

# Prise en compte du comportement adaptatif de l'être humain dans la simulation thermique de l'habitat

Françoise THELLIER\*, Françoise MONCHOUX, Mala ENDRAVADAN

Laboratoire P.H.A.S.E. Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement - EA 3028  
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne -31062 TOULOUSE Cedex 9 - FRANCE  
\*(auteur correspondant : thellier@cict.fr - (0)561.55.64.79 (sec : 65.33))

**Résumé** - Ce travail détaille les étapes qui ont permis la simulation d'un système de chauffage local régulé par l'être humain. Des études sur le terrain ont montré que le comportement adaptatif de l'être humain peut avoir un effet important sur la régulation du climat intérieur. En climat modéré, le chauffage d'un bâtiment entier n'est pas toujours indispensable, et l'utilisation d'un système de chauffage local qui crée une bulle de confort peut avoir un impact sur les consommations d'énergie. Notre approche des systèmes passe par l'étude des coûts énergétiques, mais aussi la qualification des ambiances en terme de sensations thermiques

## Nomenclature

P	puissance, W	<i>Symboles grecs</i>
S	sensation thermique	$\phi$ densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
t	temps, s	<i>Indices et exposants</i>
T	température, K	<i>sk</i> peau

## 1. Introduction

La baisse des consommations énergétiques est une demande forte actuellement, compte tenu de l'augmentation du coût des matières premières, et les enjeux politiques et socio-économiques sont dans les préoccupations de tous. Dans le domaine de l'habitat, les systèmes de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) sont de gros consommateurs d'énergie. La réduction de ces consommations passe, entre autres, par l'amélioration des systèmes HVAC, ou la baisse des températures de consigne, mais toutefois il faut garder en considération la demande de confort des occupants.

Notre approche est anthropocentrée, c'est-à-dire que l'analyse des systèmes vise non seulement à optimiser les besoins énergétiques, mais aussi à qualifier les ambiances et leurs impacts sur l'être humain.

## 2. La démarche adaptative

L'approche adaptative considère que les personnes jouent un rôle actif dans le maintien de leur confort thermique, c'est-à-dire que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins et de sa perception du climat [1]. Des études sur le terrain ont montré que ces comportements peuvent avoir un effet important sur l'acceptation ou la régulation des conditions thermiques, et par conséquent sur les consommations d'énergie [2] [3] [4].

Il est possible de distinguer trois catégories d'adaptation : les actions comportementales, l'acclimatation et l'accoutumance. Les deux dernières catégories citées sont du domaine de la psycho-physiologie et nos modèles ne les prennent pas en compte. Nous nous intéressons ici seulement aux réactions comportementales.

L'ajustement comportemental constitue un lien de rétroaction de l'homme envers son environnement thermique (Fig. 1). Dans le modèle adaptatif, ce qui était ordinairement

considéré comme la conséquence de l'équilibre thermique du corps humain menant à un jugement thermo-sensoriel, devient le point initial de la rétroaction.

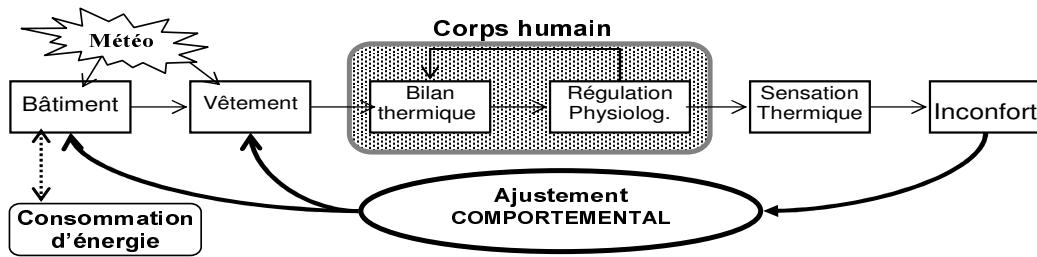


Figure 1: Boucle de rétroaction de l'ajustement comportemental (d'après [2])

Les actions peuvent être personnelles (modification de posture, vêtement, ...) ou technologiques (modification de température de consigne, ouverture des fenêtres, ...). Elles dépendent des occasions ou possibilités, ou, à l'inverse, des contraintes ou restrictions liées à l'environnement, comme par exemple [1] [2] :

- des spécificités du bâtiment lui-même ; fonctionnalité des fenêtres, distance entre occupants et ouvertures, disposition intérieure, etc.
- des caractéristiques énergétiques du bâtiment ; système de commande de la régulation individuelle ou globale, proximité des commandes du système, etc.
- des conditions d'organisation sociale : existence d'un code d'habillement, etc.

