http://www.addiactive.com/peau/mesurer-lhydratation>.
- AGUERRE, RJ, C SUAREZ et PE VIOLLAZ (1989). « New BET type multilayer sorption isotherms ». In : *Part II : Modelling water sorption in foods. Lebensm.* 22, p. 192-195.
- ALIX, S et al. (2014). « Pressure impact of autoclave treatment on water sorption and pectin composition of flax cellulosic-fibres ». In : *Carbohydrate polymers* 102, p. 21-29.
- AR, NGH, KG HAL et B JONES (2006). « Convection and Ventilation in fabric Layers ». In : *Thermal and moisture transport in fibrous materials*, p. 271.
- ARABULI, Svitlana et al. (2010). « Analysis of modern methods for measuring vapor permeability properties of textiles ». In :
- ASHRAE (1997). *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning engineers*.
- BARBA, C et al. (2013). « Moisture sorption/desorption of protein fibres ». In : *Thermochimica acta* 552, p. 70-76.
- BEDEK, G (2010). « Elaboration et conception d'une structure textile auto-rafraichissante ». Thèse de doct. Lille 1.
- BEDEK, G et al. (2011). « Evaluation of thermal and moisture management properties on knitted fabrics and comparison with a physiological model in warm conditions ». In : *Applied ergonomics* 42.6, p. 792-800.
- BELBEKHOUCHE, S et al. (2011). « Water sorption behavior and gas barrier properties of cellulose whiskers and microfibrils films ». In : *Carbohydrate Polymers* 83.4, p. 1740-1748.
- BEN AMAR, S (1998). « Étude expérimentale et modélisation des transferts de masse et de chaleur a travers un tissu vestimentaire en régime dynamique : phénomène de sorption, de mouillage et de capillarité ». Thèse de doct. Nice.
- BESSADOK, A et al. (2007). « Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties ». In : *Composites science and technology* 67.3-4, p. 685-697.

- BHOURI, N, S BENNASRALLAH et P PERRE (2012). « Influence of geometrical structure on sorption isotherms of Jersey and yarns made of cotton at two temperatures ». In : *Microporous and Mesoporous Materials* 163, p. 76-84.
- BIGOURET, A (2012). « Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées ». Thèse de doct. Lyon, INSA.
- BRADLEY, RS (1936). « Polymolecular adsorbed films. Part I. The adsorption of argon on salt crystals at low temperatures, and the determination of surface fields ». In : *Journal of the Chemical Society*, p. 1467-1474.
- BRUNAUER, S, PH EMMETT et E TELLER (1938). « Adsorption of gases in multimolecular layers ». In : *Journal of the American chemical society* 60.2, p. 309-319.
- BS7209 (1990). *Etoffes pour vêtements perméables à la vapeur d'eau - Specification for water vapour permeable apparel fabrics*.
- CANDAS, V (2003). « L'homme dans son environnement climatique, facteurs d'influence, thermorégulation, sensibilité et confort thermiques ». In : *Actes de la 13eme journée du Cuepe*.
- CAURIE, M (1970). « A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehydrated foods ». In : *International Journal of Food Science and Technology* 5.3, p. 301-307.
- CÉLINO, A et al. (2013). « Characterization and modeling of the moisture diffusion behavior of natural fibers ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 130.1, p. 297-306.
- CEYLAN, Ö, F GOUBET et K DE CLERCK (2014). « Dynamic moisture sorption behavior of cotton fibers with natural brown pigments ». In : *Cellulose* 21.3, p. 1149-1161.
- EL-CHAKAR, E (1994). « Transfert d'eau liquide dans les parois du bâtiment ». Thèse de doct. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- CHEN, CS et JT CLAYTON (1971). « The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials ». In : *Transactions of the ASAE* 14.5, p. 927-0929.
- CHUNG, DS et HB PFOST (1967). « Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products Part II : Development of the general isotherm equation ». In : *Transactions of the ASAE* 10.4, p. 552-0555.
- ÇIL, MG, UB NERGİS et C CANDAN (2009). « An experimental study of some comfort-related properties of cotton—acrylic knitted fabrics ». In : *Textile Research Journal* 79.10, p. 917-923.
- CONRAD (8 fév. 2016). *Capteur d'humidité*. URL : <https://www.conrad.fr/ce/fr/product/156545/Capteur-dhumidite-BB-Thermo-Technik-CON-EFS10-Plage-de-mesure-20-90-HR-1-pcs>.
- COSMETICOFFICINE (5 juin 2016). *Les annexes cutanées*. consulté le 01/02/2016. URL : <http://www.cosmeticofficine.com/la-peau/les-annexes-cutanees/>.
- DAIAN, JF (1986). « Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau meso et macroporeux : étude expérimentale du mortier de ciment. » Thèse de doct. Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- (2010). « Equilibre et transferts en milieux poreux I-Etats d'équilibre ». In : *Université Joseph Fourier, Grenoble*.

- DAS, A et R ALAGIRUSAMY (2010). *Science in clothing comfort*.
- DAS, A, R ALAGIRUSAMY et al. (2012). « Study on heat transmission through multilayer clothing assemblies under different convective modes ». In : *Journal of The Textile Institute* 103.7, p. 777-786.
- DAS, B et al. (2008). « Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics ». In : *Fibers and Polymers* 9.2, p. 225-231.
- DAY, DL et GL NELSON (1965). « Desorption isotherms for wheat ». In : *Transactions of the ASAE* 8.2, p. 293-0297.
- DEMATICE (23 fév. 2016). *Hydratation cutanée*. URL : http://www.dematice.org/ressources/DCEM3/dermatologie/D3_derm_004/web/co/HYDRATATION%20CUTANEE-2.html.
- DERBEL, H (1990). « Modélisation dynamique des transferts de chaleur et d'humidité à travers le vêtement : couplage avec deux modèles de thermorégulation humaine ». Thèse de doct. Toulouse 3.
- DJONGYANG, N, R TCHINDA et D NJOMO (2010). « Thermal comfort : A review paper ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14.9, p. 2626-2640.
- DONNARUMMA, D et al. (2015). « Water evaporation from porous media by Dynamic Vapor Sorption ». In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 480, p. 159-164.
- DUFORESTEL, T (1992). « Bases météorologiques et modèles pour la simulation du comportement hygrothermique des composants et ouvrages du bâtiment ». Thèse de doct. ENPC.
- EICHHORN, S et al. (2009). *Handbook of Textile Fibre Structure : Volume 2 : Natural, Regenerated, inorganic and Specialist Fibres*. Elsevier.
- F2298 (2003). *Standard Test Methods for Water Vapor Diffusion Resistance and Air Flow Resistance of Clothing Materials Using the Dynamic Moisture Permeation Cell*.
- FAN, J et al. (2004). « An improved model of heat and moisture transfer with phase change and mobile condensates in fibrous insulation and comparison with experimental results ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47.10-11, p. 2343-2352.
- FARNWORTH, B, WA LOTENS et PPMM WITTGEN (1990). « Variation of water vapor resistance of microporous and hydrophilic films with relative humidity ». In : *Textile research journal* 60.1, p. 50-53.
- FENGZHI, L et L Yi (2005). « Effect of clothing material on thermal responses of the human body ». In : *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 13.6, p. 809.
- FOLLAIN, N et al. (2016). « Water sorption behaviour of two series of PHA/montmorillonite films and determination of the mean water cluster size ». In : *Physical Chemistry Chemical Physics* 18.30, p. 20345-20356.
- FOURMENTIN, M (2015). « Impact de la répartition et des transferts d'eau sur les propriétés des matériaux de construction à base de chaux formulées ». Thèse de doct. Université Paris-Est.
- FREUNDLICH, H et HS HATFIELD (1926). *Colloid and capillary chemistry*. Methuen et Co. Ltd; London.

- GERALDES, MJ, C MONTEIRO et L HES (2012). « Study and Interpretation of the Mass Transfer Phenomena through Textile Structures in the Wet State ». In : *Defect and Diffusion Forum*. T. 326. Trans Tech Publ, p. 205-208.
- GIDIK, H (2015). « Réalisation d'un fluxmètre thermique à gradient tangentiel de température à paroi auxiliaire textile intégrant des fils thermoélectriques : application à la mesure des transferts thermiques et hydriques ». Thèse de doct. Lille 1.
- GoTRONIC (18 nov. 2015). *Capteur d'humidité résistif*. URL : <http://www.gotronic.fr/art-capteur-d-humidite-resistif-h25k5a-11551.htm>.
- GUNESOGLU, S, B MERIC et C GUNESOGLU (2005). « Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics ». In : *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 13.2, p. 46.
- HALSEY, G (1948). « Physical adsorption on non-uniform surfaces ». In : *The Journal of Chemical Physics* 16.10, p. 931-937.
- HAMOUCHE, H (2012). « Caractérisation des fibres kératiniques en vue de leur utilisation comme capteur d'humidité. » Thèse de doct. Université Mouloud Mammeri.
- HARKINS, WD et G JURA (1944). « Surfaces of solids. XIII. A vapor adsorption method for the determination of the area of a solid without the assumption of a molecular area, and the areas occupied by nitrogen and other molecules on the surface of a solid ». In : *Journal of the American Chemical Society* 66.8, p. 1366-1373.
- HATAKEYAMA, T et al. (2012). « Comparison of measurement techniques for the identification of bound water restrained by polymers ». In : *Thermochimica acta* 532, p. 159-163.
- HATCH, KL et al. (1990). « In vivo cutaneous and perceived comfort response to fabric : part I : thermophysiological comfort determinations for three experimental knit fabrics ». In : *Textile Research Journal* 60.7, p. 405-412.
- HAVENITH, G (2002). « Interaction of clothing and thermoregulation ». In : *Exogenous Dermatology* 1.5, p. 221-230.
- HAVENITH, G, I HOLMÉR et K PARSONS (2002). « Personal factors in thermal comfort assessment : clothing properties and metabolic heat production ». In : *Energy and buildings* 34.6, p. 581-591.
- HEARLE, JWS et WE MORTON (2008). *Physical properties of textile fibres*. Elsevier.
- HENDERSON, SM (1952). « A basic concept of equilibrium moisture ». In : *Agricultural Engineering* 33, p. 29-32.
- HERNANDEZ, GM (2002). « Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie électronique à balayage environnementale (ESEM) et analyse digitale d'images ». Thèse de doct. Université Louis Pasteur-Strasbourg I.
- HES, L et M de ARAUJO (2010). « Simulation of the effect of air gaps between the skin and a wet fabric on resulting cooling flow ». In : *Textile Research Journal* 80.14, p. 1488-1497.
- HES, L et J WILLIAMS (2011). « Laboratory measurement of thermo-physiological comfort ». In : *Improving comfort in clothing*. Elsevier, p. 114-137.
- HILL, CAS, BA KEATING et al. (2012). « A rheological description of the water vapour sorption kinetics behaviour of wood invoking a model using a canonical assembly

- of Kelvin-Voigt elements and a possible link with sorption hysteresis ». In : *Holzfor-*
schung 66.1, p. 35-47.
- HILL, CAS, G NEWMAN et A NORTON (2010). « The water vapor sorption behavior of flax
fibers—Analysis using the parallel exponential kinetics model and determination
of the activation energies of sorption ». In : *Journal of applied polymer science* 116.4,
p. 2166-2173.
- HILL, CAS, A NORTON et G NEWMAN (2009). « The water vapor sorption behavior of
natural fibers ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 112.3, p. 1524-1537.
- HILL, CAS, AJ NORTON et G NEWMAN (2010). « The water vapour sorption properties of
Sitka spruce determined using a dynamic vapour sorption apparatus ». In : *Wood
Science and Technology* 44.3, p. 497-514.
- HILL, CAS, J RAMSAY et al. (2012). « The water vapour sorption properties of thermally
modified and densified wood ». In : *Journal of Materials Science* 47.7, p. 3191-3197.
- HILL, CAS et Y XIE (2011). « The dynamic water vapour sorption properties of natural
fibres and viscoelastic behaviour of the cell wall : is there a link between sorption
kinetics and hysteresis? » In : *Journal of materials science* 46.11, p. 3738-3748.
- HILL, C et al. (2011). « Influence of earlywood/latewood and ring position upon water
vapour sorption properties of Sitka spruce ». In : *International Wood Products Journal*
2.1, p. 12-19.
- HOLMÉR, I et al. (1999). « Clothing convective heat exchange—proposal for improved
prediction in standards and models ». In : *The Annals of occupational hygiene* 43.5,
p. 329-337.
- HUANG, J et Y CHEN (2010). « Effects of air temperature, relative humidity, and wind
speed on water vapor transmission rate of fabrics ». In : *Textile research journal* 80.5,
p. 422-428.
- HUANG, J et X QIAN (2007). « A new test method for measuring the water vapour
permeability of fabrics ». In : *Measurement Science and Technology* 18.9, p. 3043.
- HUANG, J et XM QIAN (2008). « Comparison of test methods for measuring water vapor
permeability of fabrics ». In : *Textile Research Journal* 78.4, p. 342-352.
- HUANG, J, J WU et W XU (2014). « Coupling effects of steady-state heat and water vapor
transfer through fabrics ». In : *Textile Research Journal* 84.20, p. 2157-2165.
- HUNTER, L et J FAN (2014). « Improving the comfort of garments ». In : *Textiles and
Fashion*, p. 739-761.
- IGLESIAS, HA (1981). « An equation for fitting uncommon water sorption isotherms in
foods. » In : *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 14, p. 105.
- ISO10551 (1995). *Ergonomie des ambiances thermiques - Évaluation de l'influence des
ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs.*
- ISO11092 (2014). *Textiles - Effets physiologiques - Mesurage de la résistance thermique et de
la résistance à la vapeur d'eau en régime stationnaire (essai de la plaque chaude gardée
transpirante).*
- ISO12127 (1998). *Textiles. Fabrics. Determination of mass per unit area using small samples.*
- ISO139 (2005). *Textiles - Standard atmospheres for conditioning and testing.*

