

Gestion de l'air d'un local Modélisation des échanges d'humidité internes air-habitant-mobilier

par F. MONCHOUX(*), G. SERIN(*), F. THELLIER(*)
et A. CORDIER(*)

Nomenclature

A	surface de peau	m ²
c	concentration en vapeur d'eau	kg.m ⁻³
c _p	capacité thermique massique	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
C et E	quantités de chaleur transmises par unité de temps	W
f	coefficient d'augmentation de surface des vêtements	
h	coefficient de transfert de masse	kg.m ⁻² .Pa ⁻¹ .s ⁻¹
h _{cc}	coefficient de transfert de masse relatif à la concentration	m.s ⁻¹
h _r	coefficient de transfert thermique par rayonnement (W.m ⁻² .K ⁻¹)	
L	chaleur latente massique de vaporisation de l'eau	J.kg ⁻¹
m	masse	kg
M	métabolisme	W
P	pression de vapeur d'eau	Pa
Q	taux de renouvellement d'air	vol.s ⁻¹
r	constante des gaz parfaits de la vapeur d'eau	J.K ⁻¹ .kg ⁻¹
R	quantité de chaleur transmise par rayonnement par unité de temps	W
RH	humidité relative	%
S	aire de surface absorbante	m ²
t	temps	s
T	température	K
V, v	volumes	m ³
W	travail produit par unité de temps	W

Symboles grecs

α	pende de la courbe d'absorption d'un matériau absor- bant	
ρ	masse volumique	kg.m ⁻³
ω	moisture	%

Indices

a	relatif à l'ambiance
cl	tissu
ext	extérieur
h	habitant - humain
s	surface
sk	peau

Introduction

Le problème de la gestion de l'air est apparu progres-
sivement avec l'isolation croissante des bâtiments
et le souci de limiter la consommation énergétique
nécessaire au chauffage ou à la climatisation. En effet,
une part de cette énergie est destinée à *compenser les
déperditions thermiques* à travers les parois ; l'autre
sert à *réchauffer l'air neuf* que l'on doit introduire pour
assurer la salubrité de l'ambiance.

Dans le temps où les bâtiments étaient peu ou pas
isolés, la consommation énergétique due au renouvel-
lement d'air représentait 10 % de la consommation
totale. L'apparition d'un type de construction *hyper-
isolée* a fait passer ce taux à 20 ou 30 % environ et le
renouvellement d'air se trouve placé dans la ligne de
mire des *économiseurs d'énergie*.

La tendance des nouvelles réglementations est de
permettre l'*abaissement du taux légal de renouvelle-
ment d'air*. Mais il ne peut être abaissé indéfiniment,
car apparaissent alors des phénomènes nuisant au
confort et à la salubrité, ainsi qu'à la conservation du
bâtiment. L'humidité de l'air intérieur est au coeur de
ces problèmes. Son calcul nécessite une synthèse
quelquefois délicate de grandeurs familières aux phy-
siciens (pour le bâtiment) ou aux physiologistes (pour
l'habitant).

1. L'humidité dans le bâtiment

1.1. Effets de l'humidité

L'excès d'humidité peut entraîner des condensa-
tions intempestives dans les parties froides du bâti,
avec toutes les dégradations que cela entraîne. En
contrepartie, un air trop sec a des effets néfastes sur
le mobilier : on remarque alors que le piano a baissé
d'un demi-ton ou que l'on subit des décharges électri-
ques après avoir marché sur une moquette.

(*) Laboratoire Energie Solaire Et Thermique de l'Habitat
(LESETH), 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex,
France.

Article reçu le 30.06.1989, accepté le 08.09.1989.

TABLEAU I					
Vapeur d'eau et dioxyde de carbone produits par l'homme en fonction de son activité					
Activité	Métabolisme (W)	H ₂ O expiré (g/h)	H ₂ O évaporé (g/h)	H ₂ O totale (g/h)	Volume CO ₂ expiré (l/h)
Repos	100	15	15	30	18
Activité moyenne	250	30	110	140	36

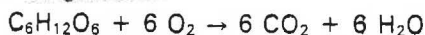
C'est toutefois au niveau de l'occupant que les effets de l'humidité se font le plus sentir. Une humidité relative inférieure à 30 % provoque une irritation des muqueuses ; les enquêtes épidémiologiques effectuées en Europe et en Amérique du Nord montrent qu'une augmentation d'humidité s'accompagne d'une diminution des rhumes et autres maladies respiratoires de l'hiver. En revanche, un climat chaud et humide provoque la prolifération d'acariens et d'autres organismes microscopiques responsables d'asthme et d'allergies diverses. En conséquence, divers auteurs [1 et 2] préconisent de maintenir à l'intérieur de l'habitation une humidité relative de 30 à 50 %.

