

Transferts par sorption dans les tissus vestimentaires

Sorptive transfers through textile fabrics during wear

Abdellah Ghenaim^{a,*}, Sami Ben Amar^b, Xavier Berger^c

^a IMFS-ENSAIS, 24 Boulevard de la Victoire 67084 Strasbourg, France

^b ENIM, rue Ibn El Jazjar, Monastir 5019, Tunisie

^c CNRS, Groupe Ecothermique, Bât. 1, rue Albert Einstein 06560 Sophia Antipolis, France

Reçu le 12 mai 1999; accepté le 30 mars 2001

Résumé

Partant des travaux de Le et Ly, de Nordon et d'autres auteurs, un modèle de transferts par sorption entre l'air de part et d'autre d'un tissu vestimentaire mince a été construit et programmé. Il différencie le gaz inter-fibres de la matière fibreuse, au contraire de celui de Gibson auquel il a été comparé. La propagation de l'eau dans le tissu (capillarité) n'est pas considérée. Une théorie rendant compte du rôle de la sorption dans le cas de renouvellements fréquents de l'air confiné d'un côté du tissu a été élaborée. Elle montre l'existence de transferts supplémentaires à ceux diffusifs, ce qui permet de discuter les travaux de Barnes et Holcombe. © 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Abstract

Using the results established by Le and Ly, Nordon and other authors, a model describing the sorptive transfers through garments was built and computed. It differentiates the inter-fibrous gas from the fibrous material, conversely to Gibson's model used for a comparison. The fabric capillary is not considered. A theory concerning the sorptive function in case of frequent renewals of the confined air in one side of the fabric was established. It shows the reality of small transfers, supplementary to the diffusive ones, which leads to a discussion about Barnes and Holcombe's works. © 2002 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Tissu ; Transfert de masse ; Chaleur ; Vapeur d'eau ; Sorption ; Effet de pompage

Keywords: Clothing; Mass transfer; Heat; Water vapor; Sorption; Pumping effect

1. Introduction

Les phénomènes de sorption dans les milieux poreux sont connus de longue date. Ils concernent aussi bien l'industrie, le bâtiment [1–3] que les matériaux textiles [4–8]. Le cas d'un tissu vestimentaire se différencie du cas d'un volume (balle) de matière textile par l'épaisseur fine qui peut conduire à une fonction « interface active » assurant des transferts entre l'air confiné près de la peau, et l'environnement. Dans les situations thermo-hydriques établies pendant des durées longues (demi heure ou plus), le tissu se positionne dans un état permanent pour lequel toute

action « active » due à la sorption disparaît. Les transitions d'une situation à l'autre occasionnent des échauffements et des refroidissements par charge et décharge de vapeur d'eau, et qui peuvent durer des minutes, voire une heure ou plus. De tels transferts ont été modélisés récemment par Lotens [9], Gibson [10] et Ben Amar [11].

Cependant, le vêtement n'a pas qu'un rôle passif, résistif. Il confine un air renouvelé fréquemment par les mouvements d'une part, la ventilation associée à la porosité et aux ouvertures d'autre part. Barnes et al. [12] se sont intéressés aux effets de sorption dus à ces renouvellements. Mais les considérations théoriques, qui les « cachent » sous des variations des résistances de part et d'autre du tissu, aussi bien que les expérimentations proposées, dans lesquelles l'effet de pompage par porosité ne peut être négligeable, sont restées des approches contestées [13].

* Correspondance et tirés à part.

Adresses e-mail : abdellahg@aol.com (A. Ghenaim),
xavier.berger@cra.cnrs.fr (X. Berger).

Nomenclature

a_s	surface volumique du tissu	m^{-1}
b, c, d	coefficients numériques	
C_p	capacité thermique massique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
d_i	diamètre de la fibre (f), ou épaisseur de la couche limite à la surface intérieure du tissu (int)	m
D	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau	$m^2 \cdot s^{-1}$
e	épaisseur du tissu	m
H	humidité relative	
h	coefficient de transfert de chaleur .	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
h_m	coefficient de transfert de masse par unité de masse volumique	$m \cdot s^{-1}$
Le	nombre de Lewis	
M	teneur en eau	$kg_{eau} \cdot kg_{fibre}^{-1}$
n	coefficient numérique	
p	pression ou coefficient numérique	Pa
t	temps	s
T	température	K
V	volume élémentaire du tissu	m^3
x, y, u, v	coefficients numériques	

Symboles grecs

α	coefficient numérique	
Δh	chaleur massique.....	J.kg ⁻¹
ε	fraction volumique d'une phase	
ρ	masse volumique.....	kg.m ⁻³

ϕ	débit massique par unité de volume	$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
τ	paramètre lié à la nature de la fibre	$kg \cdot m^{-3}$

Indices

1,2	première ou seconde alternance
a	totale d'absorption
c	convection ou chaleur
crt	critique
d	différentielle d'absorption
e	eau de la fibre pour un'équilibre thermique avec une ambiance d'humidité H_{gaz}
ev	évaporation
ext	extérieur
f	fibre en situation instantanée
gaz	air inter-fibres
i, j	phase solide, liquide ou vapeur
int	intérieur
liq	phase liquide
m	moyenne d'absorption ou masse
v	vapeur ou latente de condensation ou d'évaporation
sat	saturation
sec	fibre sèche
sol	solide
tot	total
o	instant initial

Ce travail part d'une théorie rigoureuse dont l'originalité est la considération d'un milieu gazeux inter-fibres, différent des pores, en plus des milieux solide et liquide. Cette considération est de grande importance car elle permet de montrer que l'hygrométrie du gaz peut varier notablement et rapidement au contraire de celle du milieu fibreux. On démontre alors, en conséquence, l'existence de transferts à court terme entre les airs de part et d'autre du tissu lorsque l'un d'entre eux est renouvelé fréquemment.

Dans cette étude, les transferts liquides au sein du tissu (capillarité) sont ignorés.

2. Considérations géométriques

On ne considère ici que deux types de textiles : les tissus qui sont constitués de fils croisés (fils de chaîne et fils de trame) laissant apparaître des espaces vides ou pores et les non tissés. Les pores sont considérés comme un espace frontière entre les airs de part et d'autre. Ils possèdent une surface par unité de surface de tissu, liée à la porosité de celui-ci. Les fils, ou le volume non tissé, sont subdivisés en trois volumes, qui sont rapportés en fractions volumiques ε par considération des rapports des volumes de chaque partie,

et du volume total (épaisseur du textile multipliée par $1 m^2$ de surface) :

- la fibre sèche et l'humidité absorbée par la fibre sont considérées comme une matière solide homogène,
- l'eau condensée à la surface de la fibre constitue le second volume,
- l'air qui complète les deux volumes précédents constitue le troisième volume. On l'appellera gaz pour le différencier des airs de part et d'autre du textile.