- ISO22007-2 (2015). *Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la source plane transitoire (disque chaud)*.
- ISO5084 (1996). *Textiles - Determination of thickness of textiles and textile products*.
- ISO7730 (2005). *Ergonomie des ambiances thermiques -Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*.
- ISO7933 (2004). *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain*.
- ISO9237 (1995). *Textiles -Determination of the permeability of fabrics to air*.
- ISSAADI, N (2015). « Effets de la variabilité des propriétés de matériaux cimentaires sur les transferts hygrothermiques : développement d'une approche probabiliste ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.
- ST-JACQUES, R (15 avr. 2016). *CorpsHumain.ca*. Consulté le 25/01/2016. URL : <http://www.corpshumain.ca/Cerveau2.php>.
- JALALUDIN, Z et al. (2010). « Analysis of water vapour sorption of oleo-thermal modified wood of *Acacia mangium* and *Endospermum malaccense* by a parallel exponential kinetics model and according to the Hailwood-Horrobin model ». In : *Holzforschung* 64.6, p. 763-770.
- JISL1099 (2012). *Testing methods for water vapour permeability of textiles*.
- KACHRIMANIS, K et al. (2006). « Dynamic moisture sorption and desorption of standard and silicified microcrystalline cellulose ». In : *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 64.3, p. 307-315.
- KAPLAN, S et A OKUR (2010). « A new dynamic sweating hotplate system for steady-state and dynamic thermal comfort measurements ». In : *Measurement Science and Technology* 21.8, p. 085701.
- KEATING, BA et al. (2013). « The water vapor sorption behavior of a galactomannan cellulose nanocomposite film analyzed using parallel exponential kinetics and the Kelvin-Voigt viscoelastic model ». In : *Journal of Applied Polymer Science* 129.4, p. 2352-2359.
- KIM, E, SJ YOO et H SHIM (2006). « Performance of selected clothing systems under sub-zero conditions : determination of performance by a human-clothing-environment simulator ». In : *Textile research journal* 76.4, p. 301-308.
- KIM, EA, S YOO et J KIM (2003). « Development of a human-clothing-environment simulator for dynamic heat and moisture transfer properties of fabrics ». In : *Fibers and Polymers* 4.4, p. 215-221.
- KIM, HK, Y SONG et KL YAM (1994). « Water sorption characteristics of dried red peppers (*Capsicum annum L.*) ». In : *International journal of food science and technology* 29.3, p. 339-345.
- KOHLER, R et al. (2003). « A numeric model for the kinetics of water vapor sorption on cellulosic reinforcement fibers ». In : *Composite Interfaces* 10.2-3, p. 255-276.
- KÜHN, I (1967). « A generalized potential theory of adsorption : I. The derivation of a general equation for adsorption isotherms ». In : *Journal of Colloid and Interface Science* 23.4, p. 563-571.

- LAING, RM et al. (2010). « Standard test methods adapted to better simulate fabrics in use ». In : *Textile Research Journal* 80.12, p. 1138-1150.
- LAROUSSE, médical (3 mar. 2016). URL : <http://www.larousse.fr/encyclopedie/medical/peau/15217>.
- LEAHY, MJ et al. (2007). « Biophotonic methods in microcirculation imaging ». In : *Medical Laser Application* 22.2, p. 105-126.
- LEHOUELLEUR, J (2010). *L'hypothalamus régulation de la température corporel, de l'osmolarité de l'espace extracellulaire et du fonctionnement endocrine*. URL : <http://www.neurone.fr/>.
- LELIÉVRE, D (2015). « Simulation numérique des transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi multicouche de bâtiment en matériaux biosourcés ». Thèse de doct. Lorient.
- LOTENS, WA (1993). « Heat transfer from humans wearing clothing ». Thèse de doct. TNO.
- MACRAE, BA, RM LAING et CA WILSON (2011). « Importance of air spaces when comparing fabric thermal resistance ». In : *Textile Research Journal* 81.19, p. 1963-1965.
- MARIEB, E et K HOEHN (2014). *Anatomie et physiologie humaines*. Pearson Education France.
- MARTINET, C et JP MEYER (1999). *Travail à la chaleur et confort thermique*. Rapp. tech. INRS.
- MAZEAU, K (2015). « The hygroscopic power of amorphous cellulose : a modeling study ». In : *Carbohydrate polymers* 117, p. 585-591.
- MCCULLOUGH, EA, M KWON et H SHIM (2003). « A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics ». In : *Measurement Science and Technology* 14.8, p. 1402.
- MCHIRGUI, W (2012). « Modélisation des transferts hydriques dans les milieux poreux partiellement saturés par homogénéisation périodique : Application aux matériaux cimentaires ». Thèse de doct. Université de La Rochelle.
- MIJOVIĆ, B, I SALOPEK ČUBRIĆ et Z SKENDERI (2010). « Measurement of thermal parameters of skin-fabric environment ». In : *Periodicum biologorum* 112.1, p. 69-73.
- MIN, K et al. (2007). « Heat and moisture transfer from skin to environment through fabrics : a mathematical model ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50.25-26, p. 5292-5304.
- MIZRAHI, S, TP LABUZA et M KAREL (1970). « Computer-aided predictions of extent of browning in dehydrated cabbage ». In : *Journal of Food Science* 35.6, p. 799-803.
- MORELL, M (20 mar. 2016). *Med-Hycos - les Données*. URL : <http://medhycos.mp1.ird.fr/fr/t1.tecisensorsi&gn=humidite.inc.html>.
- AL-MUHTASEB, AH, WAM McMINN et TRA MAGEE (2002). « Moisture sorption isotherm characteristics of food products : a review ». In : *Food and Bioproducts Processing* 80.2, p. 118-128.
- MURAILLE, L et al. (2015). « Impact of lignin on water sorption properties of bioinspired self-assemblies of lignocellulosic polymers ». In : *European Polymer Journal* 64, p. 21-35.

- NARÇON, S (2001). « Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort ». In : *Neurosciences et Comportement*.
- NICKERSON, RF (1954). « Cotton Fiber : Microscopic Characteristics ». In : *Matthews "Textile Fibers," 6th Edit., Mauersberger, HR, Editor, Wiley, New York*, p. 151-182.
- OĞLAKCIOĞLU, N et A MARMARALI (2007). « Thermal comfort properties of some knitted structures ». In : *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 15.5-6, p. 64-65.
- OHMIC (2 déc. 2015). *Capteur à conductivité thermique*. URL : https://www.ohmic-instruments.com/home/?page_id=46.
- OKUBAYASHI, S, UJ GRIESSER et T BECHTOLD (2004). « A kinetic study of moisture sorption and desorption on lyocell fibers ». In : *Carbohydrate Polymers* 58.3, p. 293-299.
- ONAL, L et M YILDIRIM (2012). « Comfort properties of functional three-dimensional knitted spacer fabrics for home-textile applications ». In : *Textile Research Journal* 82.17, p. 1751-1764.
- ÖNER, E et al. (2013). « Evaluation of moisture management properties on knitted fabrics ». In : *Journal of the Textile Institute* 104.7, p. 699-707.
- ORMONDROYD, GA et al. (2017). « The water vapour sorption characteristics and kinetics of different wool types ». In : *The Journal of The Textile Institute* 108.7, p. 1198-1210.
- OSWIN, CR (1946). « The kinetics of package life. III. The isotherm ». In : *Journal of the Society of Chemical Industry* 65.12, p. 419-421.
- ÖZDİL, N, A MARMARALI et SD KRETZSCHMAR (2007). « Effect of yarn properties on thermal comfort of knitted fabrics ». In : *International journal of Thermal sciences* 46.12, p. 1318-1322.
- ÖZDİL, N, G SÜPÜREN et al. (2009). « A study on the moisture transport properties of the cotton knitted fabrics in single jersey structure. » In : *Journal of Textile and Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon* 19.3.
- PAN, N et P GIBSON (2006). *Thermal and moisture transport in fibrous materials*. Woodhead Publishing.
- PARSONS, K (2014). *Human thermal environments : the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. CRC press.
- PAVLOVIĆ, SS et al. (2014). « Transient thermal response of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers ». In : *Polymer Testing* 34, p. 97-102.
- PEJIC, BM et al. (2008). « The effects of hemicelluloses and lignin removal on water uptake behavior of hemp fibers ». In : *Bioresource Technology* 99.15, p. 7152-7159.
- PELEG, M (1993). « Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms 1 ». In : *Journal of Food Process Engineering* 16.1, p. 21-37.
- PENG, G et al. (2007). « Modeling of water sorption isotherm for corn starch ». In : *Journal of Food Engineering* 80.2, p. 562-567.
- POBOT (25 jan. 2015). *Capteur d'humidité résistif*. URL : <http://www.pobot.org/Capteur-d-humidite-resistif.html>.

- POPESCU, CM et CAS HILL (2013). « The water vapour adsorption–desorption behaviour of naturally aged *Tilia cordata* Mill. wood ». In : *Polymer degradation and stability* 98.9, p. 1804-1813.
- POPESCU, CM, CAS HILL, S CURLING et al. (2014). « The water vapour sorption behaviour of acetylated birch wood : how acetylation affects the sorption isotherm and accessible hydroxyl content ». In : *Journal of materials science* 49.5, p. 2362-2371.
- POPESCU, CM, CAS HILL et C KENNEDY (2016). « Variation in the sorption properties of historic parchment evaluated by dynamic water vapour sorption ». In : *Journal of Cultural Heritage* 17, p. 87-94.
- PRAKASH, C, G RAMAKRISHNAN et CV KOUSHIK (2013). « Effect of blend proportion on moisture management characteristics of bamboo/cotton knitted fabrics ». In : *The Journal of The Textile Institute* 104.12, p. 1320-1326.
- QIAN, X et J FAN (2006). « Interactions of the surface heat and moisture transfer from the human body under varying climatic conditions and walking speeds ». In : *Applied ergonomics* 37.6, p. 685-693.
- QUÉNARD, D (1989). « Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques : approche du type percolation et expérimentation ». Thèse de doct. Toulouse, INPT.
- REN, YJ et JE RUCKMAN (2003). « Water vapour transfer in wet waterproof breathable fabrics ». In : *Journal of industrial textiles* 32.3, p. 165-175.
- ROSE, DA (1963). « Water movement in porous materials : Part 1-Isothermal vapour transfer ». In : *British Journal of Applied Physics* 14.5, p. 256.
- ROUQUEROL, J et al. (1994). « Recommendations for the characterization of porous solids ». In : *Pure and Applied Chemistry* 66.8, p. 1739-1758.
- SABRI, H (2000). « Etude de transfert de chaleur et de masse à travers les matériaux textiles. Détermination de la conductivité thermique des étoffes ». Thèse de doct. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir.
- SAHA, D et HA GRAPPE (2017). « Adsorption properties of activated carbon fibers ». In : *Activated Carbon Fiber and Textiles*. Elsevier, p. 143-165.
- SANGWICHEN, C, GL ARANOVICH et MD DONOHUE (2002). « Density functional theory predictions of adsorption isotherms with hysteresis loops ». In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 206.1-3, p. 313-320.
- SARI, H (1994). « L'interface vêtement : échanges hygrothermiques et microclimat sous-vestimentaire ». Thèse de doct. Nice.
- SIMO-TAGNE, M et al. (2016). « Sorption behavior of four tropical woods using a dynamic vapor sorption standard analysis system ». In : *Maderas. Ciencias y tecnología*. 18, p. 403-412.
- SING, KSW (1985). « Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity ». In : *Pure and applied chemistry* 57.4, p. 603-619.
- SLATER, K (1986). « Discussion paper the assessment of comfort ». In : *Journal of the textile institute* 77.3, p. 157-171.

- SMITH, SE (1947). « The sorption of water vapor by high polymers ». In : *Journal of the American Chemical Society* 69.3, p. 646-651.
- SONG, G (2011). *Improving comfort in clothing*.
- STANKOVIĆ, SB, D POPOVIĆ et GB POPARIĆ (2008). « Thermal properties of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers ». In : *Polymer Testing* 27.1, p. 41-48.
- STEVENS, K et M FULLER (2015). « Thermoregulation and clothing comfort ». In : *Textile-Led Design for the Active Ageing Population*. Elsevier, p. 117-138.
- TEXAS, Instruments (12 déc. 2015). *HIH-3610-003 Datasheet*. URL : <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/82433/HONEYWELL/HIH-3610-003/1243/3/HIH-3610-003.html>.
- TIMMERMANN, EO (2003). « Multilayer sorption parameters : BET or GAB values? » In : *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects* 220.1-3, p. 235-260.
- TRELOAR, LRG (1952). « The absorption of water by hair, and its dependence on applied stress ». In : *Transactions of the Faraday Society* 48, p. 567-576.
- UKONDAYANGA, P (6 déc. 2017). *La prise en charge des hémipariés consécutive à l'œdème cérébral*. URL : https://www.memoireonline.com/06/10/3570/m_La-prise-en-charge-des-hemiplegies-consecutive-a-loedeme-cerebral2.html.
- URQUHART, AR et AM WILLIAMS (1924). « The effect of temperature on the absorption of water by soda-boiled cotton ». In : *Journal of the Textile Institute Transactions* 15.12, T559-T572.
- VAN DEN BERG, C (1984). « Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption ». In : *Engineering science in the food industry*, p. 311-321.
- WATKINS, DA et K SLATER (1981). « The moisture-vapour permeability of textile fabrics ». In : *Journal of the Textile Institute* 72.1, p. 11-18.
- WEIDMANN, D (2010). *Aide-mémoire Textiles techniques*. Dunod.
- XIE, Y et al. (2011). « The water vapour sorption behaviour of three celluloses : analysis using parallel exponential kinetics and interpretation using the Kelvin-Voigt viscoelastic model ». In : *Cellulose* 18.3, p. 517-530.
- XU, X et J WERNER (2001). « A dynamic model of the human-clothing-environment system ». In : *Applied human science* 16.2, p. 61-75.
- YANNIOTIS, S et J BLAHOVEC (2009). « Model analysis of sorption isotherms ». In : *LWT-Food Science and Technology* 42.10, p. 1688-1695.
- YAO, BG et al. (2006). « An improved test method for characterizing the dynamic liquid moisture transfer in porous polymeric materials ». In : *Polymer Testing* 25.5, p. 677-689.
- YOO, HS, YS HU et EA KIM (2000). « Effects of heat and moisture transport in fabrics and garments determined with a vertical plate sweating skin model ». In : *Textile Research Journal* 70.6, p. 542-549.
- YOON, HN et A BUCKLEY (1984). « Improved comfort polyester : Part I : Transport properties and thermal comfort of polyester/cotton blend fabrics ». In : *Textile Research Journal* 54.5, p. 289-298.