En ce qui concerne le confort de l'habitant, il faut remarquer que le taux d'humidité a un effet thermique sur l'être humain : plus l'air est sec, plus l'évaporation de la transpiration et de la perspiration est intense, ce qui entraîne un abaissement de la température cutanée, le contraire se produisant lorsque l'humidité relative augmente. A température égale, un air humide est ressenti comme plus chaud. Ces réactions sont abordées dans le paragraphe consacré au modèle de thermorégulation humaine (§ 2.2).

1.2. Influence de l'occupant sur la composition de l'air

L'homme échange de la chaleur avec son environnement et modifie ainsi le bilan thermique de l'habitat ; mais sa présence modifie également la composition de l'air. L'oxygène, le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau sont les trois principales espèces à contrôler et c'est le renouvellement de l'air qui doit assurer cette charge.

Le corps humain est le siège d'une production de chaleur, ou *métabolisme*, liée à des réactions chimiques dans les cellules, qui sont du type oxydo-réduction du glucose :



Cette formule donne un volume identique pour l'oxygène nécessaire, l'eau et le dioxyde de carbone produits. En réalité, le volume de CO₂ produit est un peu inférieur au volume d'oxygène inspiré ; mais nous pouvons retenir que ces trois volumes sont du même ordre de grandeur.

La quantité de CO₂ ou de vapeur d'eau produite est proportionnelle à la valeur du métabolisme [2]. Il faut toutefois se rappeler qu'à l'eau métabolique, nous devons ajouter celle due à l'évaporation sur la peau ou les muqueuses. Cette production de vapeur est également liée au métabolisme (activité). A titre d'exemple, le tableau I donne des valeurs moyennes pour deux types d'activité.

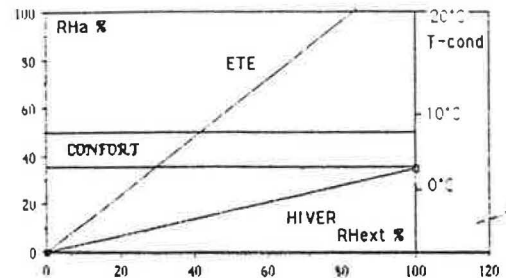


Fig. 1. — Influence de la saison

On constate que la production d'eau varie dans de plus grandes limites que celle de CO₂ : c'est donc sur le contrôle de l'humidité de l'air, par ailleurs plus facile à appréhender que la teneur en CO₂, que seront basés la plupart des systèmes de ventilation modulables.

Remarque : des études sur la qualité de l'air ont montré que le taux de CO₂ est un bon indicateur du niveau des odeurs dues à la présence de corps humains [3].

1.3. Influence de la saison

Par simple renouvellement d'air, dans une pièce inhabitée sans source de vapeur d'eau, la pression partielle de vapeur d'eau intérieure tend vers la valeur à l'extérieur car, dans cette transformation isobare (échauffement ou refroidissement), les pressions partielles sont conservées. On a donc la relation suivante :

$$RH_a = RH_{ext} \frac{P_s(T_{ext})}{P_s(T_a)}$$

avec

RH_a, T_a humidité relative et température intérieures.
 RH_{ext}, T_{ext} humidité relative et température extérieures
 $P_s(T)$ pression de vapeur saturante à la température T .

La figure 1 représente les variations de RH_a en fonction de RH_{ext} . Apparaissent ici des problèmes liés à la saison :

- en hiver : air trop sec ;
- en été : RH_a à la limite supérieure, risques de condensation.

L'augmentation de l'humidité de l'air interne par production de vapeur contribue à l'amélioration du confort hivernal, mais tend à le détériorer en été.

1.4. Influence des matériaux absorbants

Certains matériaux utilisés dans l'habitat peuvent absorber — ou désorber — une masse d'eau qui dépend de la teneur en eau du matériau et de l'air ambiant :

$$\dot{m}_{abs} = h_{cc} (c_a - c_s) \cdot S$$

avec \dot{m}_{abs} débit massique (kg.s⁻¹),
 h_{cc} coefficient de transfert de masse (m.s⁻¹) ; il est lié au coefficient d'échange thermique par convection [4].