On a ainsi :

$$\varepsilon_{liq} = \frac{V_{liq}}{V_{tot}}, \quad \varepsilon_{sol} = \frac{V_{sol}}{V_{tot}}, \quad \varepsilon_{gaz} = \frac{V_{gaz}}{V_{tot}} \quad (1)$$

La surface volumique (par unité de volume de tissu) du milieu fibreux est :

$$a_s = \text{longueur de fil} \times \text{périmètre d'un fil} / \text{volume total}$$

$$a_s = \text{volume du solide} \times \text{périmètre d'un fil} \times (\text{section d'un fil} \times \text{volume total})^{-1}$$

$$a_s = 4 \frac{\varepsilon_{sol}}{d_{if}} \quad (2)$$

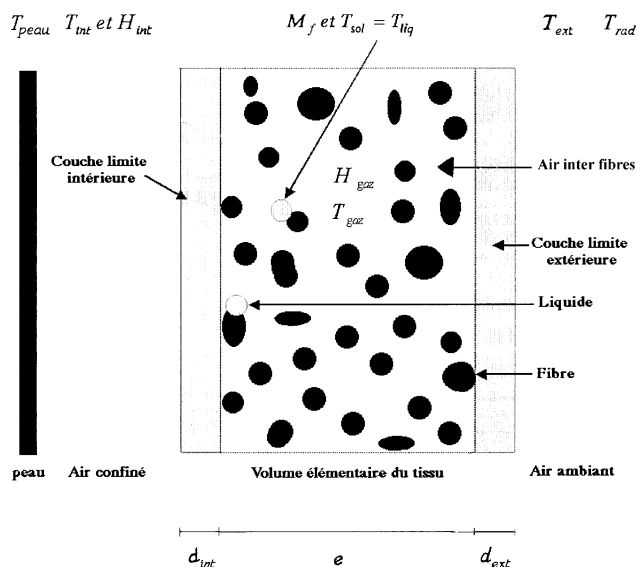


Fig. 1. Schéma de la configuration physique étudiée.

Fig. 1. Diagram of the physical studied outline.

La Fig. 1 est un schéma de la situation physique considérée. La considération de volumes spécifiques (relatifs au volume total d'une unité surfacique de tissu), pour suivre la manière de faire de Le, Ly et Gibson, conduit à des unités qui peuvent au premier abord étonner.

3. Le phénomène de sorption et les équations de Le et Ly

La variation de la teneur en eau M_f d'une fibre (eau absorbée par la fibre), introduite dans une atmosphère à taux d'humidité H_{gaz} plus élevé que la fibre, s'accompagne d'un dégagement de chaleur Δh_a . Cette chaleur est la somme de la chaleur de sorption Δh_d (due aux liaisons chimiques entre les molécules d'eau liquide et les molécules de la fibre) et de la chaleur latente de condensation Δh_v de la vapeur d'eau (sur les sites et le système capillaire du polymère pendant la variation de la teneur en eau de la fibre). Selon Le [6], cette condensation préalable à la sorption est indispensable, et ralentit le processus par le temps nécessaire à la dissipation de la chaleur dégagée. Δh_v ne dépend que de la température de la fibre. Δh_d dépend de M_f :

$$\Delta h_a = \int (\Delta h_d(M_f) + \Delta h_v(T_f)) dM_f \quad (3)$$

Δh_d est donnée par l'équation empirique suivante [14] :

$$\Delta h_d(M_f) = \frac{B_1}{\exp(B_2 M_f)} + B_3 \quad (4)$$

Les paramètres B_1 , B_2 et B_3 sont relatifs au type de fibre (Tableau 1).

L'élévation de la température T_f entraîne une augmentation de la pression de vapeur d'eau $p_{v,f}$ jusqu'à ce qu'elle devienne égale à celle du gaz ambiant $p_{v,\text{gaz}}$. L'absorption se

Tableau 1

Valeurs de B_1 , B_2 , B_3 suivant le type de fibres (équation (4)) [14]

Table 1

Values of B_1 , B_2 , B_3 according to fibres kind (Eq. (4)) [14]

	Laine	Coton	Nylon
B_1 (J·kg ⁻¹)	$1,256 \times 10^7$	$1,105 \times 10^7$	$9,756 \times 10^6$
B_2 (nd)	12	51	31
B_3 (J·kg ⁻¹)	$8,374 \times 10^3$	$2,198 \times 10^5$	$5,862 \times 10^4$

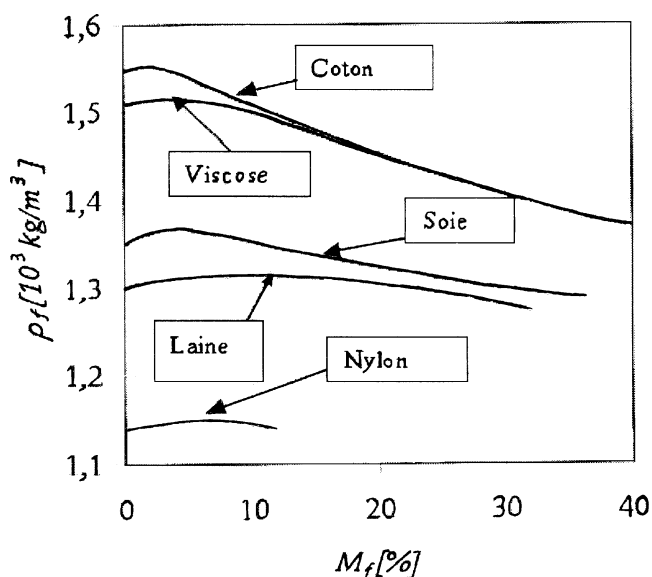


Fig. 2. Teneur en eau d'une fibre en fonction de l'humidité de l'air [19].

Fig. 2. Water content of a fiber according to the relative humidity of the air [19].

ralentit, le temps que la chaleur s'élimine dans l'ambiance. Finalement, on obtient à l'équilibre :

$$M_f = M_e, \quad T_f = T_{\text{gaz}}, \quad p_{v,f} = p_{v,\text{gaz}}$$

La sorption de l'eau engendre le gonflement des fibres, et donc une variation de la densité des fibres ρ_f . Des expressions ont été établies, par exemple celle de Nordon [5] pour la laine :

$$\rho_f = 1304 + 2611M_f - 1621M_f^2 + 1495M_f^3 \quad (5)$$

dans laquelle ρ_f est en kg·m⁻³ et M_f est en kg_{eau}·kg_{fibre}⁻¹.

La Fig. 2 montre les variations de ρ_f pour quelques types de fibres.

La teneur en eau M_e d'une fibre en fonction de l'humidité H_{gaz} à température et pression données, suit une courbe sigmoïdale (Fig. 3).

Le et Ly [14] ont établi une relation, valable à 20 °C, et dans laquelle les paramètres M_m , n , p , c et α sont fixés expérimentalement :

$$M_e = M_m \frac{c H_{\text{gaz}}}{1 + c H_{\text{gaz}}} \left[\frac{1 - \alpha H_{\text{gaz}}^n - (1 - \alpha) H_{\text{gaz}}^p}{1 - H_{\text{gaz}}} \right] \quad (6)$$

Le Tableau 2 donne les valeurs des paramètres pour 3 types de fibres :

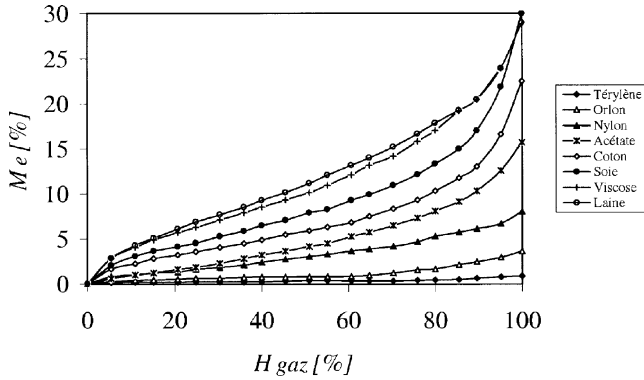


Fig. 3. Masse volumique d'une fibre en fonction de la teneur en eau [14].

Fig. 3. Volumic mass of a fiber according to its water content [14].