- YOUNG, JH et GL NELSON (1967). « Research of hysteresis between sorption and desorption isotherms of wheat ». In : *Transactions of the ASAE* 10.6, p. 756-0761.
- ZAIHAN, J, S CURLING et al. (2010). « The kinetics of water vapour sorption : analysis using parallel exponential kinetics model on six Malaysian hardwoods ». In : *Journal of Tropical Forest Science*, p. 107-117.
- ZAIHAN, J, CAS HILL et al. (2009). « Moisture adsorption isotherms of *Acacia mangium* and *Endospermum malaccense* using dynamic vapour sorption ». In : *Journal of Tropical Forest Science*, p. 277-285.
- ZHANG, Z (2014). « Modelling of sorption hysteresis and its effect on moisture transport within cementitious materials ». Thèse de doct. Université Paris-Est.

Composition, caractéristiques physiques et thermo-hydriques des textiles

A.1 Détail de la composition des textiles étudiés	207
A.2 Caractéristiques physiques	207
A.3 Caractéristiques thermo-hydriques	207

A.1 Détail de la composition des textiles étudiés

A.2 Caractéristiques physiques

A.3 Caractéristiques thermo-hydriques

208ANNEXE A. Composition, caractéristiques physiques et thermo-hydriques des textiles

Nom de l'échantillon	Contexture	Détail de la composition
CO _{100%} -I	Interlock 1 × 1	100 % Coton
CO _{95%} -EA _{5%} -J	Jersey	95 % Coton, 5 % Élasthanne
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	Interlock 1 × 1	85 % Acrylique, 15 % Polyacrylate
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	Jersey	80 % Acrylique, 14 % Polyacrylate, 6 % Élasthanne
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	Interlock 1 × 1	1 fil de PAN _{85%} -PAC _{15%} -I : 43 % Acrylique, 7 % Polyacrylate ; et 1 fil de PAN _{50%} -PET _{50%} -I : 25 % Acrylique, 25 % Polyester
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	Jersey	87 % Acrylique, 7 % Polyacrylate, 6 % Élasthanne
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	Jersey	66 % Acrylique, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	Jersey	66 % Polyester, 28 % Viscose, 6 % Élasthanne
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J (fil F391+fil élasthanne)	Jersey	80 % Acrylique, 14 % Viscose, 6 % Élasthanne
PAN _{85%} -VI _{15%} -F (fil F391)		85 % Acrylique, 15 % Viscose
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	Interlock 1 × 1	50 % Acrylique, 50 % Polyester
PET _{95%} -EA _{5%} -J	Jersey	95 % Polyester, 5 % Élasthanne

TABLEAU A.1 – Composition des échantillons textiles étudiés.

Nom de l'échantillon	Masse surfacique (g.m ⁻²)	Épaisseur (mm) à 0,1 kPa	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Porosité (%)	Perméabilité à l'air (l.m ⁻² .s ⁻¹) à 100Pa	Taux de reprise en eau réel (%)
CO _{100%} -I	177 ± 3	1,03 ± 0,05	1,54	88,5 ± 6,1	861 ± 45	7,5 ± 0,5
CO _{95%} -EA _{5%} -J	166 ± 1	1,05 ± 0,02	1,52	89,5 ± 2,3	265 ± 8	7,1 ± 0,3
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	156 ± 4	1,22 ± 0,08	1,23	89,4 ± 8,5	1311 ± 60	4,2 ± 0,6
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	158 ± 2	1,02 ± 0,02	1,23	87,4 ± 3,2	785 ± 46	4,4 ± 0,1
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	157 ± 2	1,09 ± 0,06	1,26	88,5 ± 6,1	1163 ± 28	3,1 ± 0,3
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	145 ± 4	0,82 ± 0,04	1,21	85,4 ± 7,3	779 ± 18	2,8 ± 0,1
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	138 ± 5	0,71 ± 0,02	1,29	85,0 ± 5,6	1226 ± 32	5,0 ± 0,1
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	141 ± 3	0,82 ± 0,02	1,41	87,8 ± 4,4	1213 ± 70	4,1 ± 0,1
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	162 ± 4	0,95 ± 0,05	1,24	86,4 ± 7,1	1126 ± 40	3,6 ± 0,2
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	215 ± 2	1,31 ± 0,03	1,35	87,8 ± 3,0	1059 ± 73	1,1 ± 0,2
PET _{95%} -EA _{5%} -J	160 ± 2	0,64 ± 0,06	1,37	81,7 ± 9,2	418 ± 21	1,3 ± 0,2

TABLEAU A.2 – Caractéristiques physiques des échantillons textiles étudiés.

Nom de l'échantillon	R_{ct} ($m^2.K.W^{-1}$)	R_{et} ($m^2.Pa.W^{-1}$)	I_{mt}	b ($J.cm^{-2}.K^{-1}.s^{-1/2}$)	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	W_d ($g.m^{-2}.h^{-1}.Pa^{-1}$)
CO _{100%} -I	0,023	2,83	0,49	39,91 ± 4,05	0,045 ± 0,005	0,51
CO _{95%} -EA _{5%} -J	0,021	/	/	39,18 ± 2,13	0,046 ± 0,008	/
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	0,039	3,87	0,60	25,97 ± 2,50	0,031 ± 0,001	0,38
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	0,031	3,29	0,56	25,64 ± 1,51	0,033 ± 0,004	0,45
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	0,035	3,85	0,54	19,98 ± 3,50	0,031 ± 0,004	0,39
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	0,024	2,90	0,50	23,11 ± 1,20	0,029 ± 0,008	0,51
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,028	3,24	0,52	21,59 ± 3,45	0,025 ± 0,002	0,46
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	0,027	3,29	0,49	23,89 ± 5,10	0,030 ± 0,004	0,45
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	0,039	/	/	20,46 ± 2,03	0,024 ± 0,002	/
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,0315	4,47	0,42	27,43 ± 3,04	0,041 ± 0,002	0,34
PET _{95%} -EA _{5%} -J	/	/	/	20,06 ± 1,35	0,024 ± 0,005	/

TABLEAU A.3 – Caractéristiques thermique et hydrique des échantillons textiles étudiés.

210ANNEXE A. Composition, caractéristiques physiques et thermo-hydriques des textiles

Annexe **B**

Moisture Management Tester (MMT)

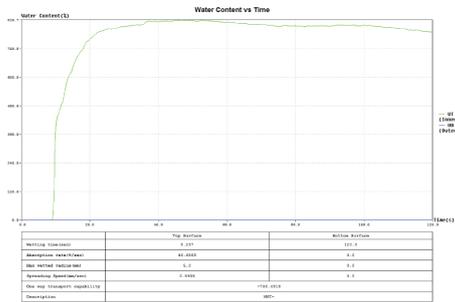
B.1 Données numériques	211
B.2 Courbes et schémas explicatifs	213

B.1 Données numériques

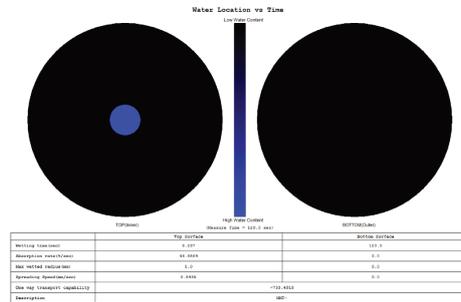
Nom de l'échantillon	WT _{Top} (s)	WT _{Bottom} (s)	AR _{Top} (%.s ⁻¹)	AR _{Bottom} (%.s ⁻¹)	MWR _{Top} (mm)	MWR _{Bottom} (mm)	SS _{Top} (mm.s ⁻¹)	SS _{Bottom} (mm.s ⁻¹)	R (%)	OMMC
CO _{100%} -I	9,7 ± 2,1	66,2 ± 76,1	50,9 ± 6,0	13,4 ± 18,9	5,0 ± 0,0	5,0 ± 7,1	0,5 ± 0,1	0,6 ± 0,9	-372,7 ± 51,0	0,05 ± 0,08
CO _{95%} -EA _{5%} -J	8,7 ± 0,6	34,6 ± 3,6	86,3 ± 34,5	71,2 ± 3,1	13 ± 3,5	10 ± 0,0	0,7 ± 0,1	0,3 ± 0,1	87,1 ± 80,7	0,32 ± 0,10
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	103,1 ± 29,3	7,7 ± 1,4	7,6 ± 13,1	63,4 ± 5,7	3,0 ± 5,8	8,0 ± 0,1	0,1 ± 0,1	0,7 ± 0,1	861,1 ± 203,0	0,65 ± 0,00
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	120,0 ± 0,0	9,1 ± 2,1	4,5 ± 2,0	76,1 ± 21,6	2,0 ± 3,0	10,0 ± 5,0	0,1 ± 0,1	0,7 ± 0,1	961,9 ± 111,3	0,68 ± 0,10
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	3,3 ± 0,5	3,4 ± 0,6	45,8 ± 7,7	55,8 ± 3,9	27,0 ± 2,9	23,0 ± 2,9	4,8 ± 0,7	4,6 ± 0,5	62,1 ± 18,1	0,50 ± 0,01
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J	120,0 ± 0,0	9,9 ± 4,1	0,0 ± 0,0	83,1 ± 6,9	0,0 ± 0,0	8,0 ± 2,9	0,0 ± 0,0	0,6 ± 0,2	822,7 ± 174,1	0,70 ± 0,02
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	120,0 ± 0,0	7,3 ± 1,9	0,0 ± 0,0	57,8 ± 11,9	0,0 ± 0,0	15,0 ± 5,0	0,0 ± 0,0	1,7 ± 0,4	877,3 ± 42,3	0,69 ± 0,04
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	115,3 ± 1,2	8,9 ± 1,4	0,0 ± 0,0	52,8 ± 9,1	0,0 ± 0,0	13,0 ± 7,6	0,0 ± 0,0	1,1 ± 0,4	853,5 ± 92,4	0,64 ± 0,04
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J	112,8 ± 0,0	9,2 ± 1,9	1,8 ± 0,0	48,5 ± 11,9	2,0 ± 0,0	17,0 ± 0,5	0,02 ± 0,0	1,2 ± 0,4	1071,0 ± 42,3	0,63 ± 0,04
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	9,0 ± 5,3	9,6 ± 6,4	35,5 ± 26,3	48,8 ± 26,0	18,0 ± 3,5	18,0 ± 3,5	1,9 ± 1,4	1,9 ± 1,4	161,5 ± 76,3	0,42 ± 0,10
PET _{95%} -EA _{5%} -J	12,5 ± 13,8	5,4 ± 3,6	28,0 ± 29,2	35,6 ± 23,5	13,0 ± 17,7	25,0 ± 0,0	2,1 ± 3,0	4,4 ± 0,3	100,0 ± 68,0	0,49 ± 0,01

TABLEAU B.1 – Résultats MMT des échantillons textiles étudiés.

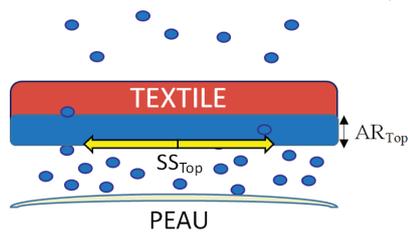
B.2 Courbes et schémas explicatifs



(a) Contenu en eau.



(b) Diffusion.



(c) Schéma explicatif.

FIGURE B.1 – MMT : gestion de l'eau liquide par CO_{100%}-I.

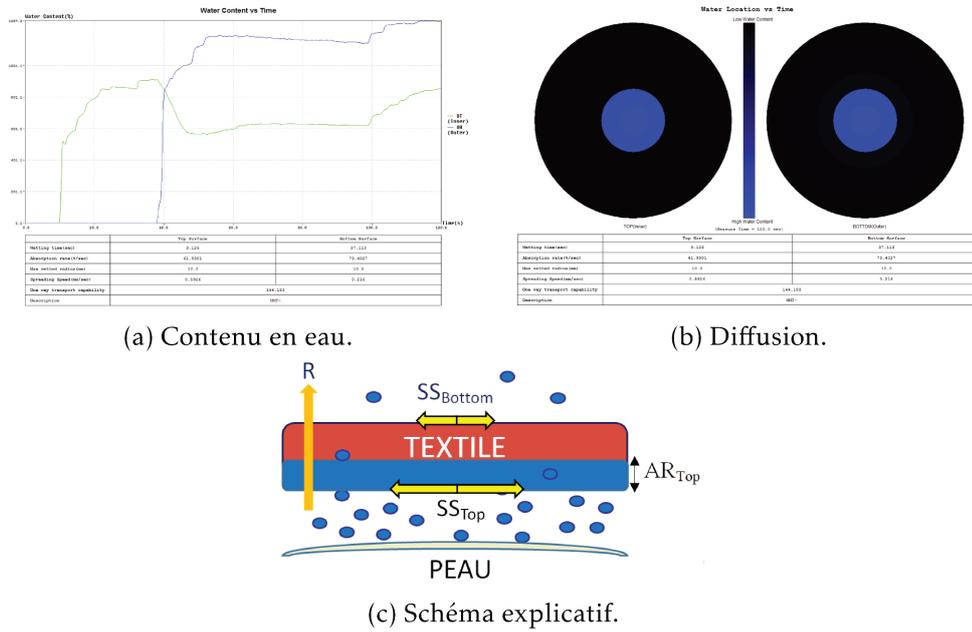


FIGURE B.2 – MMT : gestion de l'eau liquide par CO_{95%}-EA_{5%}-J.