TABLEAU II				
Quelques valeurs d'échange de vapeur d'eau dans un local				
	Bouilloire	Friteuse	Baignoire 35 °C	Condensation par m ²
Débit (g/h)	+ 300	+ 1 000	+ 500	- 30
Plantes vertes : quelques grammes par heure.				

c_a et c_s concentrations en vapeur d'eau dans la pièce et au voisinage immédiat de la surface absorbante (kg/m³),

S aire de la surface absorbante (m²).

Sachant que la masse d'eau absorbée m_{abs} est liée instantanément au taux d'humidité le plus voisin RH_s [5] :

$$m_{abs} = \rho V \alpha RH_s$$

avec ρV masse sèche du matériau absorbant (kg),

α pente de la courbe d'absorption linéarisée du matériau absorbant (kg/kg matériau sec).

En considérant la vapeur d'eau comme un gaz parfait, on a alors les relations [6 et 7] :

$$c_i = P_s(T_i) \cdot RH_i / r \cdot T_i$$

($i = a$ ou s)

et

$$\dot{m}_{abs} = \frac{h_{cc}}{r} \left[\frac{P_s(T_a)}{T_a} \cdot RH_a - \frac{P_s(T_s)}{T_s} \cdot \frac{m_{abs}}{\rho V \alpha} \right] \cdot S$$

avec

$r = 462 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$, constante de la vapeur d'eau.

On obtient donc une équation différentielle qui nécessite de connaître T_a et T_s . Lorsque le matériau est à l'équilibre avec l'ambiance, les températures sont égales. Une variation de T_a ou de RH_a entraîne une absorption ou une désorption d'eau et, par conséquent, un échange de chaleur latente. Dans l'habitat, ces variations sont lentes, les quantités de chaleur négligeables et on supposera que T_s demeure égal à T_a . Il reste donc l'équation différentielle :

$$\dot{m}_{abs} = \frac{h_{cc} P_s(T_a)}{r T_a} \left(RH_a - \frac{m_{abs}}{\rho V \alpha} \right) \cdot S$$

qui permet d'introduire \dot{m}_{abs} dans le bilan de masse du local étudié.

1.5. Les productions et absorptions de vapeur d'eau

Certains locaux (cuisine, salle de bain) sont le siège de sources de vapeur d'eau importantes. Les quantités émises dépendent peu du taux d'humidité ambiante. Le tableau II en donne quelques exemples ainsi que le débit de l'eau condensée sur un vitrage froid.

1.6. Le renouvellement d'air

Il peut être de deux types :

— *renouvellement constant*, dont le taux est choisi, de façon arbitraire et judicieuse, suivant les produc-

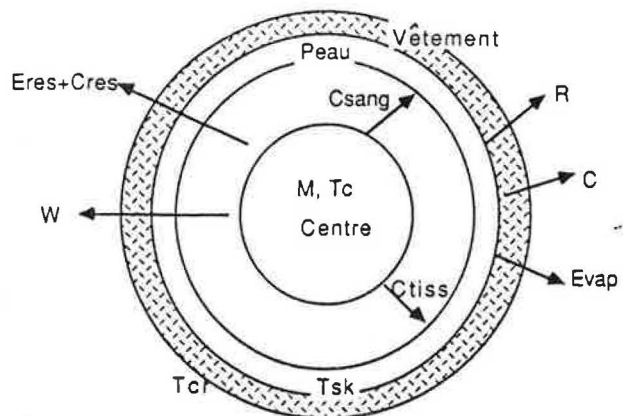


Fig. 2. — Schéma du modèle de GAGGE

tions internes et le nombre d'occupants ;

— *renouvellement à taux variable (bouche hygro-réglable)*, basé sur un débit variant linéairement avec le degré d'humidité de l'air intérieur.

2. Modélisation du système

2.1. Le logiciel de gestion

Nous utilisons le logiciel TRNSYS [8] qui permet de simuler tout système thermique couplé et dont la structure modulaire est particulièrement adaptée à ce type d'étude. Chaque élément du système (mur, habitant, etc.) ou phénomène physique (échanges radiatifs, bilan convectif, etc.) est représenté par un module propre pouvant utiliser n'importe quel type d'algorithme. Les entrées-sorties de ces modules sont gérées par un processus itératif qui converge vers la solution.

2.2. Modélisation de l'habitant

2.2.1. Le modèle

La production de sueur est liée à l'état thermique du corps et ne peut être évaluée que par un *modèle de thermorégulation humaine*. Celui que nous utilisons a été écrit par GAGGE *et al.* [9]. C'est un modèle à deux noeuds où le sujet est caractérisé par sa température centrale T_c et sa température de peau T_{sk} (figure 2). Il représente un individu standard pesant 70 kg et ayant 1,8 m² de surface corporelle.