Tableau 2

Valeurs des paramètres pour 3 types de fibres (équation (6)) [14]

Table 2

Values of the parameters for 3 kinds of fibres (Eq. (6)) [14]

	Laine	Coton	Polyester
α	0,88	0,82	0,93
c	8,5	8,5	4,3
n	3	3	3
p	18	19	35
M_m	0,0831	0,0452	0,0270

Une équation plus complète a été établie pour le cas d'une température quelconque.

4. Les transferts de masse

4.1. Transfert liquide–solide

Le débit massique $\phi_{liq,sol}$ à l'interface solide–liquide, et rapporté à l'unité de volume, est proportionnel à la fraction volumique du liquide, à la surface de la matière fibreuse, mais inversement proportionnel à la teneur instantanée en eau de la fibre M_f [15].

$$\phi_{liq,sol} = h_m a_s \tau_{liq,sol} \frac{\varepsilon_{liq}}{\varepsilon_{liq,crt} M_f} (M_{sat} - M_f) \quad (7)$$

$\tau_{liq,sol}$ est un paramètre proportionnel à la vitesse de sorption de l'eau par la fibre. Il a les dimensions d'une densité, ce qui fait de $\phi_{liq,sol}$ un débit massique par unité de volume. Il a été déterminé expérimentalement (0,15 pour la laine et le coton et 0,0005 pour le nylon et jamais mesuré pour le polyester) [6]. $\varepsilon_{liq,crt}$ est la fraction volumique critique du liquide au delà de laquelle la phase liquide rentre en mouvement [16]. On a :

$$\varepsilon_{liq,crt} = 0,1 \varepsilon_{gaz} \quad (8)$$

Sözen et al. [16] ont adopté cette précédente relation faute de mesures suffisantes. Ils l'ont déduite à partir de résultats expérimentaux de Kaviany et Mittal.

h_m est le coefficient de transfert de masse par unité de masse volumique, déterminé par analogie entre le transfert de chaleur et le transfert de masse [6] :

$$h_m = \frac{h}{\rho_{gaz} C_p \text{Le}^{2/3}} \quad (9)$$

où Le est le nombre de Lewis.

4.2. Transfert gaz–solide

Le débit massique $\phi_{gaz,sol}$ à l'interface solide–gaz, et rapporté à l'unité de volume, est proportionnel au coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de la fibre $D_{v,f}$, à la surface volumique a_s et à la masse volumique de la fibre sèche, mais inversement proportionnel à la fraction volumique de solide et au rayon moyen des fibres $d_f/2$ [17], ce qui donne :

$$\phi_{gaz,sol} = \frac{8 D_{v,f} \rho_{f,sec}}{d_f^2} (M_e - M_f) \quad (10)$$

$D_{v,f}$ est proportionnel à la concentration en eau dans les polymères polaires comme le coton ou la laine. Il est inversement proportionnel à la concentration dans le cas des polymères moins hydrophiles comme l'éthyl-cellulose ou le caoutchouc. Il est constant dans le cas des fibres hydrophobes comme le polyéthylène ou le polyester. La cinétique de la sorption de l'eau a fait l'objet d'études, principalement par Nordon, Downes, Makay, McMahon et David [5,18–20].

4.3. Transfert liquide–gaz

Le transfert de vapeur d'eau entre les phases liquide et gazeuse peut s'effectuer par condensation ou évaporation selon que la masse volumique de la vapeur d'eau dans la phase gazeuse est supérieure ou inférieure à celle de saturation à la surface de la phase liquide :

$$\phi_{liq,gaz} = h_m a_s \text{coef}_{ev} (\rho_{v,liq} - \rho_{v,gaz}) \quad (11)$$

Avec $\text{coef}_{ev} = \frac{\varepsilon_{liq}}{\varepsilon_{liq,crt}}$ dans le cas de l'évaporation, 1 dans le cas de la condensation. La surface de la phase liquide est supposée égale à celle de la phase solide a_s .

4.4. Transferts gaz–airs de part et d'autre du tissu

Le transfert de masse entre l'air confiné et le gaz est proportionnel au coefficient de diffusion, et à la différence des masses volumiques de vapeur d'eau, mais inversement proportionnel au trajet moyen $d_{int} + e/2$ de la vapeur d'eau depuis l'air confiné jusqu'au milieu du tissu :

$$\phi_{int} = D_v \frac{\rho_{v,int} - \rho_{v,gaz}}{e(d_{int} + e/2)} \quad (12)$$

Une expression analogue est obtenue pour le transfert ϕ_{ext} vers l'air extérieur.

5. Les transferts de chaleur

Le modèle présenté ici néglige, par simplification, la conduction dans les fibres, ainsi que les transferts radiatifs.

5.1. Transfert liquide–solide

L'eau à la surface de la fibre est supposée en équilibre thermique instantané avec la fibre :

$$T_{\text{sol}} = T_{\text{liq}} \quad (13)$$

5.2. Transferts (solide–liquide)—gaz—airs de part et d'autre du tissu

La variation de la température des phases solide et liquide est due au transfert de chaleur suite à la sorption d'eau liquide ou de vapeur d'eau en provenance des phases liquide et gazeuse, au transfert de chaleur par condensation–évaporation entre la phase gazeuse et les phases liquide et solide, au transfert convectif de chaleur depuis la phase gazeuse, au transfert par convection avec les airs de part et d'autre depuis la phase gazeuse, et au transfert par convection avec les airs de part et d'autre du textile :

$$\begin{aligned} (\varepsilon_{\text{sol}} C p_{\text{sol}} \rho_{\text{sol}} + \varepsilon_{\text{liq}} C p_{\text{liq}} \rho_{\text{eau}}) \frac{\partial T_{\text{sol}}}{\partial t} \\ = \Delta h_d (\phi_{\text{liq}, \text{sol}} + \phi_{\text{gaz}, \text{sol}}) \\ + \Delta h_v (\phi_{\text{gaz}, \text{liq}} + \phi_{\text{gaz}, \text{sol}}) + h_{c, \text{gaz}} a_s (T_{\text{gaz}} - T_{\text{sol}}) \\ + \frac{h_{c, \text{int}} (T_{\text{int}} - T_{\text{sol}})}{e} + \frac{h_{c, \text{ext}} (T_{\text{ext}} - T_{\text{sol}})}{e} \end{aligned} \quad (14)$$

5.3. Température du gaz

La variation de la température du gaz provient des échanges convectifs avec les phases liquide et solide d'une part, et avec les airs de part et d'autre du textile :

$$\begin{aligned} C p_{\text{gaz}} \rho_{\text{gaz}} \varepsilon_{\text{gaz}} \frac{\partial T_{\text{gaz}}}{\partial t} = h_{c, \text{gaz}} a_s (T_{\text{sol}} - T_{\text{gaz}}) \\ + \phi_{\text{int}} C p_v (T_{\text{int}} - T_{\text{gaz}}) \\ + \phi_{\text{ext}} C p_v (T_{\text{ext}} - T_{\text{gaz}}) \end{aligned} \quad (15)$$

6. Les transferts de masse

6.1. Eau absorbée par la phase solide

La variation de la masse de la phase solide provient des sorptions de l'eau condensée à sa surface, et de la vapeur d'eau du gaz qui l'entoure :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{\text{sol}} \rho_{\text{sol}}) = \phi_{\text{liq}, \text{sol}} + \phi_{\text{gaz}, \text{sol}} \quad (16)$$

La masse de la phase solide est la somme de la masse de la fibre sèche, qui est constante, et de la masse d'eau absorbée par la fibre. La masse volumique de l'eau étant

constante, le premier terme de l'équation ci-dessus devient égal à $\rho_{\text{eau}} \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_{f, \text{eau}}$, ce qui permet de déterminer la masse d'eau absorbée par la fibre sèche.

