

INFLUENCE DU VÊTEMENT SUR LE CONFORT THERMIQUE MODÉLISATION EN RÉGIME DYNAMIQUE

H. DERBEL*, A. AYADI**, G. SERIN***

* *Faculté des sciences, Université de Sfax, Tunisie.*

** *École nationale d'ingénieurs de Sfax, Tunisie.*

*** *Laboratoire d'énergie solaire et thermique de l'habitat, Université Paul-Sabatier, Toulouse, France.*

(Soumis en mai 1991, accepté en janvier 1992)

RESUME. On met en évidence l'effet d'amortissement, que les vêtements procurent au sujet, lors des variations brutales des conditions ambiantes de température et d'humidité. On montre que cet effet est directement lié à la masse des vêtements et que l'influence de la nature de la fibre elle-même est faible.

ABSTRACT. In this paper, we study the damping effect of clothes during abrupt variation of ambient temperature and humidity conditions. We showed that this effect is directly related to the cloth-mass and that the influence of fibre quality is practically of little importance.

1 - INTRODUCTION

Pour assurer son équilibre thermique, l'Homme dispose d'un système de régulation qui lui permet de lutter contre le froid et le chaud par des réactions appropriées (frisson, sudation, vaso-motricité). Mais le confort n'est possible que si ces réactions sont minimales, le sujet étant alors dans l'état de neutralité thermique. Des vêtements adaptés à l'ambiance et à l'activité de l'individu sont un moyen d'y parvenir.

Lorsque les conditions ambiantes sont stables, les habits peuvent être considérés comme une simple résistance aux transferts de chaleur et de vapeur d'eau entre la peau du sujet et le milieu environnant. Mais il n'en est rien si l'on désire déterminer leurs influences lors des transitions brusques: c'est "l'effet tampon" lié à l'inertie thermique et massique du vêtement.

2 - LES VETEMENTS

La structure des tissus, constitués à partir d'un assemblage de fibres ou de filaments, permet à ceux-ci d'emmagasiner un volume important d'air (50 à 90 % en volume). La proportion d'air emprisonnée dépend de la qualité des fibres et entraîne une diminution de la conductivité thermique.

Ainsi, lorsque le tissu est en contact avec une atmosphère humide, ses fibres ont la capacité de fixer la vapeur d'eau. C'est la reprise (R) définie par le rapport massique de la vapeur d'eau absorbée (m_{ab}) à la masse du textile sec (m_s). Pour une température donnée, la reprise dépend essentiellement de l'humidité relative de l'ambiance (ϵ) (1).

NORTON et al. (2) ont déterminé la variation de (R) en fonction de (ϵ). Les courbes qu'ils ont obtenues (figure 1) permettent de déduire que dans le domaine qui nous intéresse (humidité relative comprise entre 20 et 80 %), ces courbes peuvent être assimilées à des droites tel que :

$$R = \alpha \epsilon + \beta$$

ou :

$$m_{ab} = (\alpha \epsilon + \beta) m_s$$

avec :

α : pente de la courbe linéarisée du taux de reprise en fonction de l'humidité relative

β : constante qui représente l'ordonnée à l'origine de cette courbe linéarisée

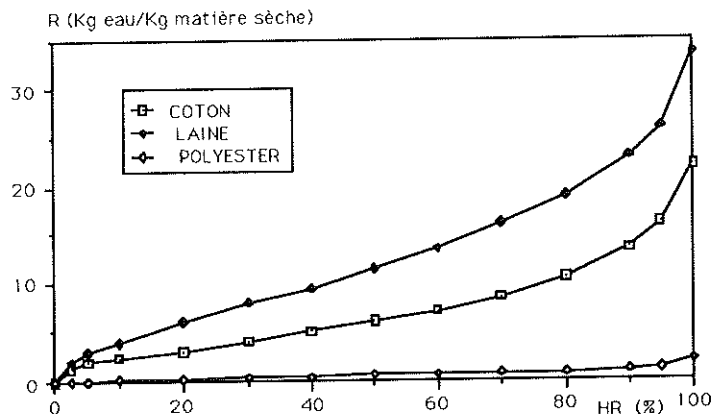


Figure 1 : Relation entre le reprise et l'humidité relative à 20°C

Par hypothèse, nous considérons le vêtement et la couche d'air du côté de la peau comme une seule couche uniforme, en contact d'un côté avec la peau, de l'autre avec l'air ambiant (figure 2).