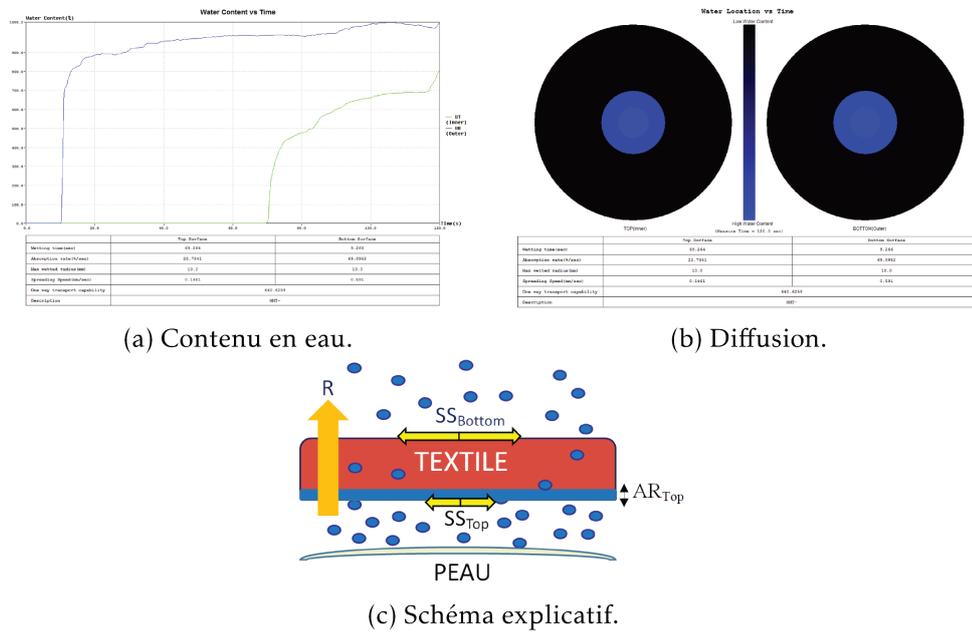
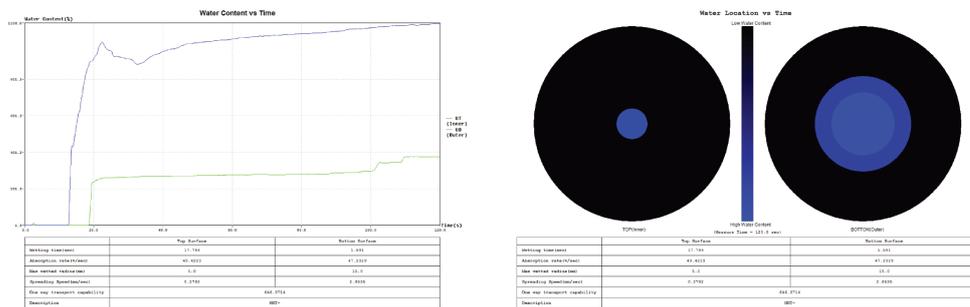
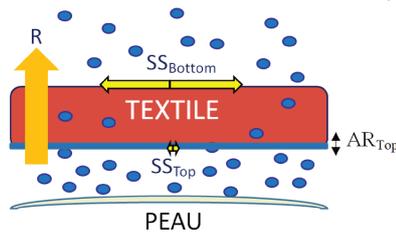


FIGURE B.3 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{85%}-PAC_{15%}-I.



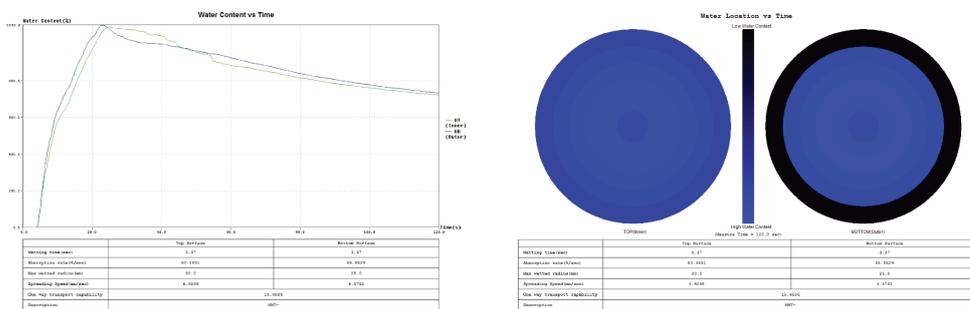
(a) Contenu en eau.

(b) Diffusion.



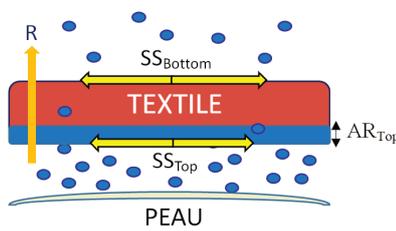
(c) Schéma explicatif.

FIGURE B.4 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{80%}-PAC_{14%}-EA_{6%}-J.



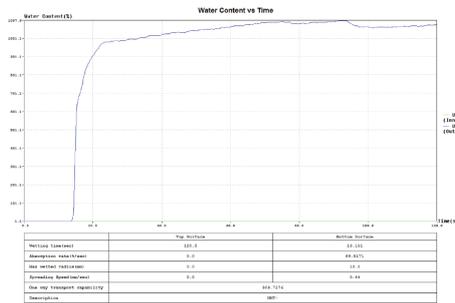
(a) Contenu en eau.

(b) Diffusion.

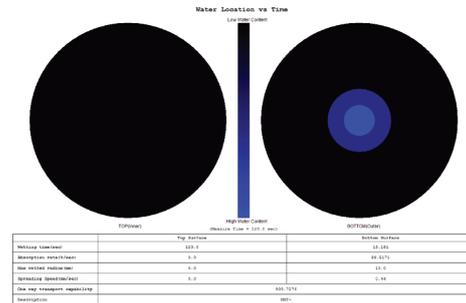


(c) Schéma explicatif.

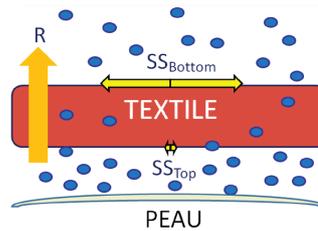
FIGURE B.5 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{68%}-PET_{25%}-PAC_{7%}-I.



(a) Contenu en eau.

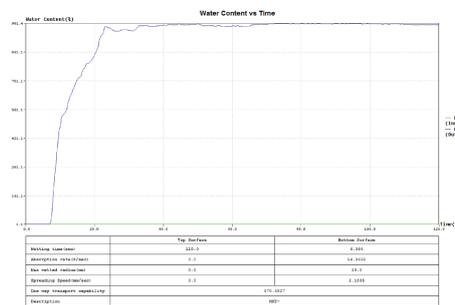


(b) Diffusion.

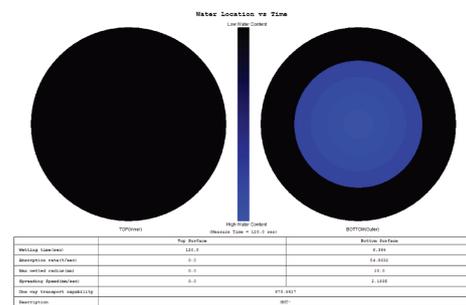


(c) Schéma explicatif.

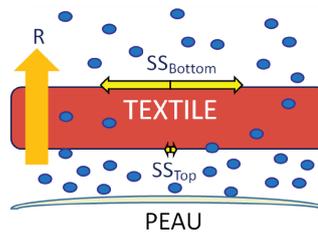
FIGURE B.6 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{87%}-PAC_{7%}-EA_{6%}-J.



(a) Contenu en eau.

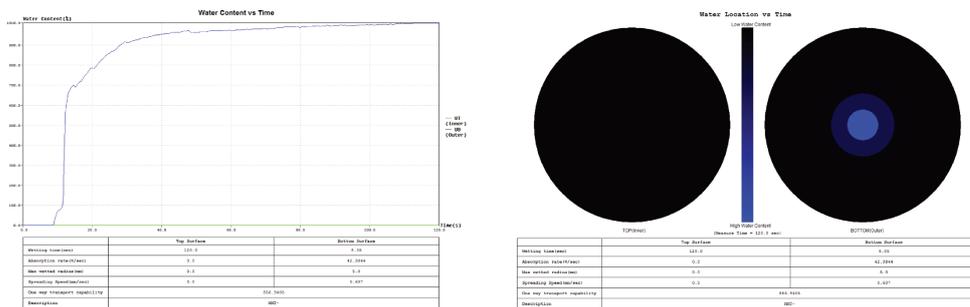


(b) Diffusion.



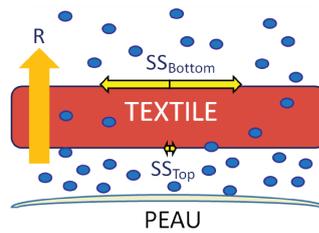
(c) Schéma explicatif.

FIGURE B.7 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J.



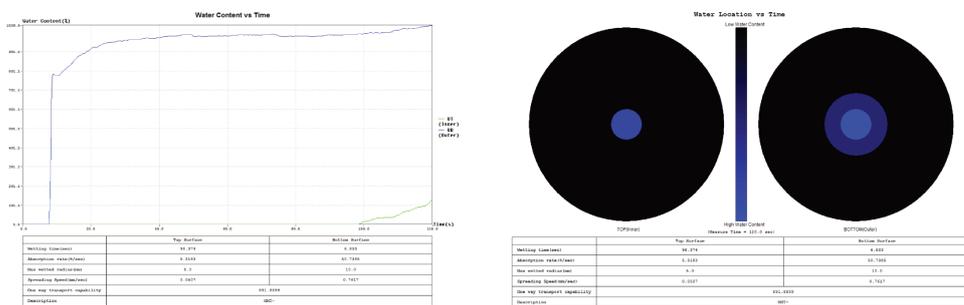
(a) Contenu en eau.

(b) Diffusion.



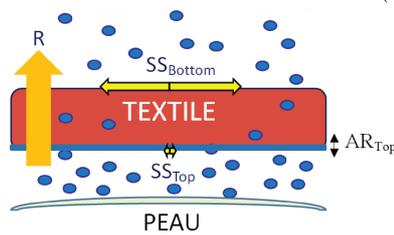
(c) Schéma explicatif.

FIGURE B.8 – MMT : gestion de l'eau liquide par PET_{66%}-VI_{28%}-EA_{6%}-J.



(a) Contenu en eau.

(b) Diffusion.



(c) Schéma explicatif.

FIGURE B.9 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{80%}-VI_{14%}-EA_{6%}-J.

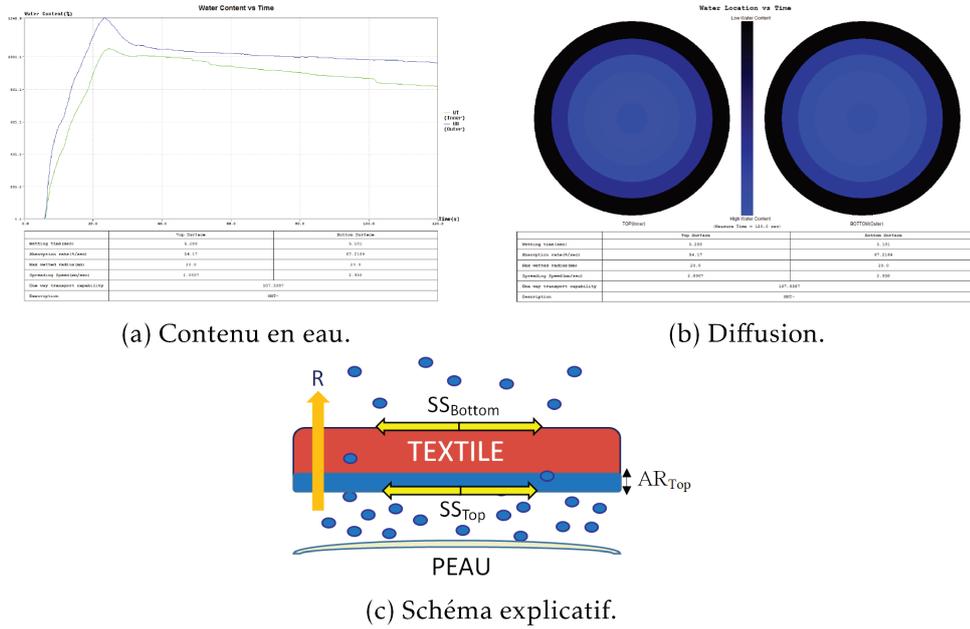


FIGURE B.10 – MMT : gestion de l'eau liquide par PAN_{50%}-PET_{50%}-I.

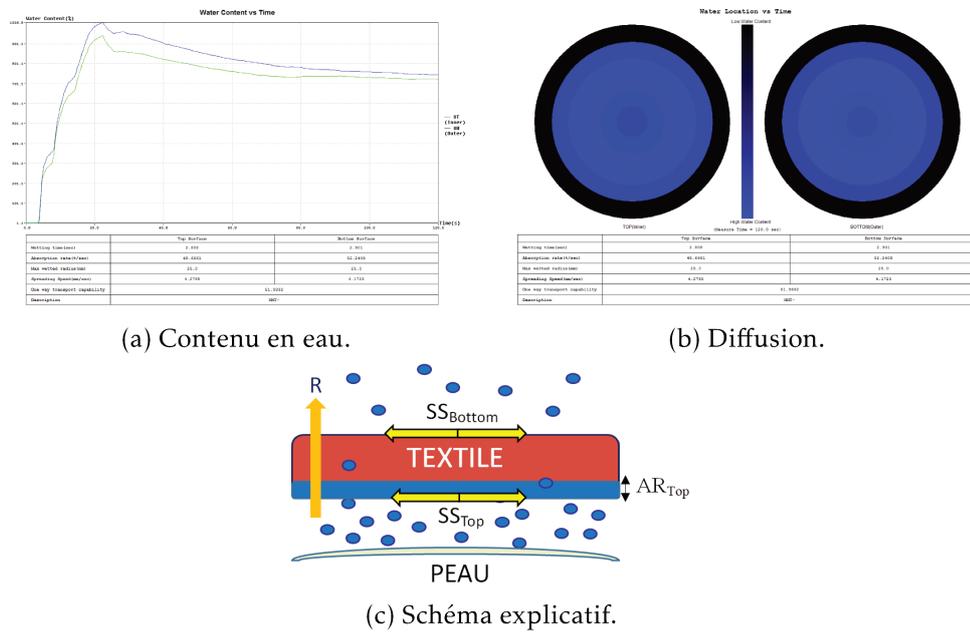


FIGURE B.11 – MMT : gestion de l'eau liquide par PET_{95%}-EA_{5%}-J.