6.2. Eau condensée (phase liquide)

La condensation d'eau du gaz, ou l'évaporation en vapeur d'eau de la phase liquide, ainsi que la sorption d'eau par la phase solide, engendrent une variation de la fraction volumique du liquide :

$$\rho_{\text{eau}} \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_{\text{liq}} = \phi_{\text{sol}, \text{liq}} + \phi_{\text{gaz}, \text{liq}} \quad (17)$$

6.3. Masse de vapeur d'eau dans le gaz

La variation de la masse de la vapeur d'eau dans le gaz provient de la condensation sur la phase liquide, de l'évaporation d'eau de la phase liquide, de la diffusion dans les fibres, et des flux de vapeur depuis les airs de part et d'autre du textile :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_{\text{gaz}} \rho_v) = \phi_{\text{liq}, \text{gaz}} + \phi_{\text{sol}, \text{gaz}} + \phi_{\text{int}} + \phi_{\text{ext}} \quad (18)$$

7. Résolution numérique—Comparaison avec le modèle de Gibson

A l'instant initial, on adopte généralement pour le textile des températures et des hygrométries égales aux moyennes de celles des airs extérieurs. La teneur en eau de la fibre M_0 est supposée connue, déduite de l'hygrométrie par la relation (6). La masse volumique de la fibre sèche, influencée par le gonflement, est donnée par la relation (5). On en déduit la fraction volumique d'eau absorbée à partir de la relation de définition de M_0 et de la fraction volumique de la fibre sèche supposée connue au départ :

$$\varepsilon_{f, e} = M \varepsilon_{f, \text{sec}, 0} \frac{\rho_{f, \text{sec}}}{\rho_e} \quad (19)$$

On se donne la fraction de la phase liquide, et on déduit la fraction de la phase gazeuse.

A l'instant zéro, on fait alors varier l'hygrométrie de l'air confiné. On calcule les flux de chaleur et de masse au travers des surfaces intérieure et extérieure du textile, et de là, les nouvelles quantités relatives aux trois phases. Le temps est incrémenté à très petit pas (0,01 s) pour éviter des instabilités.

La Fig. 4 montre les températures de la fibre de laine et du gaz, et, en comparaison, celle du textile donnée par Gibson [10].

Les écarts entre les températures de la fibre et du gaz sont faibles. Les Figs. 5 et 6 montrent que la sorption et la désorption ne sont pas des phénomènes symétriques, et que l'hygrométrie du gaz se différencie nettement de celle de la fibre.

L'hygrométrie relative étant très dépendante de la température, les Figs. 7 et 8 traduisent mieux les effets combinés

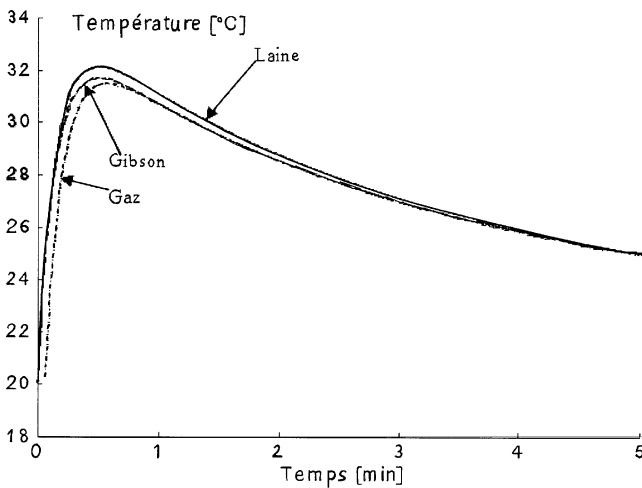


Fig. 4. Températures de la fibre de laine et du gaz au cours de la sorption. Comparaison au modèle de Gibson [10]. $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$, $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$.

Fig. 4. Temperatures of wool fiber and gas during sorption. Comparison with Gibson's model [10]. $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$, $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$.

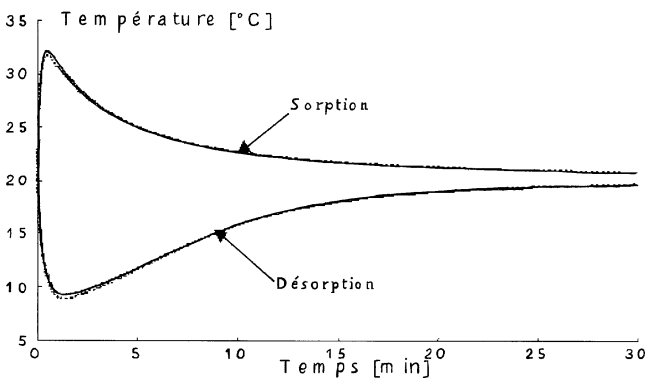


Fig. 5. Températures de la fibre de laine (—) et du gaz (---) au cours de la sorption et la désorption : $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Désorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$.

Fig. 5. Temperatures of wool fiber (—) and gas (---) during sorption and desorption: $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Desorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$.

de la température d'une part, de la charge et de la décharge d'humidité d'autre part. Les trajets, pour la charge autant que pour la décharge, comprennent, pour la Fig. 7, trois directions nettement différentes : la première correspond à des résultats théoriques pour une variation instantanée de l'hygrométrie ; ce premier trajet est accompli en un temps très court. La seconde traduit l'effet thermique dominant pendant un temps assez court, la dernière les effets thermique et massique de longue durée.

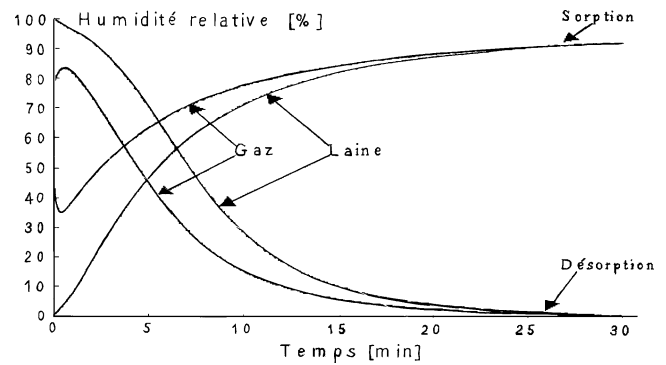


Fig. 6. Humidités relatives de la fibre de laine et du gaz au cours de la sorption et de la désorption : $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Désorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$.

Fig. 6. Hygrometries of wool fibre and gas during sorption and desorption: $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Desorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$.

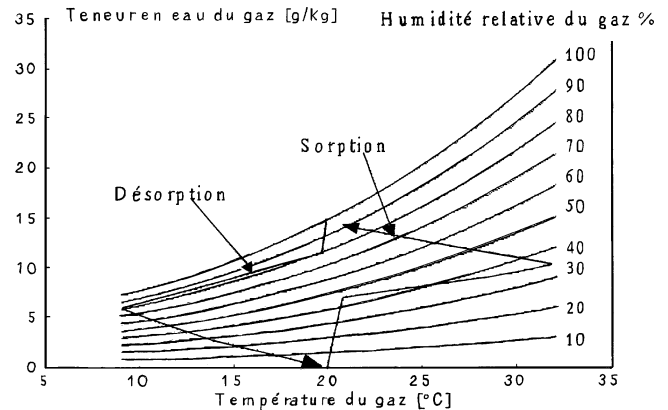


Fig. 7. Etat thermo-hydrigue du gaz inter-fibres (laine) représenté dans le diagramme psychrométrique au cours de la sorption (---) et la désorption (---): $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Désorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$. Teneur en eau du gaz correspondant à la saturation (—).