Les indices "sk" représentent les grandeurs relatives à la peau, "cl" celles relatives à la surface du vêtement, "a" celles relatives à l'ambiance et P la pression partielle de vapeur d'eau à l'endroit considéré.

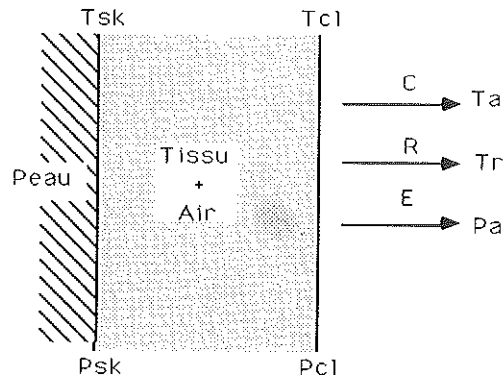


Figure 2 : Echange à la surface du vêtement.

Le transfert thermique entre les vêtements et l'ambiance s'effectue essentiellement par convection, rayonnement et par évaporation. Les expressions des densités de flux de transfert

$$C = f h_c (T_{cl} - T_a)$$

$$R = f h_r (T_{cl} - T_r)$$

$$E = f h_{ea} (P_{cl} - P_a)$$

où

h_c, h_r, h_{ea} sont respectivement les coefficients d'échange convectif, radiatif et évaporatoire ,

T_r : température de rayonnement de l'ambiance

f : coefficient d'augmentation de surface extérieure due à la présence des vêtements.

2.1 - Echange hygrothermique en régime permanent

Dans une première étape, on peut considérer les deux transferts de chaleur et d'humidité comme indépendants. Ainsi on peut exprimer en régime permanent, d'une part la densité de flux de chaleur entre la peau et l'environnement

$$[1] \quad q_s = \frac{T_{sk} - T_{op}}{\frac{1}{h_{cl}} + \frac{1}{f(h_c + h_r)}} = \frac{T_{sk} - T_{op}}{l_{cl} + \frac{l_a}{f}}$$

avec :

$$T_{op} = \frac{h_c T_a + h_r T_r}{h_c + h_r} \quad ; \quad \text{température opérative.}$$

h_{cl} : coefficient de transfert thermique à travers le vêtement ;

l : isolement thermique exprimé en $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ou en clo ($1 \text{ clo} = 0,155 m^2 \cdot ^\circ C/W$) selon Gagge (3)

et, d'autre part, la densité de flux de chaleur q_1 due au transfert d'humidité entre la peau et l'environnement :

$$[2] \quad q_1 = l_w \frac{\frac{P_{sk} + P_a}{1}}{\frac{1}{h_{ecl}} + \frac{1}{f h_{ea}}}$$

où :

h_{ecl} : coefficient de transfert thermique à travers le vêtement ;

h_{ea} : coefficient de transfert d'humidité proportionnel au coefficient convectif h_c tel que : $h_{ea} = l_w * h_c$; l_w étant le coefficient de Lewis ($0,0165 \text{ } ^\circ C \cdot P_a^{-1}$) (4)

En introduisant l'indice de perméabilité de Lotens (5) :

$$i_l = \frac{h_{ecl}}{l_w h_{cl}}$$

alors :

$$q_1 = l_w \frac{\frac{P_{sk} - P_a}{l_{cl}} + \frac{1}{f h_c}}{i_l + \frac{1}{f h_c}}$$