Notre objectif est de prendre en compte certains de ces comportements adaptatifs, dans la modélisation d'une enceinte habitée, afin d'en mieux comprendre l'impact. Une approche globale a déjà été faite, en considérant qu'en fonction de la sensation globale, calculée par l'indice PMV (Predicted Mean Vote), le sujet peut agir sur ses vêtements et/ou la température de consigne [5].

Pour aller plus loin, nous considérons ici une situation où le sujet agit sur son environnement proche. En demi saison, le chauffage d'un bâtiment entier n'est pas toujours indispensable, ou, en hiver, la température de consigne générale peut être abaissée. Pour maintenir malgré cela des conditions de confort thermique optimal pour les occupants la tendance actuelle est de développer des systèmes ponctuels grâce auxquels l'homme peut créer autour de lui une "bulle" de confort. L'individu qui utilise ce système doit alors pouvoir le réguler comme il le souhaite. Le travail présenté ici détaille les différentes étapes qui nous ont permis une première approche dans la modélisation de ces phénomènes.

### 3. Etudes expérimentales

Les études expérimentales ont été menées au Département d'Ingénierie Mécanique de l'université de Coimbra (Portugal), avec leur système de chauffage local (LHS-Local Heating System) de faible puissance. Ce LHS est une table équipée : (Fig. 2) d'un chauffe-pieds (25 W) et de deux panneaux fixés sous la table (133 W), qui peuvent être régulés indépendamment. Dix-huit essais ont été réalisés dans un bureau avec des sujets réels, pouvant réguler les trois panneaux selon leurs souhaits, sauf au cours de la première demi-heure où le LHS reste éteint [6].

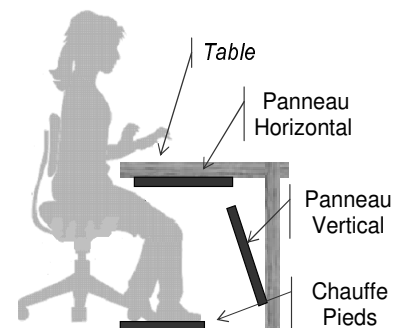


Figure 2 : Table équipée du LHS

Le dépouillement des résultats nous a permis d'appréhender le comportement des sujets vis-à-vis de la régulation des panneaux, afin de créer le modèle de régulateur comportemental local (LBR-Local Behavioural Regulator) à partir des sensations déclarées et des variables physiques mesurées.

## 4. Modélisation

### 4.1. Assemblage des modèles et simulation

L'ensemble de la simulation est faite dans le logiciel modulaire TRNSYS (Fig. 3). Certains des modules font partie de la bibliothèque de base du logiciel, par exemple celui du bâtiment, quand il est nécessaire. Les modules spécifiquement développés dans notre équipe sont décrits succinctement et nous nous attardons davantage sur le modèle de régulateur -LBR- développé dans le cadre de cette étude. Au cours des expériences nous avons constaté que le LHS a une forte inertie thermique, pour prendre en compte ce phénomène, nous avons développé un modèle simple de comportement thermique du LHS qui n'est pas décrit ici.

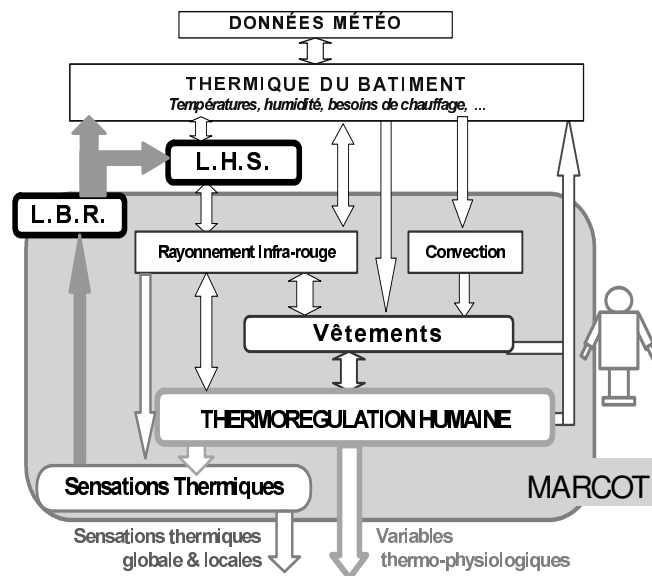


Figure 3 : Liens entre les divers modules

L'ensemble permettant de représenter le comportement thermique de l'être humain dans son environnement se nomme : MARCOT, il est composé d'un certain nombre de sous modèles [7][8] décrits ci-dessous :