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 la *convection sanguine* (C_{sang}).

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

A chaque pas de temps de calcul, le bilan énergétique de chaque couche permet de calculer l'évolution des températures T_c et T_{sk} :

$$m_c c_c \frac{\Delta T_c}{\Delta t} = M - W - (E_{res} + C_{res}) - (C_{tiss} + C_{sang})$$

$$m_{sk} \%, \frac{\Delta T_{sk}}{\Delta t} = C_{tiss} + C_{sang} - (R + C + E_{vap})$$

avec $m_c \%$ et $m_{sk} \%$ capacités thermiques du centre et de la peau.

W travail produit par l'individu par unité de temps.

La comparaison de T_{sk} et T_c à des températures de référence commande les réponses thermorégulatrices (frissons, sudation, vaso-motricité), dont les effets sont inclus dans les bilans énergétiques. Le modèle donne, à chaque pas de temps, les températures et les flux de chaleur évacués vers l'ambiance.

2.2.2. Les échanges évaporatoires de l'homme nu

L'humidité de l'air ambiant intervient dans les échanges par chaleur latente (E_{res} et E_{vap}). Elle intervient peu dans E_{res} , mais régit l'évaporation de la sueur.

— Par sa *respiration*, l'homme transmet à son milieu environnant une quantité d'eau telle que :

$$\dot{m}_{res} = E_{res} / L$$

avec L chaleur latente massique de vaporisation de l'eau.

— La sueur est sécrétée par les glandes sudoripares, puis excrétée à la surface de la peau : c'est la *transpiration*. La quantité de sueur produite correspond à la puissance à évacuer pour maintenir l'équilibre thermique du corps. Suivant l'état hygrométrique de l'air, cette quantité de sueur pourra — ou non — être évaporée.

La peau est donc un milieu humide difficile à caractériser que l'on considère, pour simplifier, comme une mosaïque de surfaces complètement mouillées dont l'aire totale est A_w et de surfaces sèches d'aire $A_{DU} - A_w$ (avec A_{DU} surface totale du corps humain, dite *aire de Dubois*). La mouillure ω est le rapport A_w/A_{DU} .

En admettant que la température ambiante et celle de la peau sont voisines, la quantité d'eau évaporée par la peau peut s'écrire :

$$\dot{m}_{vap} = A_w \frac{h_{cc}}{r T_a} (P_{sk} - P_a) \quad (\text{voir § 1.4})$$

avec P_{sk} pression de vapeur saturante à la température T_{sk} ,

P_a pression de vapeur ambiante.

Lorsque la peau est entièrement mouillée, l'évaporation est maximale :

$$\dot{m}_{max} = A_{DU} \frac{h_{cc}}{r T_a} (P_{sk} - P_a)$$

On en déduit :

$$\omega = \frac{A_w}{A_{DU}} = \frac{\dot{m}_{vap}}{\dot{m}_{max}}$$

La mouillure n'est jamais nulle, même en l'absence de transpiration visible, car une certaine quantité d'eau diffuse à travers la peau (déshydratation). Dans ce cas, $\omega_{min} = 6 \%$.

— Si l'ambiance est sèche, toute la quantité d'eau produite peut être évaporée ; la mouillure augmente avec l'évaporation :

$$\omega = \frac{\dot{m}_{vap}}{\dot{m}_{max}}$$

— Dans les cas où l'ambiance est humide, l'évaporation requise ne peut plus être atteinte ; dès que l'évaporation atteint l'évaporation maximale, la mouillure est égale à 1 et l'excédent de sueur ruisselle :

$$\omega = 1 \text{ et } \dot{m}_{vap} = \dot{m}_{max}$$

La quantité d'eau transmise dans le local \dot{m}_h sera en définitive la somme des quantités :

$$\dot{m}_h = \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{res}$$

2.2.3. Les vêtements

L'adjonction de vêtements agit comme une couche supplémentaire qui modifie les échanges entre la peau et l'environnement. FARNWORTH [10] a développé les relations établissant les bilans enthalpiques et les bilans de masse à travers plusieurs couches de tissu. Il vient, dans le cas représenté sur la figure 2 :

$$\frac{dm}{dt} = A_w h_{cl} (P_{sk} - P_{cl}) + f A_{DU} \frac{h_{cc}}{r T_a} (P_a - P_{st})$$

avec

- f rapport entre la surface des vêtements et la surface de la peau A_{DU} ,
- h_{cl} coefficient de transfert humide du vêtement ($\text{kg.m}^{-2}.\text{Pa}^{-1}.\text{s}^{-1}$),
- P_{cl} pression partielle de vapeur d'eau à la surface du vêtement.
- m masse d'eau contenue dans le tissu ; en négligeant l'eau liquide qui n'interviendrait que dans un tissu détrempé :

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

- m_v masse de vapeur d'eau contenue dans le tissu, qui dépend de P_{cl} , T_c , de la texture du tissu et de son épaisseur,
- m_{ab} masse d'eau absorbée.