2.2 - Echange hygrothermique en régime transitoire

Si, à la suite d'un changement brusque des conditions d'ambiance, T_{cl} et P_{cl} ne correspondent plus à la solution du régime permanent, les relations [1] et [2] ne sont plus valables. FARNWORTH (6) a développé les

relations établissant les bilans enthalpiques et les bilans de masse à travers plusieurs couches de tissu. Il vient dans notre cas :

$$[3] \quad C_{cl} \frac{dT_{cl}}{dt} = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{\frac{1}{h_{cl}}} + \frac{T_a - T_{cl}}{\frac{1}{fh_c}} + \frac{T_r - T_{cl}}{\frac{1}{fh_r}} + q_c$$

$$[4] \quad L \frac{dm}{dt} = \frac{P_{sk} - P_{cl}}{\frac{1}{h_{ecl}}} + \frac{P_a - P_{cl}}{\frac{1}{fh_{ea}}}$$

avec,

C_{cl} : capacité calorifique du vêtement par unité de surface de peau et m masse d'eau contenue dans le tissu composée de :

m_v : masse de vapeur d'eau contenue dans le tissu, fonction de P_{cl} , T_{cl} , de la texture du tissu et de son épaisseur,

m_{ab} : masse d'eau absorbée,

m_l : masse d'eau présente sous forme liquide ; (pour un tissu détrempe m_l est nulle).

Ainsi :

$$m = m_v + m_{ab} + m_l$$

L : chaleur latente de sorption de l'eau,

q_c : quantité de chaleur liée à l'absorption ou à la désorption d'eau dans le tissu, donnée par :

$$[5] \quad q_c = L \frac{dm_{ab}}{dt}$$

En négligeant la cinétique de diffusion, et pour des phénomènes lents, les équations [3], [4] et [5] forment un système d'équations couplées qui modélisent dynamiquement les vêtements (7).

2.3 - Coefficients caractérisant le vêtement

Les valeurs de h_{cl} des vêtements les plus usuels sont déduites de celles de leurs isolements I (8).

Le tableau suivant (Tab. 1) donne les valeurs des constantes physiques nécessaires au calcul pour les fibres et les tissus étudiés (2).

	C (J/kg.K)	$\rho_{\text{fibre}}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\text{tissu}}(\text{kg/m}^3)$	α
Laine	1360	1320	250	0,280
Coton	1340	1500	282	0,160
Polyester	1880	1140	415	0,011

Tableau 1 : Constantes physiques de fibres et des tissus

3 - MODELISATION D'UN SUJET DANS UNE AMBIANCE VARIABLE

Le modèle de thermorégulation humaine utilisé est celui de Gagge (9). C'est un modèle à deux nœuds où le sujet est caractérisé par sa température centrale T_c et sa température de peau T_{sk} (figure 3). Il représente un individu standard pesant 70 kg et ayant $1,8 \text{ m}^2$ de surface corporelle.

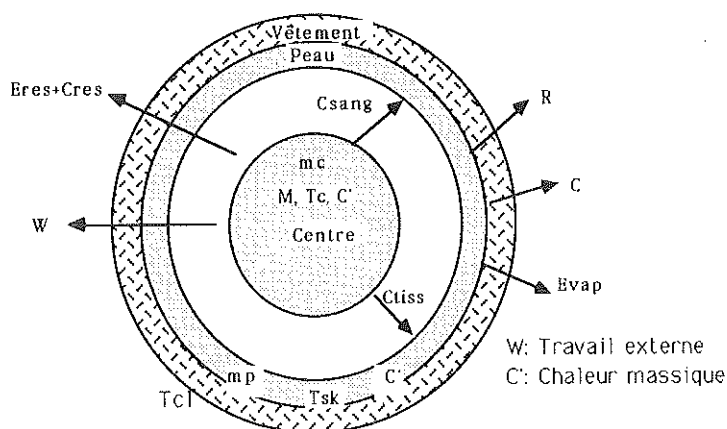


Figure 3 : Modèle de thermorégulation à deux nœuds de Gagge.

Le centre produit par métabolisme une quantité de chaleur M qui doit être entièrement évacuée vers l'extérieur sous peine de déséquilibre. Les échanges entre le centre et la peau se font par conduction tissulaire (C_{tiss}) et par convection sanguine (C_{sang}).