Modélisation des essais DVS

C.1 Modèle de PEK	220
C.1.1 Contenu en eau	220
C.1.2 Temps	220
C.1.3 Module d'élasticité	220
C.1.4 Module de viscosité	220
C.1.5 Hystérésis	220
C.2 Modèle HH	220
C.2.1 Courbes du modèle HH avec PEK	220
C.2.2 Courbes de vérification des équations	220
C.3 Modèle de Young-Nelson	220

C.1 Modèle de PEK

C.1.1 Contenu en eau

C.1.2 Temps

C.1.3 Module d'élasticité

C.1.4 Module de viscosité

C.1.5 Hystérésis

C.2 Modèle HH

C.2.1 Courbes du modèle HH avec PEK

C.2.2 Courbes de vérification des équations

C.3 Modèle de Young-Nelson

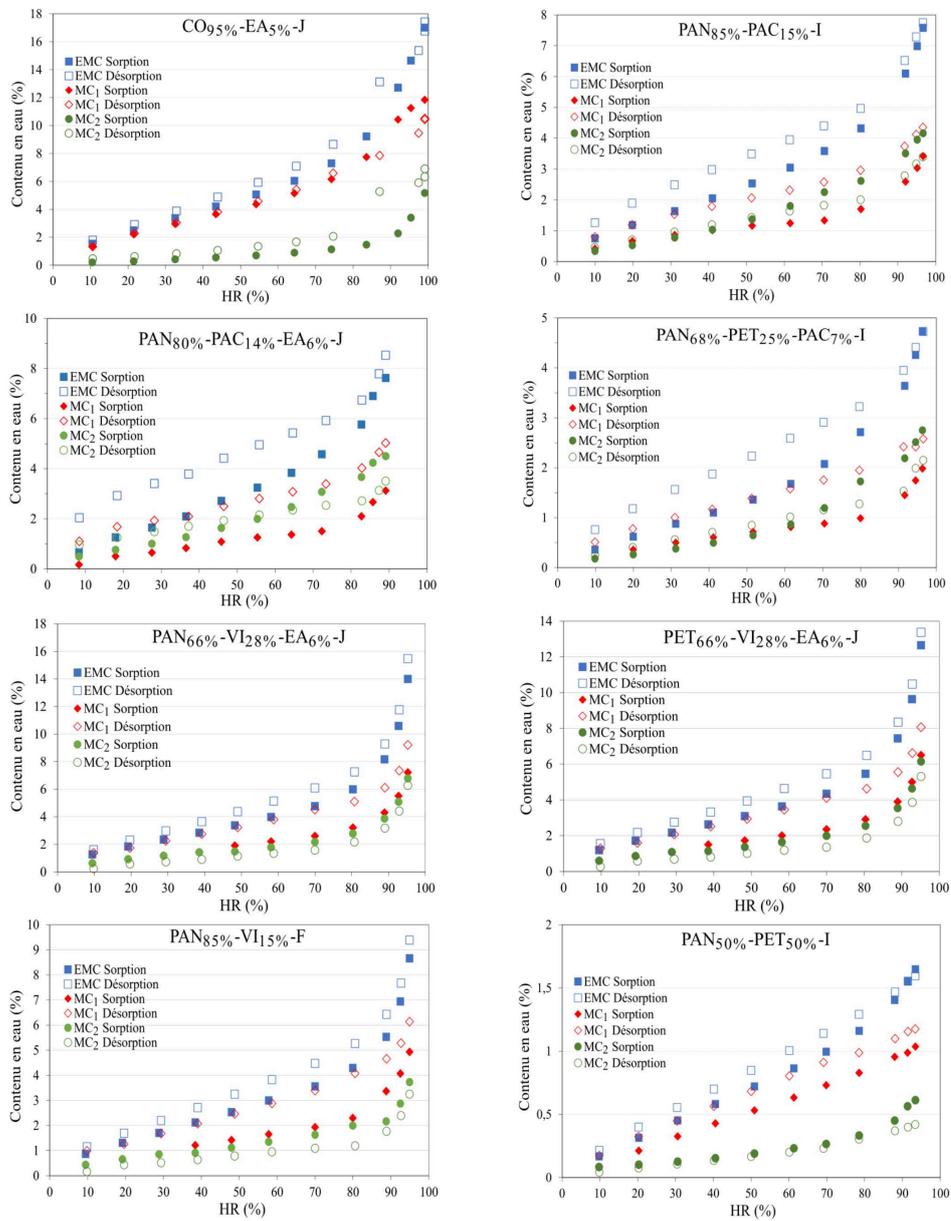


FIGURE C.1 – Modèle de PEK : contenu en eau des échantillons textiles.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption		Sorption/Désorption
	Mécanismes	Sites	Mécanismes	Sites	
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} > MC_{1,D}$ $MC_{2,S} < MC_{2,D}$
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-41 %HR : $MC_1 > MC_2$ 41-98 %HR : $MC_1 < MC_2$	Surface du textile et zones amorphes 41-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	$MC_1 < MC_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	10-61 %HR : $MC_1 > MC_2$ 61-98 %HR : $MC_1 < MC_2$	Surface du textile et zones amorphes 61-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR : $MC_1 = MC_2$ 40-98 %HR : $MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 40-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	10-30 %HR : $MC_1 = MC_2$ 30-98 %HR : $MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 30-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$MC_1 > MC_2$	Surface du textile et zones amorphes	$MC_1 > MC_2$		$MC_{1,S} < MC_{1,D}$ $MC_{2,S} > MC_{2,D}$

TABLEAU C.1 – Modèle de PEK : résumé de l'analyse du contenu en eau.

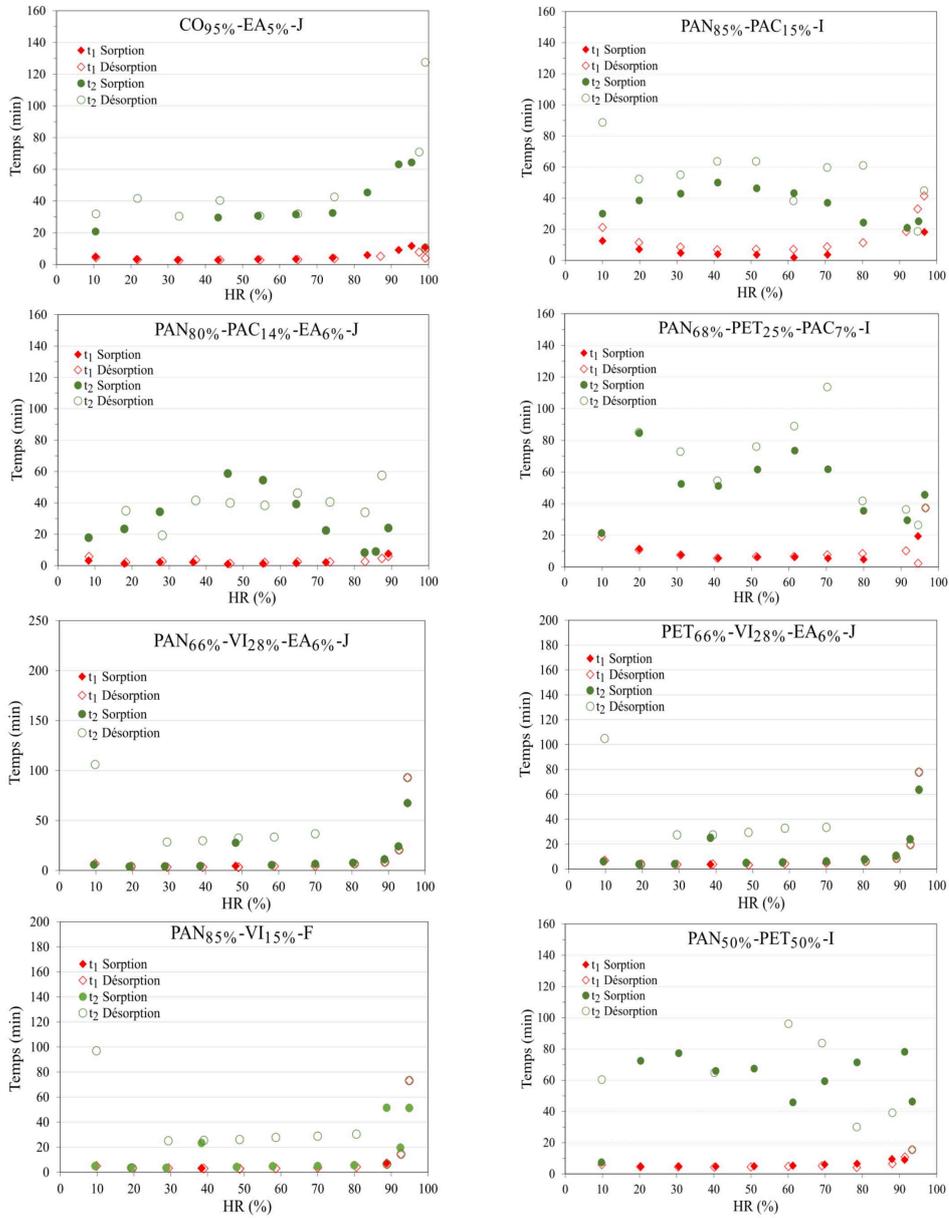


FIGURE C.2 – Modèle de PEK : temps des échantillons textiles.

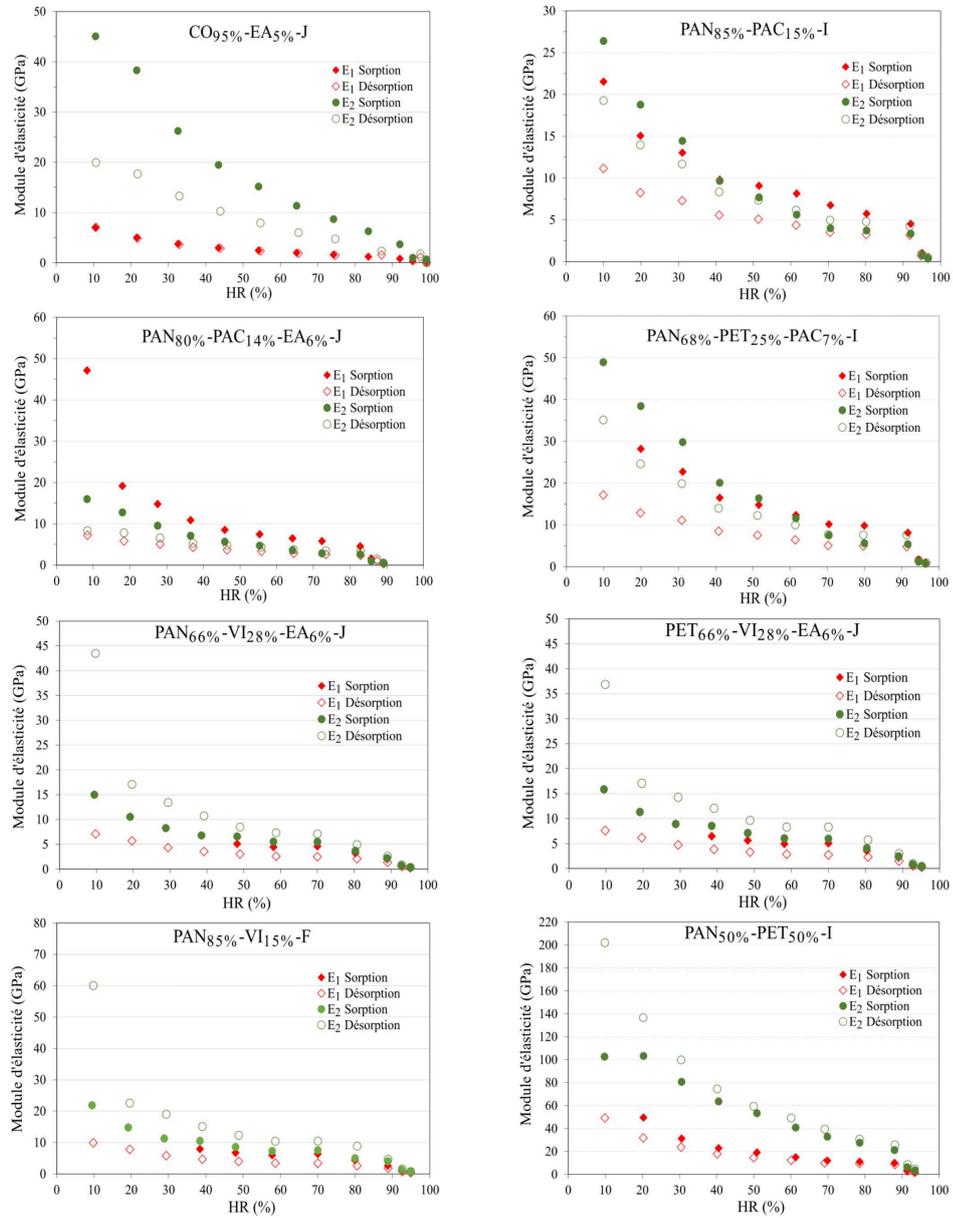


FIGURE C.3 – Modèle de PEK : module d'élasticité des échantillons textiles.

Échantillons textiles	Sorption		Désorption	
	Mécanismes	Sites difficiles d'accès	Mécanismes	Sites difficiles d'accès
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-41 %HR : $E_1 < E_2$ 41-98 %HR : $E_1 > E_2$	10-41 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 41-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	$E_1 > E_2$	Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	10-61 %HR : $E_1 < E_2$ 61-98 %HR : $E_1 > E_2$	10-61 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 61-98 %HR : Surface du textile et zones amorphes	$E_1 < E_2$	
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR : $E_1 = E_2$ 40-98 %HR : $E_1 < E_2$	10-40 %HR : Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 40-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	10-30 %HR : $E_1 = E_2$ 30-98 %HR : $E_1 < E_2$	10-30 %HR : Surface du textile et zones amorphes; Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines 30-98 %HR : Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$E_1 < E_2$	Surfaces interne (pores, cavités) et des zones cristallines	$E_1 < E_2$	

TABLEAU C.2 – Modèle de PEK : résumé de l'analyse du module d'élasticité.