La quantité de chaleur liée à l'absorption ou à la désorption d'eau dans le tissu est :

$$q_c = L_s \frac{dm_{ab}}{dt}$$

L_s étant la chaleur latente de sorption de l'eau.

Dans le cas de variations brusques de l'humidité environnante, les masses absorbées ou désorbées peuvent être importantes et la quantité q_c non négligeable, produisant des effets thermiques décelables sur la couche de vêtement [11].

Ce phénomène peut intervenir, par exemple, lorsqu'un sujet chaudement vêtu rentre dans le local, provenant d'un extérieur froid. La quantité d'eau évacuée par l'habitant vers l'ambiance est alors :

$$\dot{m}_h = \frac{E_{res}}{L} + f A_{DU} \frac{h_{cc}}{r T_a} (P_{cl} - P_a)$$

TABLEAU III Mouillure cutanée ω (%) compatible et incompatible avec le confort thermique				
Condition	Sujet dévêtu		Sujet vêtu	
	Confort	Inconfort	Confort	Inconfort
Repos ou activité légère ($M < 100$ W)	< 25	> 30	< 20	> 25
Travail ($M > 100$ W)	< 40	> 50	< 40	> 50

2.2.4 Estimation du confort thermique

Dans les ambiances froides, la *mouillure cutanée* reste constante : elle n'est pas un bon indice de l'inconfort au froid. En revanche, dans un environnement chaud et/ou humide, la mouillure est considérée par de nombreux auteurs [1] comme un indice physiologique du confort très important. Il a été montré par des expérimentations en chambre climatique que, à l'exercice, l'inconfort thermique est lié à l'intensité de la sudation.

Le *tableau III* [1] indique les valeurs de la mouillure cutanée (%) d'un individu dans quelques situations particulières.

Les résultats de nos simulations seront analysés suivant ces critères pour définir les situations acceptables.

2.3. Bilan de masse dans le local

Le bilan s'inspire des équations décrites par FAUCONNIER [6]. Le taux d'humidité relative dans le local est la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\dot{m}_a = \dot{m}_r - \dot{m}_{abs} + \dot{m}_s - \dot{m}_h$$

avec \dot{m}_a taux de variation de la masse d'eau contenue dans l'air de la pièce,

\dot{m}_h débit d'eau dû aux habitants,

\dot{m}_{abs} débit absorbé par le mobilier,

\dot{m}_r débit dû au renouvellement d'air,

\dot{m}_s débit des sources.

Soit :

$$\gamma \cdot \frac{P_s(T_a)}{r T_a} \frac{dRH_a}{dt} = Q \gamma \left[\frac{P_s(T_{ext})}{r T_{ext}} \frac{T_{ext}}{T_a} RH_{ext} - \frac{P_s(T_a)}{r T_a} RH_a \right] - \dot{m}_{abs} + \dot{m}_s + \dot{m}_h$$

avec γ volume de la pièce,

Q taux de renouvellement d'air.

Le terme T_{ext}/T_a traduit la variation de volume de l'air extérieur lorsqu'il passe à la température T_a .

Le bilan est schématisé sur la *figure 3*.