Fig. 7. Hygro-thermal state of the inter-fibrous gas (wool) drawn in the psychrometric diagram during sorption (---) and desorption (---): $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Desorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$. Water content corresponding to saturation (—).

8. Effet de sorption dans le cas d'un mouvement dynamique « soufflet » vestimentaire

L'effet « soufflet » déplace le vêtement relativement au corps à un rythme variant entre la seconde et plusieurs minutes [21]. La distance peau-tissu varie donc de quelques millimètres à quelques centimètres tandis que changent la température et l'hygrométrie de l'air confiné à cause des renouvellements de cet air. On considère dans ce paragraphe cette situation pour laquelle un milieu fibreux et son gaz inter-fibres sont placés entre deux ambiances : un air extérieur d'une part, et un air confiné dont l'hygrométrie alterne entre deux valeurs d'autre part.

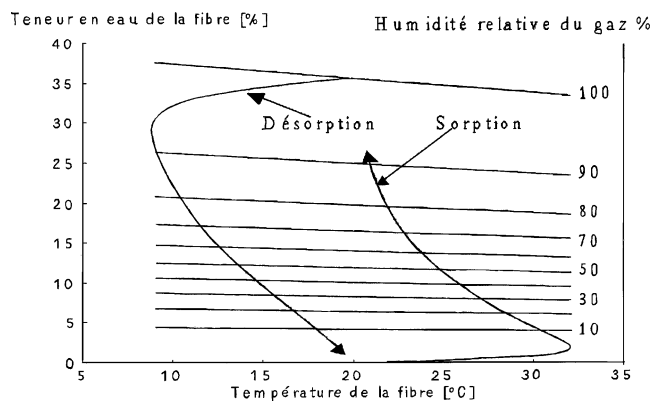


Fig. 8. Etat thermo-hydrigue d'une fibre de laine au cours de la sorption (—) et la désorption (---). $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0,01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Désorption : $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0,01\%$. Teneur en eau de cette fibre correspondant à l'équilibre (—).

Fig. 8. Hygro-thermal state of a wool fiber during sorption (—) and desorption (---). $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$. Sorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 0.01\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 99\%$. Desorption: $H_{\text{int},0} = H_{\text{ext},0} = 99\%$, $H_{\text{int}} = H_{\text{ext}} = 0.01\%$. Water content of this fiber in the case of equilibrium (—).

Barnes et Holcombe [12] ont modélisé cet effet soufflet : pour un mouvement alterné de rapprochement et d'éloignement du tissu, ils ont admis que celui-ci se positionnait à une valeur fixe en hygrométrie (la même pour le gaz et le matériau fibreux). En écrivant les équations d'un transfert diffusif pour les deux situations d'alternance, ils déterminent cette valeur fixe, et en déduisent l'existence de transferts supplémentaires, pouvant être importants selon eux, et qu'ils attribuent à la sorption par la fibre. Ils ont effectué des mesures en donnant au tissu le rôle d'un piston fermant une cuve contenant de l'eau. Ce travail a été discuté [13] : d'une part, les équations masquent le phénomène de sorption en faisant un phénomène résistif résultant d'une variation des résistances des airs interne et externe, d'autre part elles supposent un même état hydrique du textile, ce que la Fig. 9 montre comme étant inexact. L'expérimentation effectuée par ces auteurs met en jeu le transfert par porosité et l'agitation des couches d'airs, ce qui rend les résultats contestables.

Le transfert par diffusion entre deux milieux gazeux (repérés par les indices 1 et 2) est géré par la loi de Fick qui établit que le flux massique de vapeur d'eau est proportionnel au gradient de concentration. En utilisant l'équation des gaz parfaits, le gradient de concentration, qui n'est pas connu, est remplacé par le gradient de pression de vapeur [22], dont l'expression est :

$$\Delta P = H_1 P_{\text{sat}}(t_1) - H_2 P_{\text{sat}}(t_2) \quad (20)$$

dans cette expression, H est l'hygrométrie relative (%) du milieu considéré, $P_{\text{sat}}(t)$ la pression de vapeur saturante à la température t du milieu. Pour simplifier, il n'est considéré dans ce paragraphe que des milieux à la même température. En situation stationnaire, les forces qui agissent sur les molécules de vapeur d'eau pour les déplacer sont donc

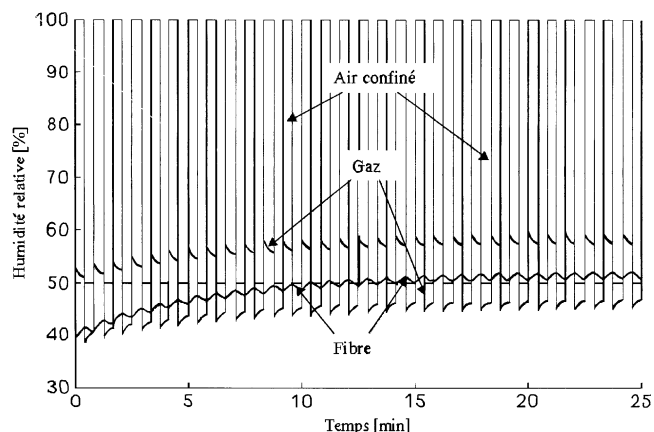


Fig. 9. Variations de l'humidité relative de la fibre de laine et du gaz suite à un changement alterné de l'humidité relative de l'air confiné H_{int} entre 50 et 100% au bout de 25 s. $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$, $H_{\text{int},0} = 50\%$, $H_{\text{ext},0} = 30\%$, $H_{\text{ext}} = 30\%$.

Fig. 9. Variations of the hygrometry of a wool fibre and gas in consequence of an alternate variation of the confined air hygrometry H_{int} between 50 and 100% each 25 s. $T_{\text{int},0} = T_{\text{ext},0} = T_{\text{int}} = T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$, $H_{\text{int},0} = 50\%$, $H_{\text{ext},0} = 30\%$, $H_{\text{ext}} = 30\%$.

déterminées par des relations linéaires faisant intervenir les hygrométries des milieux environnants. On raisonnera par la suite sur la différence des hygrométries, ce qui reviendra au même que de raisonner sur les forces elles-mêmes.

L'hygrométrie de la fibre ne peut varier que lentement de par les processus de fixation des molécules d'eau sur le milieu. En conséquence, pour une hygrométrie relative de l'air confiné alternant entre deux valeurs, l'hygrométrie de la fibre se fixe aux environs de la valeur barycentrique des airs extérieurs (Fig. 9). Par contre, l'hygrométrie du gaz inter-fibres alterne entre deux valeurs : cela se comprend quand on considère que les molécules de vapeur d'eau du gaz sont soumises à des pressions de vapeur en provenance non seulement du milieu fibreux, mais aussi des ambiances de part et d'autre du textile.

Pour les deux situations d'alternance considérées, l'hygrométrie d'un textile sans effet de sorption, se fixe à des valeurs déterminées par l'équation de diffusion, faisant donc intervenir les pressions de vapeur de l'air confiné et de l'ambiance. Il a été montré [21] que l'air confiné était le siège de mouvements convectifs intenses (couche fine verticale agitée, et séparant des frontières à des températures très différentes). L'épaisseur de la couche intervient donc peu, mais plutôt son état moyen. Ainsi, par exemple, pour un air confiné renouvelé alternativement à 100% et 50% d'hygrométrie relative, un air extérieur à 30%, et en simplifiant le problème pour considérer des coefficients de transferts identiques de part et d'autre, l'hygrométrie du gaz inter-fibres se fixerait à 65% et 40%.