Le sujet échange de la chaleur avec le milieu environnant par convection (C), rayonnement (R), évaporation (E_{vap}) et par respiration exprimée par E_{res} et C_{res} , respectivement les pertes latente et sensible.

Le bilan énergétique de chaque couche permet de calculer l'évolution des températures T_c et T_{sk} pendant un intervalle de temps Δt :

$$m_c C' \frac{\Delta T_c}{\Delta t} = M - W - (E_{res} + C_{res}) - (C_{tiss} + C_{sang})$$

$$m_p C' \frac{\Delta T_{sk}}{\Delta t} = C_{tiss} + C_{sang} - (R + C + E_{vap})$$

La comparaison de T_{sk} et T_c à des températures de référence commande les réponses thermorégulatrices (frissons, sudation, vasomotricité), dont les effets sont inclus dans les bilans énergétiques.

L'adjonction des vêtements agit comme une couche supplémentaire qui modifie les échanges entre la peau et l'environnement.

Afin de simuler le comportement d'un sujet dans une ambiance variable, le modèle dynamique de transfert de chaleur et d'humidité à travers les vêtements est associé au modèle de Gagge puis inséré dans le logiciel TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation programme) (10). Des situations typiques ont été étudiées :

- climat froid : le sujet porte des habits chauds (laine) ;
- climat chaud : le sujet porte des habits composés de différents textiles ;
- climat chaud et sec : même situation que précédemment.

Les simulations ont permis de mettre en évidence l'influence de l'inertie du vêtement et la nature du fibre.

4 - RESULTATS

4.1 - Influence de l'inertie du vêtement

Cette influence est examinée sur un cas représenté par un sujet très habillé ($I_{cl} = 1,5$ clo ; 1 kg de laine par mètre carré), passant d'une ambiance d'activité (19°C, 40 % d'humidité relative) à une ambiance froide et humide (5°C, 96 % d'humidité), puis revenant au bout de deux heures à l'ambiance initiale.

Les figures de 4 à 7 présentent l'évolution comparée de diverses variables lorsqu'on néglige ou pas l'inertie thermique des habits.

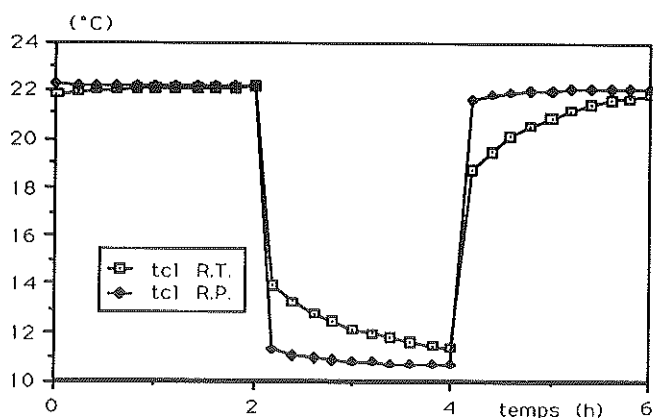


Figure 4 : Evolution de la température des vêtements, sans inertie (R.P.) ; avec inertie (R.T.)

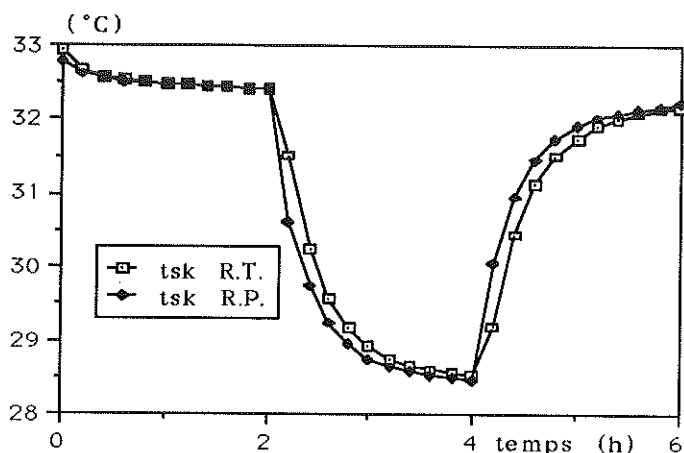


Figure 5 : Evolution de la température de la peau

A la température de 19°C et $\varepsilon = 40\%$, les vêtements sont secs. La vapeur d'eau est absorbée lentement lors du passage à 5°C, provoquant un retard à la baisse de leur température T_{cl} , (figure 4) et, par conséquent, de la température cutanée T_{sk} , (figure 5). Le phénomène inverse se produit lors du retour à la température de 19°C.