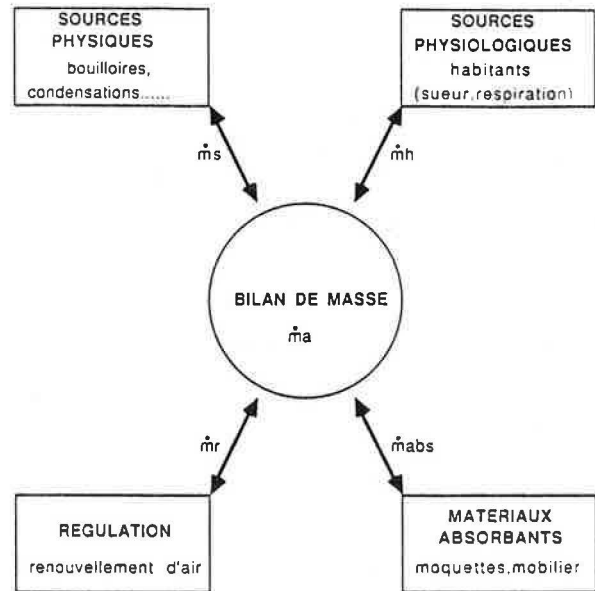


Fig. 3. — Bilan de masse dans le local

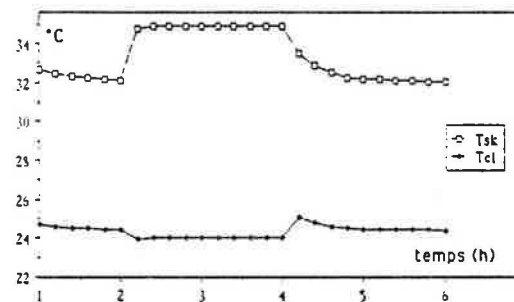


Fig. 4. — Températures dans un créneau d'activité

3. Résultats

Diverses situations ont été envisagées pour mettre en évidence l'effet de chaque élément du local, avec, pour source d'humidité, la transpiration d'un ou de plusieurs occupants. Pour diminuer le nombre de paramètres intervenant dans les calculs, on a supposé les points suivants :

— conditions extérieures fixes :
 $T_{ext} = 5$ °C ; $RH_{ext} = 90$ % ;

— local parfaitement régulé en température :
 $T_a = 19$ °C

$T_{fenêtre} = 12$ °C, soit une condensation dès que l'humidité relative du local dépasse 64 %,

$T_r = 18$ °C (température de rayonnement du local).

On a choisi le schéma-type suivant : dans un local de 30 ou 60 m³, un ou plusieurs sujets, vêtus, initialement au repos pendant 2 h ($M = 90$ W), se mettent à pédaler pendant 2 h ($M = 220$ W), avant de revenir au repos. Le renouvellement d'air est soit négligeable, soit fixe, soit assuré par une bouche hygro-réglable.

Les résultats sont analysés en considérant l'humidité relative du local et l'état physiologique du sujet. La *figure 4* donne l'évolution de la température de peau

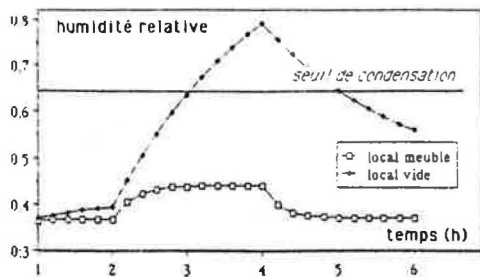


Fig. 5. — Influence du mobilier

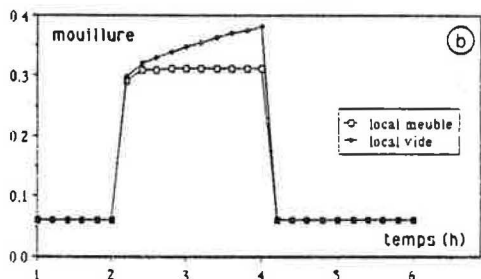
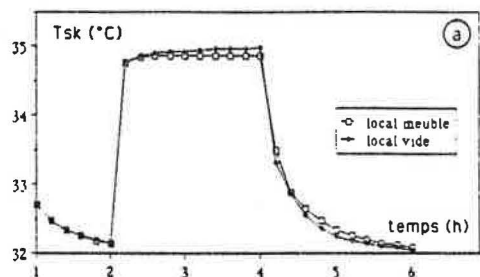


Fig. 6. — Influence des matériaux absorbants

T_{sk} et de vêtement T_{cl} dans une des configurations étudiées. Ces courbes sont valables, à quelques dixièmes de degré près, pour tous les cas présentés ici.

Le sujet en activité voit sa température de peau T_{sk} augmenter. Mais, avec les mouvements qu'il effectue dans cette période, sa vitesse relative par rapport à l'ambiance augmente, ainsi que les échanges convectifs vêtements-ambiance, ce qui entraîne une diminution temporaire de la température de surface des vêtements T_{cl} .