Dans le cas d'un tissu à effets de sorption, les molécules de vapeur d'eau du gaz inter-fibres sont en plus attirées par la fibre, et la situation atteinte correspond à un équilibre entre trois pressions de vapeur qui s'exercent : en considérant la Fig. 9, l'hygrométrie de la fibre H_f se fixe à environ 52,5%,

celle du gaz H_g à respectivement 58,75% et 46,25%, soit à mi-chemin environ entre 52,5% et les valeurs 65% et 40% : dans la première alternance, les molécules de vapeur d'eau sont aspirées depuis l'air confiné (hygrométrie $H_{\text{int},1}$) par une force proportionnelle à $H_{\text{int},1} - H_g$, et vers le milieu extérieur (hygrométrie H_{ext}) par une force proportionnelle à $H_g - H_{\text{ext}}$. La force d'aspiration par le milieu fibreux a une expression différente des deux précédentes : pour une même différence des hygrométries, elle est généralement plus grande d'un facteur b . L'écriture de l'équilibre obtenu par les molécules de vapeur d'eau du gaz inter fibres conduit à une relation algébrique entre les trois forces, qui se simplifie sous la forme suivante :

$$(H_{\text{int},1} - H_g) = (H_g - H_{\text{ext}}) + b \cdot (H_g - H_f) \quad (21)$$

soit :

$$(100 - 58,75) = (58,75 - 30) + b_1 \cdot (58,75 - 52,5) \quad (22)$$

Et de même dans la seconde alternance :

$$(46,25 - 30) = (50 - 46,25) + b_2 \cdot (52,5 - 46,25) \quad (23)$$

On obtient $b_1 = b_2 = 2$, ce qui rend compte de la symétrie des transferts de masse par sorption et désorption dans les deux alternances. La force de sorption qui attire les molécules depuis l'air confiné vers la fibre est donc proportionnelle à la force qui attire les molécules depuis le gaz vers la fibre, ainsi qu'à celle qui attire les molécules depuis le milieu confiné vers le gaz, mais elle est inversement proportionnelle à celle qui attire les molécules depuis le milieu confiné vers l'extérieur. On peut donc introduire un facteur x de proportion, dont l'expression est :

$$x = \frac{(H_{\text{int},1} - H_g) \cdot b \cdot (H_g - H_f)}{H_{\text{int},1} - H_{\text{ext}}} \quad (24)$$

soit :

$$x = 7,366 \quad (25)$$

Et de même pour la force qui attire les molécules depuis la fibre vers l'air extérieur (soit le facteur y) par suite de

la faible hygrométrie de cet air extérieur, ainsi que pour les forces correspondantes dans la seconde alternance (soient les facteurs u et v) :

$$y = 5,134, \quad u = 10,156, \quad v = 2,344 \quad (26)$$

La Fig. 10 rend compte des transferts, c'est-à-dire de la charge du textile dans la première situation d'alternance, et de sa décharge dans la seconde. Dans la première alternance, sur la proportion $b_1 \cdot (H_g - H_f) = 12,5$ correspondant à la force de transfert depuis le gaz vers la fibre, $x = 7,366$ proviennent du milieu confiné, $y = 5,134$ de l'air extérieur : en considérant que le phénomène de sorption s'ajoute au transfert diffusif du milieu confiné vers l'extérieur (transfert pour le cas sans sorption), la force d'aspiration supplémentaire des molécules de vapeur d'eau de l'air confiné est plus grande que celle des molécules de vapeur d'eau de l'air extérieur, et cela en raison de l'écart hydrique plus grand d'un côté que de l'autre. La fibre augmente l'aspiration des molécules en provenance du milieu confiné, et diminue le transfert vers l'extérieur (Fig. 10). La fibre « se charge » en aspirant de la vapeur d'eau de part et d'autre.

On peut appeler « rendement de transfert » le rapport entre le transfert par sorption et le transfert diffusif. En considérant les deux situations d'alternance, le premier est proportionnel à la différence $x - v$, les transferts étant en sens contraires. Le second est proportionnel à la somme des deux transferts, ceux-ci ayant lieu dans le même sens, vers l'extérieur. On a donc :

$$\text{rendement} = \frac{x - v}{(H_{\text{int},1} - H_{\text{ext}}) + (H_{\text{int},2} - H_{\text{ext}})} \quad (27)$$

soit :

$$\text{rendement} = 5,5\% \quad (28)$$

Si le gaz était à la même hygrométrie 52,5% que la fibre dans les deux situations (cas de Barnes et al. [12]) on aurait :

$$b_1 = b_2 = 4, \quad x = 16,964, \quad y = 8,036,$$

$$u = 22,5, \quad v = 2,5, \quad \text{rendement} = 16,6\%$$

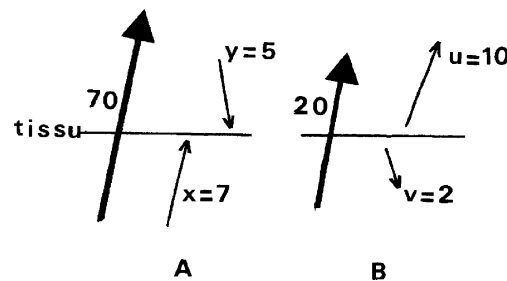
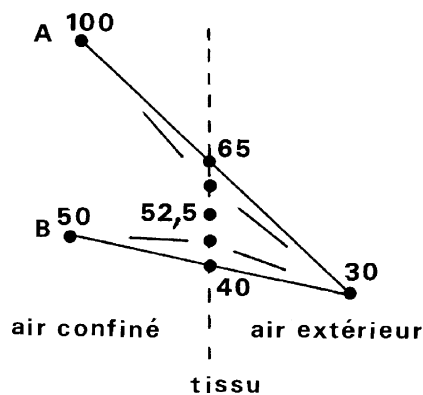


Fig. 10. A gauche, hygrométries relatives des airs, de la fibre et du gaz (sans et avec sorption) pour les deux situations A et B d'alternance de l'hygrométrie de l'air confiné. A droite, coefficients de proportionnalité des transferts de vapeur d'eau diffusifs (gras) et sorptifs (fin).

Fig. 10. On the left, relative hygrometries of the airs, of the fibre and of the gas (without and with sorption) for two situations A and B alternating of the confined air hygrometry. On the right, coefficients of proportion for the water vapour transfers, diffusive (thick) and sorptive (thin).

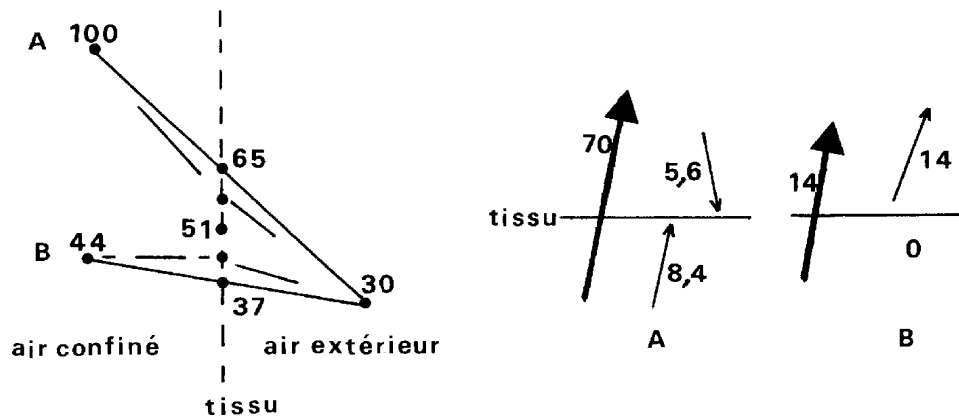


Fig. 11. Les hygrométries de la fibre et du gaz, comparées à d'autres, pour le cas d'un transfert nul vers l'air confiné dans la seconde situation d'alternance.