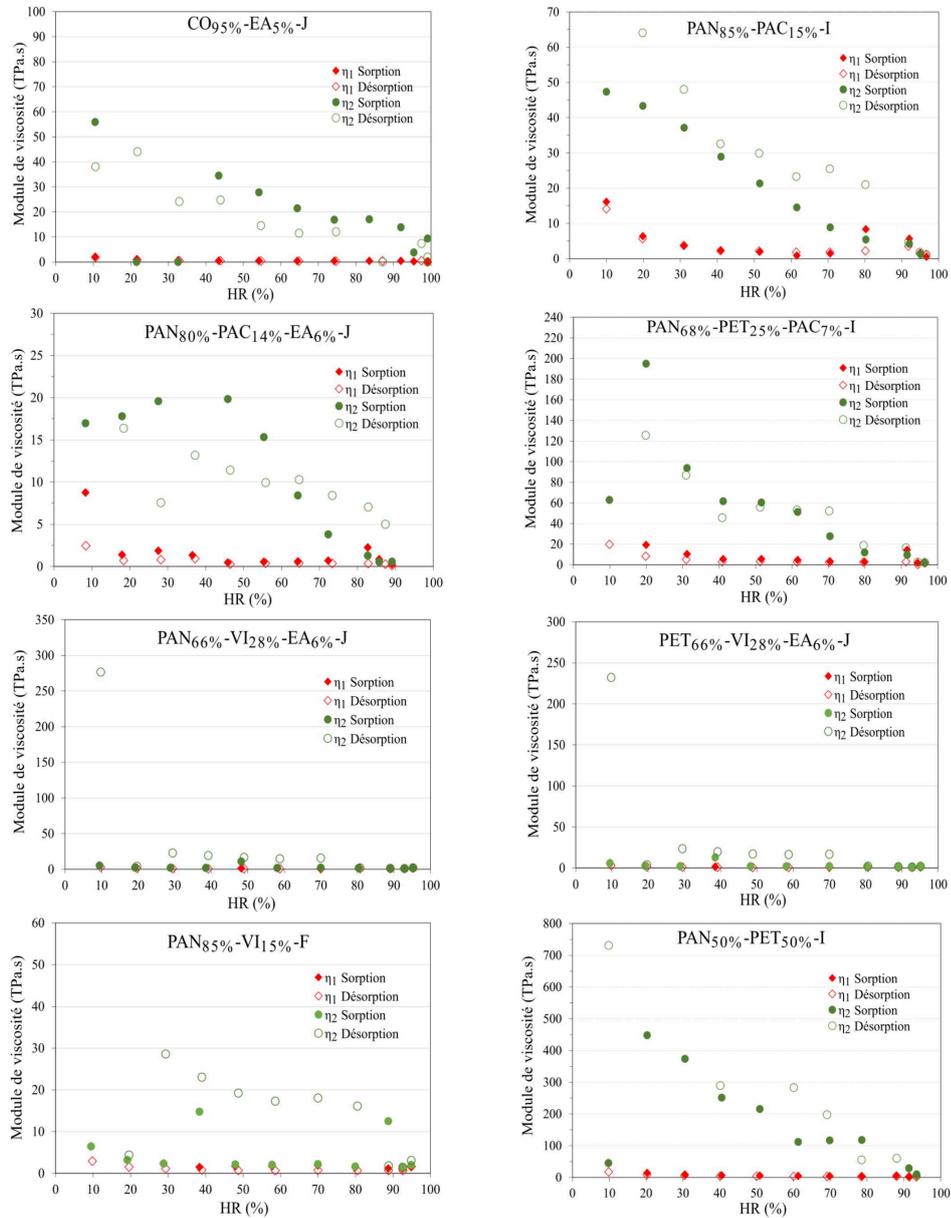


FIGURE C.4 – Modèle de PEK : module de viscosité des échantillons textiles.

Échantillons textiles	Sorption	Désorption
CO _{95%} -EA _{5%} -J	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	10-80 %HR : $\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	80-98 %HR : $\eta_1 > \eta_2$	
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	10-83 %HR : $\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	83-98 %HR : $\eta_1 > \eta_2$	
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	10-92 %HR : $\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	92-98 %HR : $\eta_1 > \eta_2$	
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10-40 %HR : $\eta_1 = \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	40-98 %HR : $\eta_1 < \eta_2$	
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J PAN _{85%} -VI _{15%} -F	10-30 %HR : $\eta_1 = \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$
	30-98 %HR : $\eta_1 < \eta_2$	
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	$\eta_1 < \eta_2$	$\eta_1 < \eta_2$

TABLEAU C.3 – Modèle de PEK : résumé de l'analyse du module de viscosité.

Échantillons textiles	A	B	C	K1	K2
CO _{95%} -EA _{5%} -J	4,28	0,26	0,002	8,26	0,82
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	9,39	0,57	0,005	8,16	0,85
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	9,43	0,37	0,004	5,68	0,84
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	20,50	0,78	0,008	5,63	0,83
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	3,70	0,42	0,004	14,11	0,87
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	3,78	0,47	0,004	15,46	0,87
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	6,89	0,48	0,004	9,61	0,80
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	48,15	1,17	0,011	4,45	0,70

TABLEAU C.4 – Modèle HH : coefficients calculés.

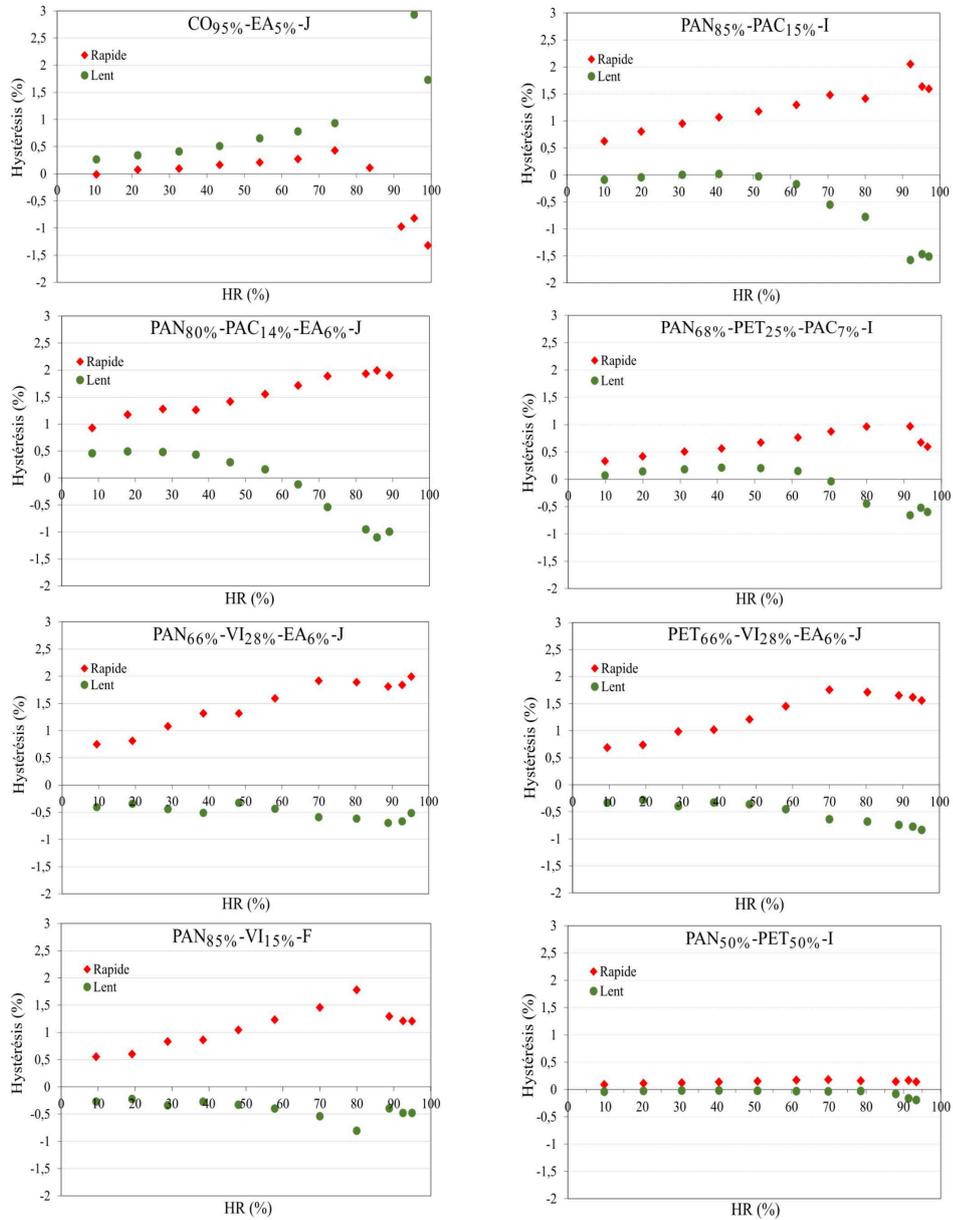


FIGURE C.5 – Modèle de PEK : hystérésis des procédés rapide et lent des échantillons textiles.

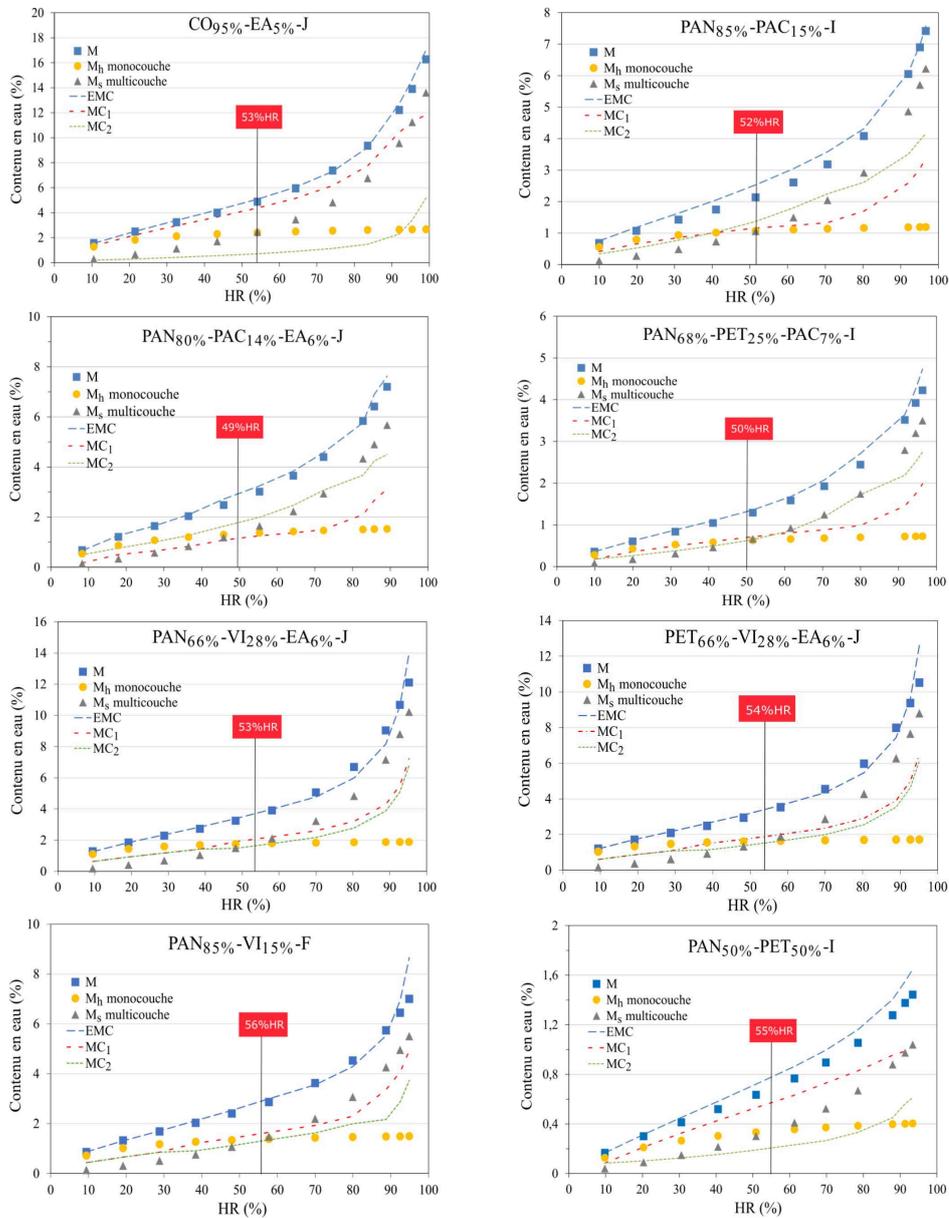


FIGURE C.6 – Modèle HH : courbes des paramètres M_h et M_s comparées aux paramètres MC_1 et MC_2 du modèle de PEK.

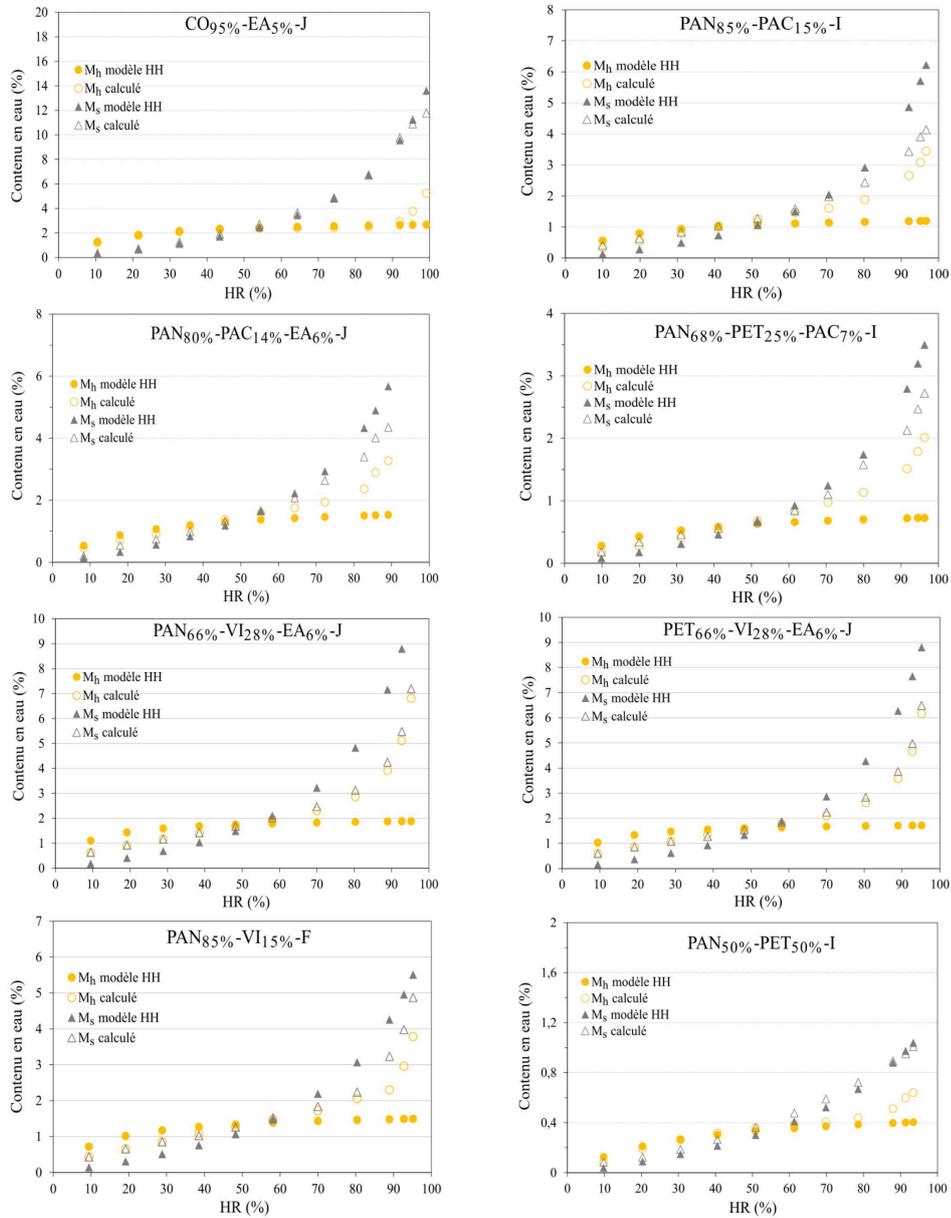


FIGURE C.7 – Modèle HH : comparaison entre les paramètres calculés directement à partir du modèle et des équations 3.34 et 3.35.