3.1. Influence du matériau absorbant

La figure 5 montre l'évolution de l'humidité relative dans un local de 30 m^3 , vide et lorsqu'il contient un ameublement absorbant (BIENFAIT, cf. [7]). Le renouvellement d'air est fixe ($0,5 \text{ vol/h}$). On constate que le matériau absorbant régule l'humidité : lorsque le sujet est en activité, l'humidité relative du local RH_a reste faible, ce qui autorise une plus grande évaporation de la sueur ; la température T_{sk} est donc légèrement inférieure à sa valeur en l'absence de mobilier (figure 6a). La mouillure de la peau est également diminuée (figure 6b) ; ainsi, lorsque l'occupant cesse son activité, la quantité d'eau résiduelle à évaporer est plus faible et la température de la peau T_{sk} , moins refroidie par l'évaporation, atteint une valeur supérieure à ce qu'elle est en l'absence de mobilier.

Avec le mobilier, durant toute la période d'activité, mouillure et température sont constantes, ce qui signifie que l'équilibre thermique est atteint. Sans mobilier, l'un et l'autre augmentent ; il y a *emballement thermique*.

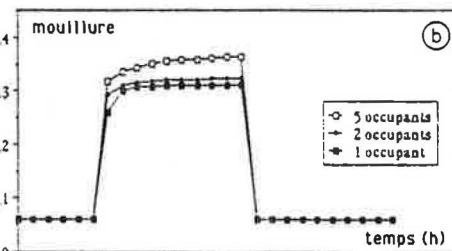
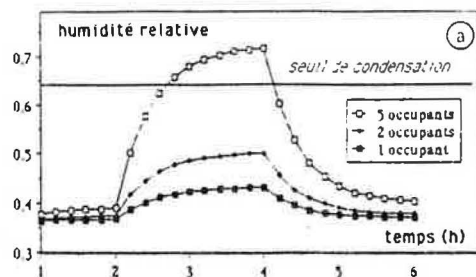


Fig. 7. — Influence du nombre d'occupants

En résumé, la présence du matériau absorbant, par son action régulatrice de l'humidité du local, tend à rendre celui-ci plus confortable (mouillure et température de peau plus faibles).

3.2. Influence du nombre d'occupants

Le local de 60 m^3 , meublé, est habité par 1, 2 ou 5 personnes effectuant le même créneau d'activité. Le renouvellement d'air est fixe ($0,5 \text{ vol/h}$). La figure 7a montre que l'humidité relative est sérieusement augmentée par l'activité des habitants supplémentaires. Les températures de peau sont légèrement modifiées ($-0,1 \text{ °C}$ pour 5 sujets).

Pour un faible taux d'occupation (1 ou 2 sujets), la mouillure atteint une valeur limite acceptable ($< 30\%$) (cf. tableau III). Lorsque le nombre d'habitants est plus élevé, la mouillure croît sans arrêt et dépasse les limites du confort (figure 7b). Il y a, dans ce cas, condensation d'eau sur la fenêtre.

3.3. Influence du mode de renouvellement d'air

Dans le local meublé (60 m^3) et habité par 5 sujets, on procède successivement aux situations suivantes :

- pas de renouvellement d'air,
- renouvellement d'air fixe ($0,5 \text{ vol/h}$),
- renouvellement d'air variant linéairement avec RH_a : $30 \text{ m}^3/\text{h}$ pour $RH < 35\%$, 45 m^3 pour $RH > 65\%$ (ces données correspondent à une bouche hygro-régulable du commerce).

Avec renouvellement d'air, l'air est plus sec (figure 8). Lors de l'effort, les calculs montrent qu'il n'y a pas de différences notables de la température de peau T_{sk} entre les divers cas, mais les sujets évaporent davantage si RH est plus faible. Après l'effort, les sujets sont mouillés et évaporent davantage dans un air plus sec. T_{sk} baisse donc plus rapidement dans le cas où le renouvellement est plus fort.

La figure 9 représente les variations du taux de renouvellement d'air Q au cours du temps.

Conclusion

La modélisation des échanges couplés de vapeur d'eau entre un local, ses habitants et les matériaux absorbants qu'il contient permet de mettre en évidence l'influence de divers facteurs :

— le *mobilier* apparaît comme un élément régulateur de l'humidité ambiante ;

— le *nombre des occupants* agit sur la sensation ressentie par chacun ; à température constante, l'humidité relative augmente dans des proportions importantes avec ce nombre, même avec un fort renouvellement d'air, détériorant les possibilités de régulation par évaporation des habitants ; la mouillure, qui est un bon indice de l'inconfort chaud, dépasse rapidement les limites admissibles ; il est à noter que, si l'air extérieur est plus chaud (donc pouvant être plus humide), la limite de l'inconfort sera plus vite atteinte ;

— le *mode de renouvellement*, quand il existe, change peu le taux d'humidité du local, mais conditionne le coût énergétique du renouvellement d'air.