Fig. 11. The hygrometries of fibre and gas, compared with others, for a null transfer towards the confined air in the second alternating situation.

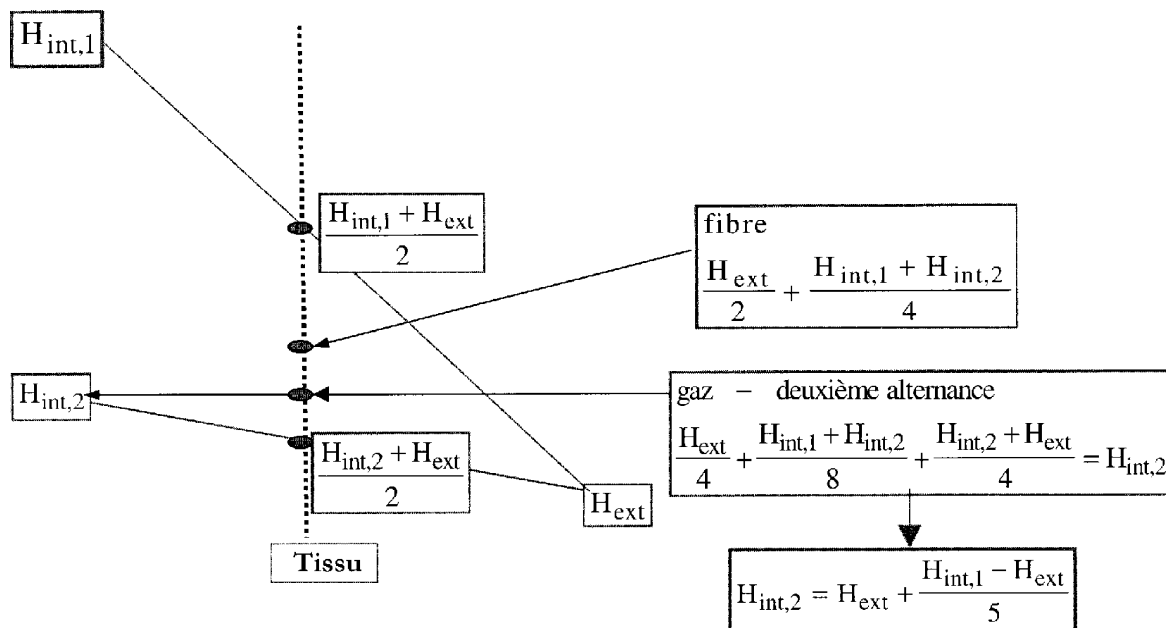


Fig. 12. A gauche, hygrométries relatives des airs, de la fibre et du gaz (sans et avec sorption) pour les deux situations A et B d'alternance de l'hygrométrie de l'air confiné. La situation B ne conduit à aucun transfert vers l'air confiné. A droite, coefficients de proportionnalité des transferts de vapeur d'eau diffusifs (gras) et sorptifs (fin).

Fig. 12. On the left, relative hygrometries of the airs, of the fibre and of the gas (without and with sorption) for two situations A and B alternating of the confined air hygrometry. The situation B leads to a null transfer towards the confined air. On the right, coefficients of proportion for the water vapour transfers, diffusive (thick) and sorptive (thin).

Ce dernier cas est un optimum qui peut difficilement être amélioré : en augmentant le coefficient d'échange vers l'extérieur (vitesse d'agitation de l'air extérieur supérieure à celle intérieure) [21], l'hygrométrie du textile se rapproche de celle de l'air extérieur, et cela diminue les transferts vers l'extérieur. En fait, c'est un compromis de quatre transferts qui doit être obtenu. Ce cas correspondrait à un tissu infiniment sorptif. Pour la laine qui est le plus sorptif des matériaux, on remarque que l'hygrométrie du gaz inter-fibres n'est qu'à mi-chemin environ de celle de la fibre, et de celle correspondant à un tissu sans sorption.

On peut trouver des situations pour lesquelles le transfert d'humidité par le textile vers l'air confiné, dans la seconde

position, est nul : il faut pour cela que l'hygrométrie du gaz devienne égale à celle de l'air confiné. Si le pouvoir de sorption du textile est tel que l'hygrométrie du gaz s'établit à mi-chemin entre celle barycentrique et celle de la fibre, les expressions des diverses hygrométries en jeu conduisent aux relations suivantes (Fig. 11) :

$$H_f = \frac{H_{ext}}{2} + \frac{H_{int,1} + H_{int,2}}{4} \quad (29)$$

$$H_{g,sanssorption} = \frac{H_{int,2} + H_{ext}}{2} \quad (30)$$

$$H_{g,2} = \frac{H_f + H_{g,sanssorption}}{2} = H_{int,2} \quad (31)$$

c'est à dire :

$$H_{\text{int},2} = H_{\text{ext}} + \frac{H_{\text{int},1} - H_{\text{ext}}}{5} \quad (32)$$

Le rendement devient alors 10%. La Fig. 12 illustre un tel cas. Si l'hygrométrie du gaz est la même que celle de la fibre (cas considéré par Barnes et Holcombe), le coefficient 5 devient 3, et le rendement retrouve la valeur optimale 16,6%. Il est intéressant d'observer que cette situation d'égalité des hygrométries du gaz et de l'air confiné pour une des deux situations d'alternance est un optimum vers lequel peut tendre à se stabiliser le système : en effet, la première situation d'alternance correspond à un air confiné depuis un certain temps, et saturé par l'évaporation de l'humidité corporelle pendant ce temps. La seconde situation correspond à un air injecté sous le vêtement par renouvellement (transferts perméo et pariéto-dynamiques : effet soufflet), légèrement préchauffé et préhumidifié à son entrée dans le milieu confiné. Si cet air est trop sec, il y aura transfert depuis le textile vers cet air confiné, et inversement s'il est trop humide. Ainsi, le textile, par effet de sorption, décharge l'air confiné de trop d'humidité, et évite trop de sécheresse : c'est un « faible » régulateur de l'hygrométrie près du corps.

9. Conclusion

Les mécanismes physico-chimiques de sorption engendrent une force d'attraction des molécules de vapeur d'eau qui sont dans le gaz inter-fibres, et par suite de celles qui sont dans l'air de part et d'autre du tissu vestimentaire. Il s'ensuit un état hydrique différent pour le gaz et pour le milieu fibreux. Un changement de la situation thermo-hydrigue de l'air environnant crée une cinétique rapide d'échauffement ou de refroidissement d'un tissu dans les premières dizaines de secondes, suivie d'une cinétique lente de refroidissement ou d'échauffement, elle-même associée à une cinétique plus lente de charge ou décharge d'humidité. Sorption et désorption apparaissent ne pas être des phénomènes symétriques.