Les figures 6 et 7 présentent le bilan thermique du sujet (store), ainsi que la quantité de chaleur sensible évacuée (dry) et la quantité de chaleur produite par frissons (shiv) dans l'un et l'autre cas. En l'absence de sudation, il est évident qu'au bout d'un laps de temps suffisant, les deux modes de simulation tendent vers la même valeur de régime permanent. La durée de l'effet d'inertie semble quelque peu exagérée. Les

vêtements sont ici considérés comme une couche continue placée sur la peau. Il y aurait lieu de tenir compte de la porosité du tissu qui entraîne un phénomène de convection à travers le vêtement.

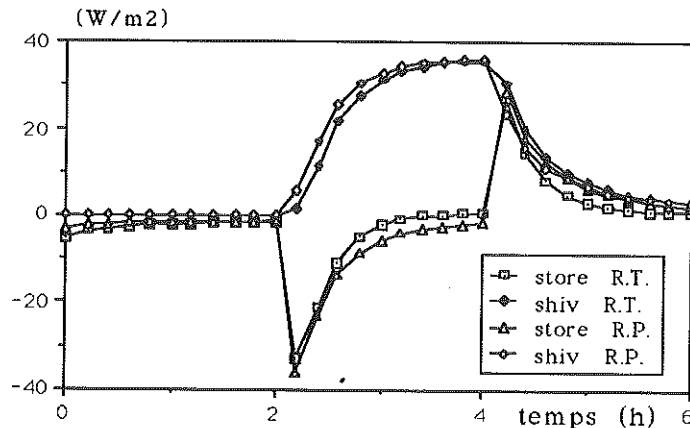


Figure 6 : Bilan thermique et chaleur produite par frisson.

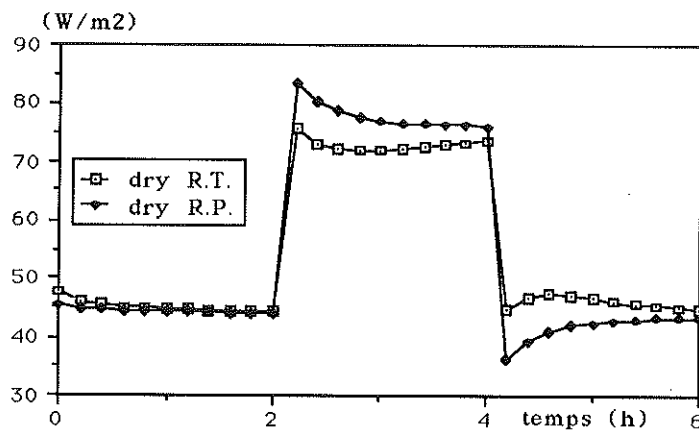


Figure 7 : Chaleur sensible évacuée par le sujet.

4.2- Influence de la nature du tissu

Dans cette expérience, le sujet est placé en climat très humide ($\epsilon = 95 \%$, 20°C). Il passe après deux heures à une ambiance à 30°C et 70% d'humidité. Mais il est vêtu légèrement ($I_{cl} = 0,6 \text{ clo}$; $0,380 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$). Les figures 8 et 9 montrent l'évolution de T_{sk} et T_{cl} , lorsqu'on fait varier la nature des fibres composant le tissu (laine, coton, polyester). Les différences sont faibles. La laine produit un effet tampon maximum dû à ses propriétés hygroscopiques.