Échantillons textiles	Sorption			Désorption		
	A	B	E	A	B	E
CO _{95%} -EA _{5%} -J	3,71	4,56	0,347	1,71	0,60	0,883
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I	3,61	-1,59	0,437	3,23	-0,06	0,139
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J	6,53	-4,81	0,553	4,55	-0,23	0,094
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I	1,91	-0,35	0,443	1,43	0,18	0,268
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	10,18	-11,30	0,502	8,57	-0,52	0,005
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J	9,00	-9,90	0,490	7,67	-0,54	0,003
PAN _{85%} -VI _{15%} -F	5,38	-4,66	0,410	4,43	-0,27	0,109
PAN _{50%} -PET _{50%} -I	0,61	0,17	0,267	0,19	0,77	0,643

TABLEAU C.5 – Modèle Young-Nelson : coefficients calculés.

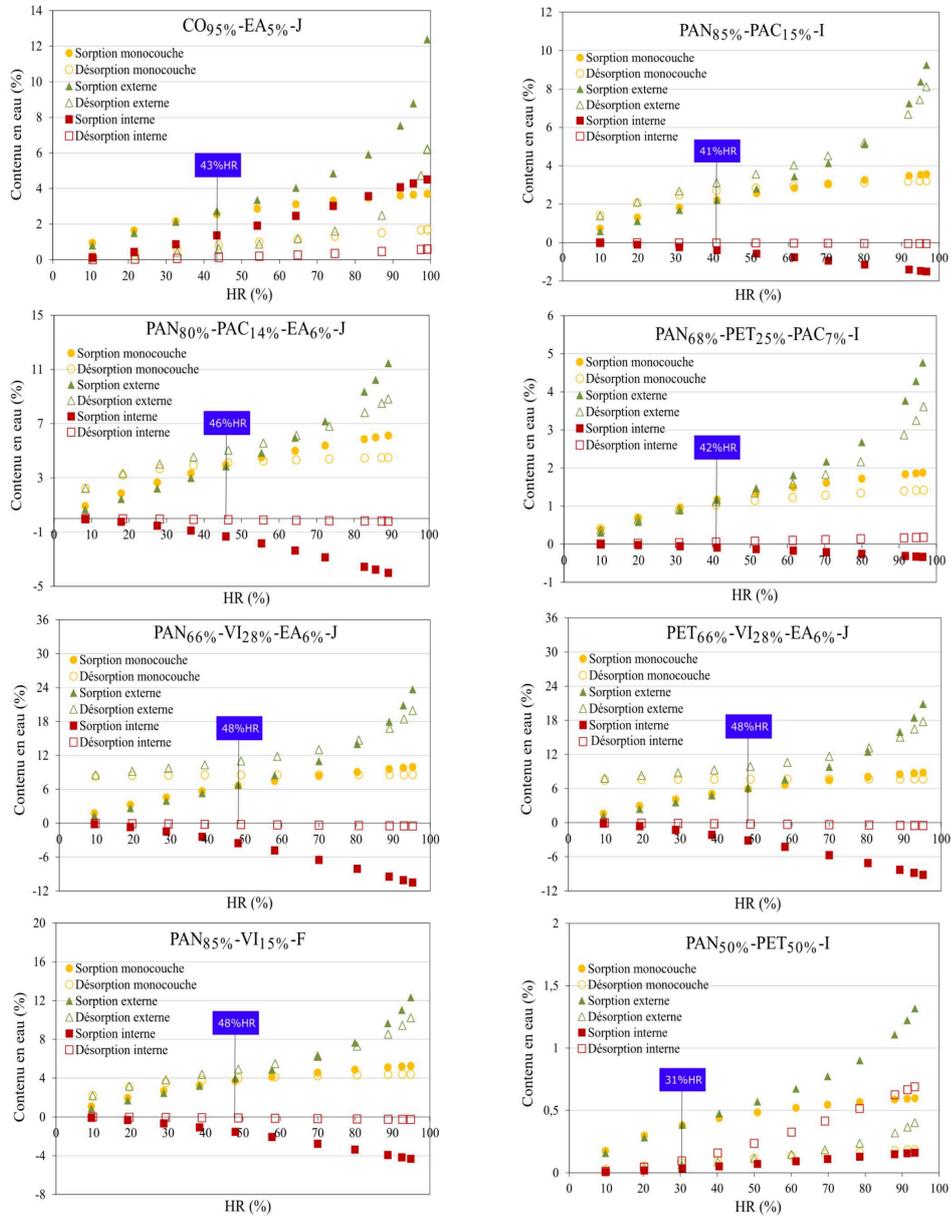
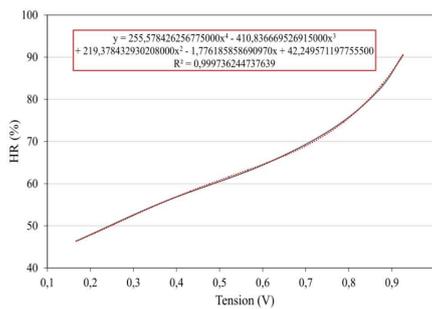


FIGURE C.8 – Modèle de Young-Nelson : courbes de la sorption monocouche, à l'extérieur et à l'intérieur des échantillons textiles.

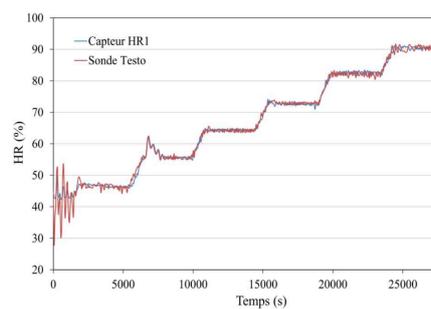
Banc de mesure (Cadre)

D.1 Équations de calibration des capteurs	233
D.2 Résultats protocole 1	235
D.3 Analyse statistique	235
D.3.1 Pentés	235
D.3.2 Temps T_1	235
D.4 Régression linéaire multiple	235
D.4.1 Modèle 1	235
D.4.2 Modèle 2	235

D.1 Équations de calibration des capteurs

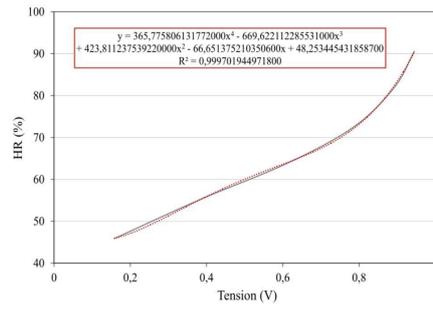


(a) Équation de calibration.

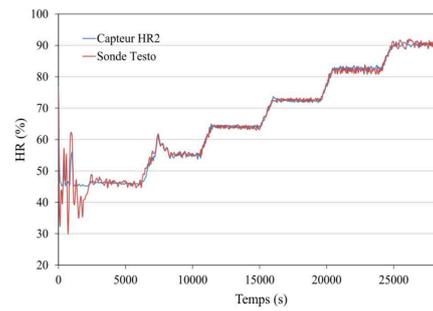


(b) Vérification de l'équation.

FIGURE D.1 – Équation de calibration du capteur HR1.

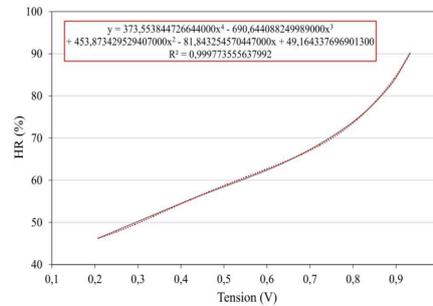


(a) Équation de calibration.

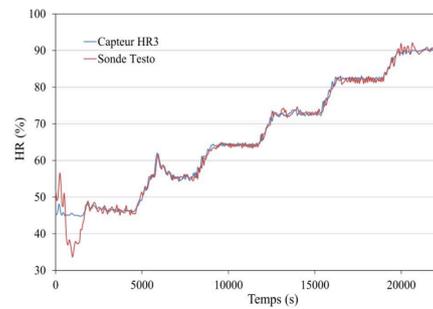


(b) Vérification de l'équation.

FIGURE D.2 – Équation de calibration du capteur HR2.

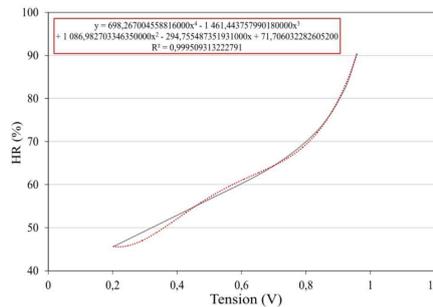


(a) Équation de calibration.

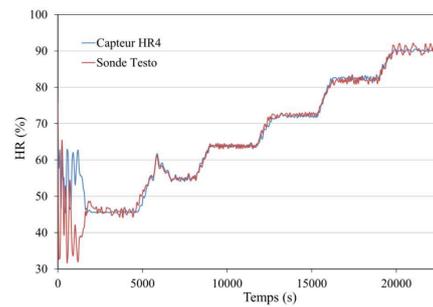


(b) Vérification de l'équation.

FIGURE D.3 – Équation de calibration du capteur HR3.



(a) Équation de calibration.



(b) Vérification de l'équation.

FIGURE D.4 – Équation de calibration du capteur HR4.

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne pente (%HR.min ⁻¹)
CO _{100%} -I CV%	7,9 ± 0,3 3,9	7,4 ± 0,3 4,6	8,6 ± 0,3 3,9	8,7 ± 0,3 4,0	8,0 ± 0,6 7,4
CO _{95%} -EA _{5%} -J CV%	7,9 ± 0,1 0,1	7,6 ± 0,1 0,1	8,8 ± 0,1 0,1	8,5 ± 0,3 0,3	8,1 ± 0,5 0,5
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I CV%	9,3 ± 0,5 5,1	9,1 ± 0,5 5,8	9,5 ± 0,4 4,8	9,7 ± 0,3 3,6	9,3 ± 0,4 4,8
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9,3 ± 0,1 1,4	9,0 ± 0,3 3,0	9,8 ± 0,1 1,6	9,6 ± 0,2 1,7	9,2 ± 0,3 3,5
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I CV%	10,0 ± 0,3 2,7	9,8 ± 0,3 3,1	10,1 ± 0,2 1,8	10,3 ± 0,2 2,2	10,2 ± 0,3 2,7
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J CV%	9,2 ± 0,1 1,6	9,3 ± 0,1 1,0	9,7 ± 0,2 2,0	9,8 ± 0,1 1,6	9,5 ± 0,3 3,2
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8,7 ± 0,1 1,7	8,4 ± 0,1 1,3	9,4 ± 0,2 1,9	9,3 ± 0,1 0,5	9,0 ± 0,4 4,9
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8,3 ± 0,2 2,1	8,2 ± 0,2 2,4	9,0 ± 0,2 2,2	8,9 ± 0,1 1,5	8,6 ± 0,4 4,5
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9,1 ± 0,4 3,1	8,2 ± 0,3 2,9	10,1 ± 0,3 3,4	9,2 ± 0,3 3,0	9,1 ± 0,7 8,3
PAN _{50%} -PET _{50%} -I CV%	10,3 ± 0,1 1,5	10,3 ± 0,1 1,5	10,3 ± 0,2 1,6	10,7 ± 0,2 1,9	10,4 ± 0,2 2,1
PET _{95%} -EA _{5%} -J CV%	10,3 ± 0,1 0,4	10,5 ± 0,1 0,4	10,4 ± 0,1 0,4	10,7 ± 0,1 0,6	10,5 ± 0,1 1,4

TABLEAU D.1 – Résultats des pentes mesurées avec le cadre.