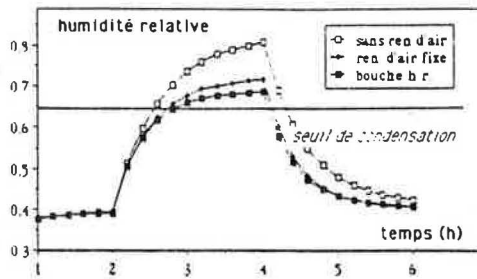


Fig. 8. — Influence du type de renouvellement d'air

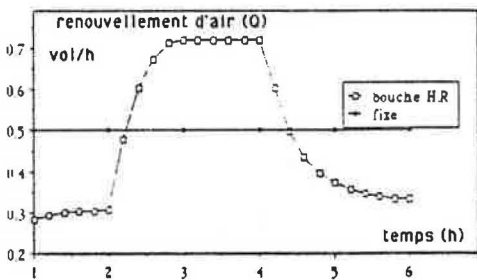


Fig. 9. — Renouvellement d'air par bouche hygroréglable

Dans la mesure où T_a est régulée parfaitement à 19 °C, la consommation énergétique ΔE due au renouvellement d'air est directement liée au taux de celui-ci :

$$\Delta E \propto \int Q dt$$

et les surfaces limitées par Q sur la figure 9 sont proportionnelles à cette consommation.

L'observation des figures 8 et 9 permet de constater successivement que l'utilisation de la bouche hygroréglable abaisse légèrement le taux d'humidité, donc améliore le confort et réduit de 20 % la consommation énergétique due au renouvellement d'air par rapport à un renouvellement fixe de 0.5 volume par heure.

3.4. Influence des vêtements

La plupart du temps, les variations d'humidité ou de température sont lentes et les vêtements ont seulement pour effet de limiter les transferts thermiques ou de vapeur d'eau de la peau du sujet vers le milieu ambiant [11]. Toutefois, lorsque l'habitant sort ou rentre dans le local, il subit une variation brutale d'ambiance, spécialement en hiver, où les conditions extérieures sont très différentes des conditions extérieures. Les vêtements sont alors le siège de forts phénomènes d'absorption ou de désorption. Ils font alors *effet tampon* et retardent la mise en équilibre de T_{sk} . Par exemple, en hiver, les vêtements chargés en humidité d'un individu provenant de l'extérieur sont le siège d'un phénomène d'évaporation, et leur réchauffement est retardé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] GALEOU (M.), GRIVEL (F.) et CANDAS (V.). — *Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Etude bibliographique. Rapport Contrat. Convention CNRS 509555/MULT/EDF/GDF, Strasbourg, 1989.*
- [2] Mc INTYRE (D.A.). — *Indoor climate*. Ap. S: Publ., 1980.
- [3] FANGER (P.O.) and BERGMUNCH (B.). — *Ventilation and body odor. Management of Atmosphere in Tightly Enclosed Spaces, Proc.*, 1983, p. 45.
- [4] SACADURA (J.F.). — *Initiation aux transferts thermiques*. Technique et Documentation, Paris, 1980.
- [5] CASSIE (A.B.D.). — *Regain of textiles and human atmosphere changes*. T. Trans., T.17, Feb. 1940.
- [6] FAUCONNIER (R.). — *Influence de l'humidité sur la consommation énergétique d'un bâtiment en chauffage discontinu*. Séminaire St-Rémy-Lès-Chevreuse, Proceedings, Ed. C.I.L.F., 1984, p.147.
- [7] FAUCONNIER (R.) et MARTINON (M.H.). — *Rapport FNB 1987*.
- [8] KLEIN (S.H.) and BECKMANN (W.A.). — *Ashrae Trans.*, Vol. 76, 1971.
- [9] GAGGE (A.P.), FOBELETS (A.P.) and BERGLUND (P.E.). — *A standard predictive index of human response to the thermal environment*. *Ashrae Trans.*, 92, 2, 1986.
- [10] FARNWORTH (B.). — *A numerical model of the combine diffusion of heat and water vapor through clothing*. *Textile Res.*, 5, 56, n° 11, 1986, p. 653.
- [11] CORDIER (A.), DERBEL (H.), MONCHOUX (F.), SERIN (G.) et THELLIER (F.). — *Influence du vêtement sur le confort thermique. Modélisation en régime dynamique*. JITH, Proceedings, Alger, 1989.