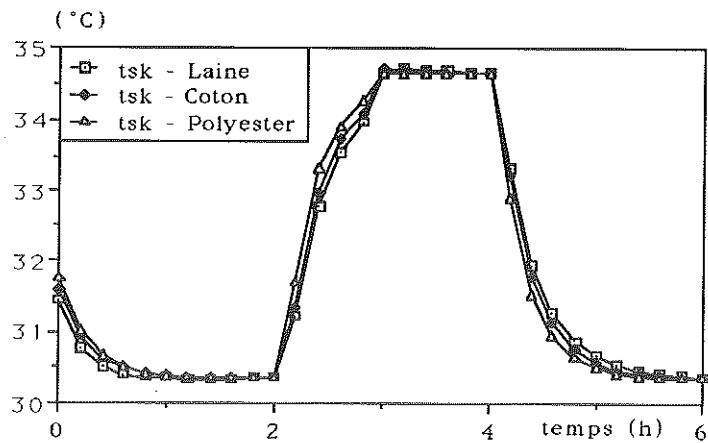


Figure 8 : Evolution de T_{sk} pour des vêtements constitués de fibres différentes

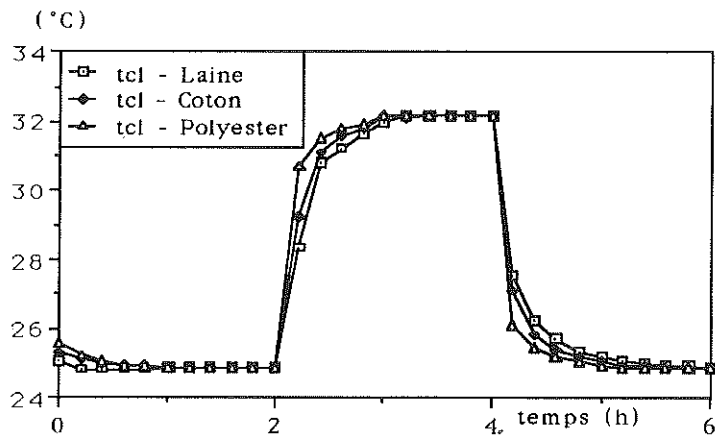


Figure 9 : Evolution de T_{cl} pour des vêtements constitués de fibres différentes

5 - CONCLUSION

Les vêtements modifient les transferts thermiques entre la peau d'un sujet et l'ambiance. Le modèle dynamique présenté a permis de mettre en évidence l'effet tampon sur les changements brusques d'ambiance. Il a permis également de comparer l'influence de la nature des fibres.

REFERENCES

- 1 - F. MONCHOUX, G. SERIN, "Performance hygrothermique des vêtements", Journées de la Société Française de Thermique. Paris, mars 1988.
- 2 - W.E; NORTON, J.W.S. HEARLE, "Physical properties of textile fibres", Heinemann, London, 1975.
- 3 - A.P. GAGGE, A. C. BURTON et H.C. BAZET, Science, 94, 428 - 43, (1941)
- 4 - F. SACADURA, "Initiation aux transferts thermiques", Edité par Technique et documentation, Paris, 1980.
- 5 - T. OHORI, L.G. BERGLUND et A.P. GAGGE, "Comparaison of current two parameter indices of vapor permeation of clothing as factors governing thermal equilibrium and human comfort", ASHRAE. Trans. 90, 85 - 101, (1984).
- 6 - B. FARNWORTH, " A numerical model of the combine diffusion of heat and water vapor through clothing".Textile Res. 56, 11, (1986).
- 7 - H. DERBEL. "Modélisation dynamique des transferts de chaleur et d'humidité à travers le vêtement, couplage avec deux modèles de thermorégulation humaine". Thèse Energétique, Université Paul-Sabatier, Toulouse. FRANCE, 1990.
- 8 - E.A.Mc CULLOUGH, B.W. JONES et J. HUCK; " A comprehensive data base for estimating clothing insulation". ASHRAE Trans. 91, 29, (1985).
- 9 - A.P. GAGGE, A.P. FOBELET et L.G. BERGLUND. ASHRAE Trans. 92, 709, (1986).
- 10 - S.H. KLEIN et W.A. BECKMAN. ASHRE Trans, 76, (1971).