D.2 Résultats protocole 1

D.3 Analyse statistique

D.3.1 Pentes

D.3.2 Temps T₁

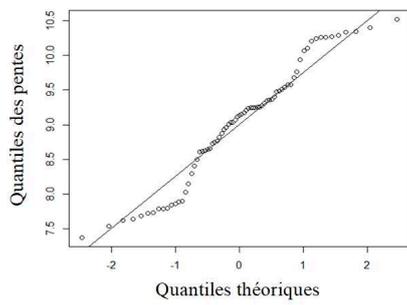
D.4 Régression linéaire multiple

D.4.1 Modèle 1

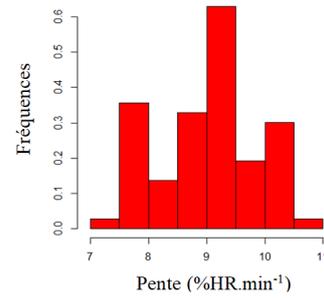
D.4.2 Modèle 2

Nom de l'échantillon	HR1	HR2	HR3	HR4	Moyenne T ₁ (s)
CO _{100%} -I CV%	9038 ± 47 0,5	9040 ± 45 0,5	9044 ± 43 0,5	9033 ± 45 0,5	9039 ± 44 0,5
CO _{95%} -EA _{5%} -J CV%	9037 ± 29 0,3	9033 ± 29 0,3	9045 ± 29 0,3	9040 ± 27 0,3	9039 ± 27 0,3
PAN _{85%} -PAC _{15%} -I CV%	9041 ± 38 0,4	9041 ± 39 0,4	9050 ± 38 0,4	9041 ± 39 0,4	9043 ± 38 0,4
PAN _{80%} -PAC _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9027 ± 44 0,5	9026 ± 44 0,5	9034 ± 44 0,5	9015 ± 57 0,6	9026 ± 47 0,5
PAN _{68%} -PET _{25%} -PAC _{7%} -I CV%	9045 ± 51 0,6	9046 ± 51 0,6	9053 ± 52 0,6	9044 ± 52 0,6	9047 ± 50 0,5
PAN _{87%} -PAC _{7%} -EA _{6%} -J CV%	9016 ± 63 0,7	9017 ± 64 0,7	9023 ± 65 0,7	9015 ± 68 0,8	9018 ± 56 0,6
PAN _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	8997 ± 58 0,6	8996 ± 59 0,6	9006 ± 59 0,7	8997 ± 63 0,7	8999 ± 51 0,6
PET _{66%} -VI _{28%} -EA _{6%} -J CV%	9007 ± 61 0,7	9009 ± 65 0,7	9014 ± 61 0,7	9004 ± 64 0,7	9009 ± 54 0,6
PAN _{80%} -VI _{14%} -EA _{6%} -J CV%	9045 ± 62 0,7	9034 ± 61 0,7	9039 ± 62 0,7	9032 ± 61 0,7	9038 ± 57 0,6
PAN _{50%} -PET _{50%} -I CV%	9067 ± 13 0,1	9068 ± 14 0,1	9074 ± 13 0,1	9065 ± 13 0,1	9068 ± 12 0,1
PET _{95%} -EA _{5%} -J CV%	9090 ± 25 0,3	9091 ± 25 0,3	9095 ± 25 0,3	9089 ± 24 0,3	9091 ± 22 0,2

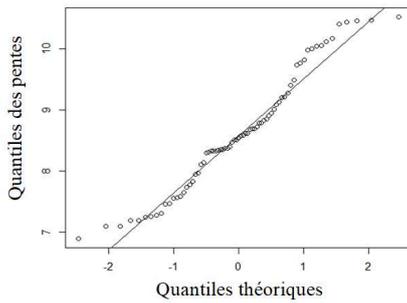
TABLEAU D.2 – Résultats des temps T₁ mesurés avec le cadre.



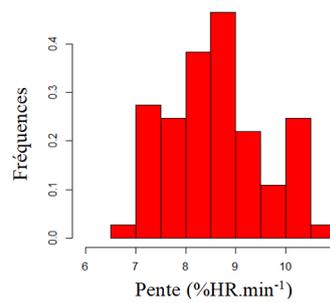
(a) Droite de Henry HR1.



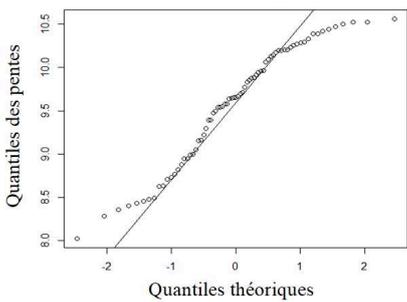
(b) Histogramme HR1.



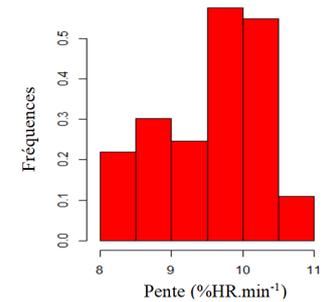
(c) Droite de Henry HR2.



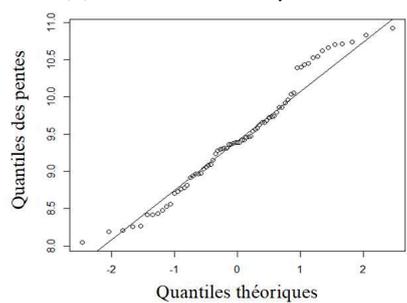
(d) Histogramme HR2.



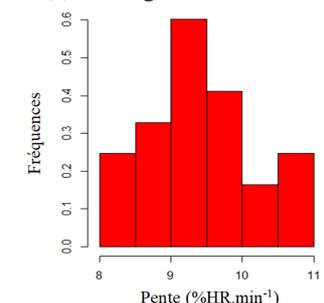
(e) Droite de Henry HR3.



(f) Histogramme HR3.



(g) Droite de Henry HR4.



(h) Histogramme HR4.

FIGURE D.5 – Pentés : droites de Henry et histogrammes des capteurs HR1, HR2, HR3, HR4.

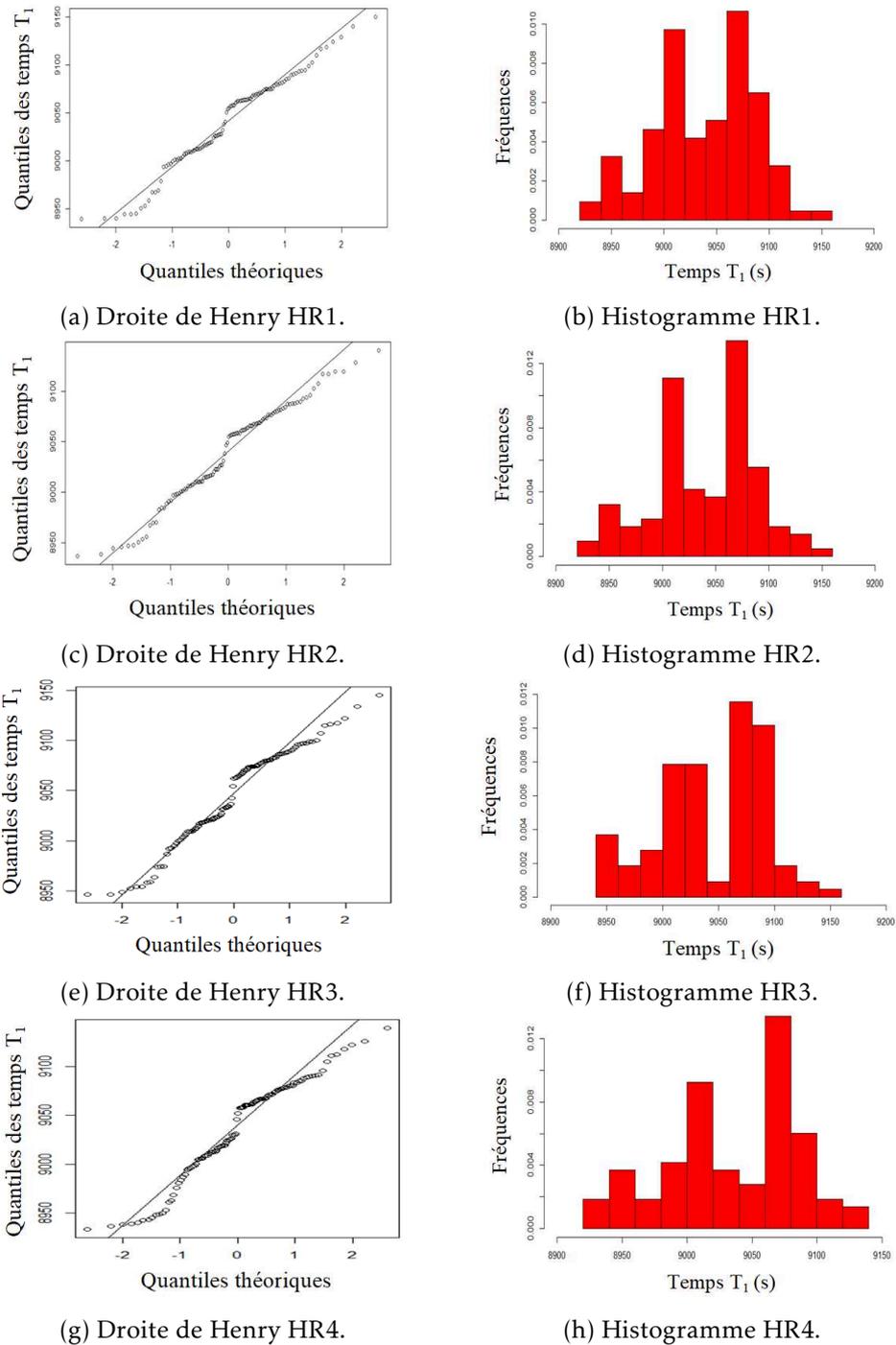
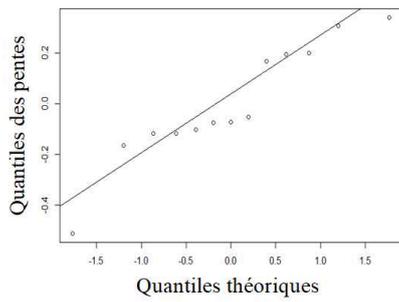
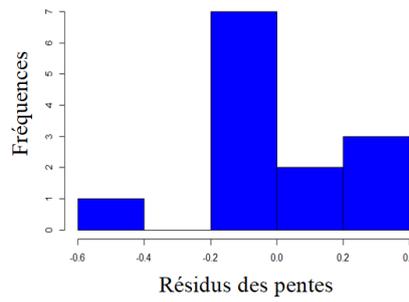


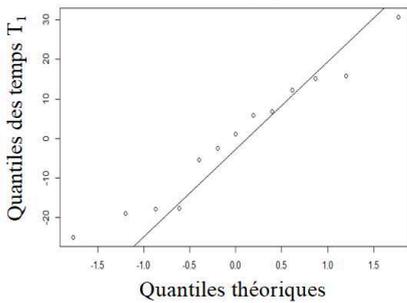
FIGURE D.6 – Temps T_1 : droites de Henry et histogrammes des capteurs HR1, HR2, HR3, HR4.



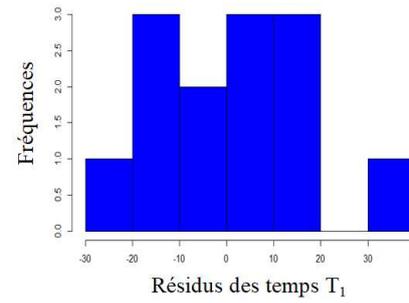
(a) Droite Henry pente.



(b) Histogramme pente.

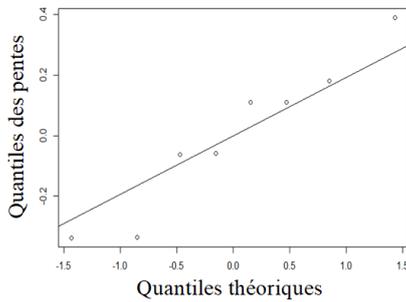


(c) Droite Henry temps T_1 .

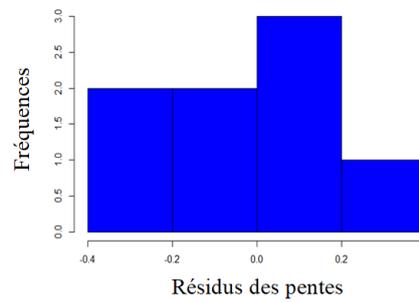


(d) Histogramme temps T_1 .

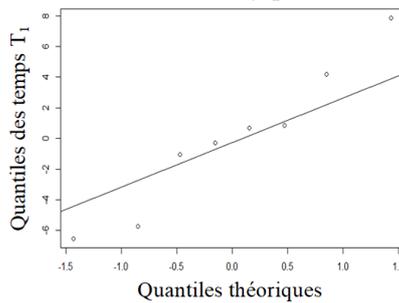
FIGURE D.7 – Droites de Henry et histogrammes des modèles 1.



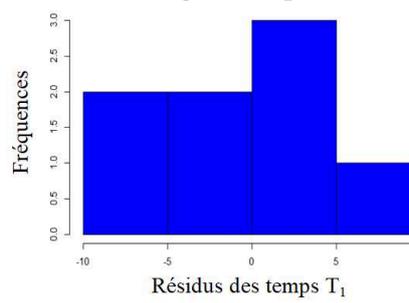
(a) Droite Henry pente.



(b) Histogramme pente.



(c) Droite Henry temps T_1 .



(d) Histogramme temps T_1 .

FIGURE D.8 – Droites de Henry et histogrammes des modèles 2.

Étude des mécanismes d'interaction sous-vêtement/peau pour concevoir des textiles innovants en optimisant le confort au porté

Résumé

L'objectif de cette étude est de comprendre, analyser et documenter les mécanismes hydriques d'interaction sous-vêtement/ peau en régime transitoire. Aucun appareil ne permet d'étudier les transferts hydriques en dynamique à travers les textiles en prenant en compte l'effet du microclimat; lame d'air présente entre la peau et le textile. Un banc de mesure est réalisé afin de répondre à ce problème. Ce dispositif permet de discriminer les échantillons textiles en fonction de la nature chimique des fibres. La vitesse de transfert des molécules de vapeur d'eau lors de la désorption et le temps précis où débute ce phénomène apportent des informations sur la gestion hydrique des textiles. En parallèle, une étude à l'échelle de la fibre, par l'utilisation du DVS (Dynamic Vapor Sorption), mesure la quantité d'eau emmagasinée et relarguée par les textiles. Les résultats modélisés permettent de connaître, à un taux d'humidité donné, les mécanismes d'interaction eau-fibres mis en jeu. L'ensemble des méthodes développées dans cette étude apporte des éléments pour comprendre les résultats obtenus lors des tests au porté; et plus précisément sur la capacité des étoffes à assécher ou à maintenir une certaine humidité à la surface cutanée.

Mots clés : confort thermique, interaction textile/ peau, gestion hydrique, hydratation cutanée, modélisation des mécanismes, fibres.

Abstract

The objective of this study is to understand, analyze and document the hydric mechanisms of undergarment/skin interaction in a transient regime. No apparatus makes it possible to study dynamic water transfers through textiles taking into account the effect of the microclimate; the air gap between the skin and the textile. A measuring bench is being built to solve this problem. Thanks to this device, it is possible to discriminate textile samples according to the chemical nature of the fibres. The transfer rate of water vapour molecules during desorption and the precise time at which this phenomenon begins provide information on the water management of textiles. In parallel, a fibre-scale study, using DVS (Dynamic Vapor Sorption) test, measures the amount of water stored and released by textiles. The modelled results allow us to know, at a given humidity level, the water-fibre interaction mechanisms involved. All the methods developed in this study provide elements to understand the results obtained during wear tests; and more precisely on the ability of fabrics to dry out or maintain a certain humidity on the skin surface.

Keywords : thermal comfort, textile/skin interaction, moisture management, skin hydration, mechanism modelling, fibers.