Dans le cas d'une alternance rapide de la situation thermo-hydrigue de l'air confiné d'un côté du tissu, on observe un transfert d'humidité vers l'air extérieur, à un taux cependant six fois moindre que le transfert diffusif, ainsi qu'une faible régulation de l'hygrométrie de l'air confiné par le tissu. Finalement, le tissu d'un vêtement est responsable d'une variété de transferts, les uns de type passif (résistivité, diffusivité, sorption), les autres de type dynamique (capillarité, renouvellement d'air confiné ...), parce que conséquents de mouvements relativement au corps (effet soufflet). Les propriétés de tissage (porosité, perméabilité, couleur, souplesse, ampleur ...) paraissent importer autant que la nature du matériau fibreux. La fonction principale d'un tissu est bien d'être un interface pour créer une couche d'air autour du corps (microclimat) et la gérer.

Abridged English version

Sorptive transfers through textile fabrics during wear

Sorption in clothing constitutes a well-known process. It participates in varying environments, in which its heating and swelling effects are mainly observed. In fixed situations, in most of the cases studied, it is left out. The recent introduction of a pumping effect into the models makes its consideration necessary.

In Section 3 of this paper is reminded the works, mainly done by Le, Ly and Nordon, which lead to mathematical expressions for the differential heating of a fibrous material (Eq. (4) and Table 1), for the variation of its density (Eq. (5)) and water content (Eq. (6) and Table 2).

Sections 4, 5 and 6 present the heat and mass transfers between any two volumes of solid, liquid, gas (fiber with its sorpted water, condensed water, and inter-fibrous gas) and outside airs (Eq. (7)–(19)). They govern the volumic fractions of the fabric. The model built, and computed, was compared with that of Gibson (Fig. 4), which does not differentiate the three volumic fractions.

In Section 7 are analysed a few characteristics consequent from the sorptive effect: the temperature of the interfibrous gas is close to that of the solid-liquid fibrous volume (Fig. 5). But the relative hygrometry is quite different due to the action (water vapour pressure) of the airs on each side of the fabric (Fig. 6). Sorption and desorption have not opposite kinetics, the former faster in temperature and in charge of humidity during the first minutes, the latter more complete in discharge of humidity after a long time (Figs. 5–8).

Section 8 considers the case of an alternating humidity of the air in one side of the fabric. That corresponds to the pumping effect which renews the confined air near skin. A fast alternance (between each few seconds and each few dozens) makes the hygrometry of the fibrous volume fixed, but not that of the interfibrous gas (Fig. 9). And that is the real explanation of the mass transfer (Eq. (24) and Fig. 10) told by Barnes and Holcombe [12], but badly demonstrated, and not so important as said. This transfer is at the most 6 times lower than the diffusive transfer. Moreover, it is shown that a sorptive fabric behaves as a small regulator of the hygrometry near skin (Figs. 11 and 12).

Finally, this study shows the small contribution of a sorptive fabric to a water vapour transfer from the confined air near skin into the environment in case of a pumping effect. Thus, the main function of a garment remains to be an interface creating an air layer around the body, and managing it. With properties such as porosity, suppleness, lightness, wideness ..., and with those concerning the nature of the fibrous material and weaving, the fabric insures a variety of dynamic and passive transfers: resistivity, diffusivity, sorption, capillarity, confined air renewal ..., all of them with the aim of reaching a comfort feeling.

Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements au Laboratoire GEMTEX et à l'ENSAIT de Roubaix où cette recherche a été effectuée, ainsi qu'à leurs personnels pour les aides scientifiques et matérielles fournies. Les auteurs expriment aussi leurs remerciements aux référés et au rédacteur en chef de la revue pour les corrections apportées à ce document.

Références

- [1] D.A. De Vries, Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media, *Trans. Amer. Geophys. Union* 39 (1958) 909–916.
- [2] J.C. Watt, Sorption of water vapour by keratin, *J. Macromol. Sci. Rev. Macromol. Chem. C* 18 (2) (1980) 169–245.
- [3] P. Crausse, G. Bacon, S. Bories, Etude fondamentale des transferts couplés chaleur-masse en milieu poreux, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 24 (6) (1981) 991–1004.
- [4] J.G. Downes, B.H. Mackay, Sorption kinetics of water vapour in wool fibres, *J. Polymer Sci.* 28 (1958) 45–67.
- [5] P. Nordon, A model of mass transfer in bed of wool fibers, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 7 (1964) 639–651.
- [6] C.V. Le, N.G. Ly, Heat and mass transfer during forced convection of steam through fibrous assemblies, Thesis B. App. Phys., Saigon University 1977, B. App. Sc (Hons), University of Technology Sydney, 1986.
- [7] I.C. Watt, R.L. D'Arcy, Water vapour adsorption isotherms of wool, *J. Text. Inst.* 70 (1979) 298–307.
- [8] J.H. Wang, H. Yasuda, Dynamic water vapour and heat transport through layered fabric, *Text. Res. J.* 61 (1991) 10–20.
- [9] W.A. Lotens, Heat transfer from humans wearing clothing, Thesis, TNO Institute for Perception, The Netherlands, 1993.
- [10] P. Gibson, Multiphase heat and mass transfer through hygroscopic porous media with applications to clothing materials, US Army Soldier Systems Command Natick Research, Development and Engineering Center Natick, Massachusetts 01760-5019, Final Report, 1996.
- [11] S. Ben Amar, Etude expérimentale et modélisation des transferts de masse et de chaleur à travers un tissu vestimentaire en régime dynamique: phénomène de mouillage et de capillarité, Thèse UNSA-ENSAIT, 1998.
- [12] J.C. Barnes, B.V. Holcombe, Moisture sorption and transport in clothing during wear, *Text. Res. J.* 66 (12) (1996) 777–786.
- [13] X. Berger, Note about the paper: moisture sorption in clothing during wear, *Text. Res. J.* 69 (6) (1999) 463–464.
- [14] C.V. Le, N.G. Ly, Multilayer absorption of moisture in wool and its application in fabric steaming, *Text. Res. J.* 62 (11) (1992) 648–657.
- [15] C.V. Le, N.G. Ly, R. Postle, Model for heat and mass transfer between a wool fibers assembly and a permeating air steam, in: *Proceedings of the 9th Biennial Conference on Modelling and Simulation—Simulation Society of Australia*, 1991, p. 477.
- [16] M. Sozen, K. Vafai, Analysis of the non-thermal equilibrium condensing flow of a gas through a packed bed, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 33 (1990) 1247–1261.
- [17] C.V. Le, N.G. Ly, R. Postle, Heat and mass transfer during steam pressing of wool fabrics, *Text. Res. J.* 63 (1993) 88–98.
- [18] P. Nordon, B.H. Mackay, J.G. Downes, G.B. McMahon, Sorption kinetics of water vapor in wool fibers: Evaluation of diffusion coefficients and analysis of integral sorption, *Text. Res. J.* 30 (1960) 761–770.
- [19] G.B. McMahon, J.G. Dowens, Propagation of temperature and moisture changes during forced convective flow of air through a mass of hygroscopic fibres, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 5 (1962) 689–696.
- [20] P. Nordon, H.G. David, Coupled diffusion of moisture and heat in hygroscopic textile materials, *Internat. J. Heat Mass Transfer* 10 (1967) 853–866.
- [21] H. Sari, L'interface vêtement: échanges hygrothermiques et microclimat sous- vestimentaire, Thèse, UNSA, 1994.
- [22] X. Berger, H. Sari, M. Schneider, A new technique to measure the vapour flow resistance of textiles, *Internat. J. Textile Institute* 90 (1999) 361–376.