- Le modèle de calcul des échanges radiatifs infra-rouge utilise les facteurs de Gebhart [9] pour déterminer les flux radiatifs nets échangés entre chaque surface. La géométrie de l'ensemble est décrite par un très grand nombre de surfaces, celles ayant les mêmes propriétés radiatives et températures sont ensuite regroupées.
- Les échanges convectifs locaux dépendent de l'activité du sujet et de la vitesse d'air locale sur chaque segment.
- Le module vêtement calcule de manière détaillée les transferts de masse et de chaleur à travers un milieu fibreux.
- Le modèle de thermorégulation humaine permet à tout instant de connaître l'état thermique du corps humain composé de 7 segments. Les entrées de ce module sont toutes les données physiques de l'environnement sur chaque segment. Elles proviennent des autres modules (température et humidité de l'air, flux, etc.). Les sorties sont les variables thermo-physiologiques locales des segments (températures de peau, eau produite, etc.), ainsi que des données globales (frissons, température centrale, etc.).
- Les sensations thermiques locales et globales sont calculées à partir des températures cutanées. Elles sont données sur une échelle en sept points, allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud), où 0 est la neutralité thermique (ni chaud, ni froid).

### 4.2. Le modèle de régulation comportementale locale (LBR)

Les réactions comportementales représentées correspondent aux actions que les sujets ont eues lors des expériences dans des locaux réels, c'est-à-dire des modifications des puissances des 3 panneaux du LHS. Dans un premier temps nous n'avons pas prévu d'actions locales sur les vêtements car, à l'heure actuelle, aucune étude suffisamment précise ne permet d'envisager la modélisation de tels comportements.

#### 4.2.1. Fonctionnement interne du LBR

Le LBR est basé sur les sensations thermiques locales qui sont des variables objectives, et non pas sur le confort déclaré comme cela semble être en réalité. En effet, la notion de confort comporte des implications psycho-sociologiques difficilement quantifiables. Il est apparu au cours des expériences que les actions des sujets sont liées aux sensations thermiques, mais aussi aux flux radiatifs échangés avec le LHS. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que le fonctionnement du LHS affecte très peu les parties supérieures du corps. Nous avons donc fait l'hypothèse que seules les variations qui interviennent sur les segments inférieurs poussent les sujets à agir sur les panneaux [10].

Les variables d'entrée du LBR (Fig. 4) sont les températures cutanées, les sensations des 7 segments et les densités de flux radiatifs sur les cuisses et les mollets. Les paramètres sont les puissances maximales ( $P_{Max}$ ) des panneaux et la commande on/off du LHS.

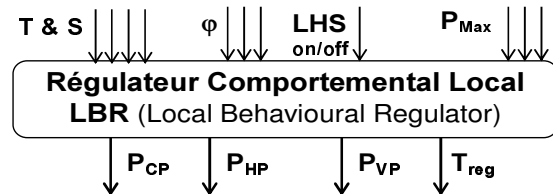


Figure 4 : Entrées-sorties du module LBR

Les sorties du module sont les puissances souhaitées des panneaux, et la température de régulation de l'ambiance. Ces actions vont rétroagir sur le LHS ou l'ambiance de la pièce.

Le Tableau 1 rassemble les causes et les actions comportementales prises en compte.

- Pour la sensation globale, on a défini 3 zones :
  - Deux zones de sensations extrêmes ; "très froid,  $S < -2$ " ou "très chaud,  $S > +2$ ", qui produisent de fortes variations sur l'ensemble des panneaux.  $P_{LHS} = P_{max}$  signifie que tous les panneaux fonctionnent à leur puissance maximale, et  $P_{LHS} = 0$ , tous sont éteints. Le LBR agit également sur la température de consigne du local ( $T_{reg}$ ) par pas de  $1.5^{\circ}C$ .
  - Une zone intermédiaire  $-2 \leq S \leq +2$  qui n'engendre pas de réaction globale. On considère alors que ce sont les sensations locales qui entraînent des réactions locales.
- Au niveau des sensations locales, nous avons utilisé les informations extraites des expériences, l'amplitude des actions dépend des sensations locales du bas du corps. Les variations de puissance sont classées de la façon suivante : petite (la puissance varie de 25 % de  $P_{max}$ ), moyenne (variation de 50 % de  $P_{max}$ ), forte (la puissance est mise au maximum ou au minimum).

Contrôle Global d'après la sensation globale								
Causes	$S_{globale}$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
		Très froid	Froid	Léger <sup>1</sup> Froid	Neutre	Léger <sup>1</sup> Chaud	Chaud	Très Chaud
Actions	$P_{LHS}$	$P_{max}$	Vérifier sensations locales					0
	$T_{reg}$	$T_{reg} \nearrow$	rien					$T_{reg} \searrow$

Contrôle du Chauffe pieds (CP) d'après la sensation sur les pieds								
Causes	$S_{pieds}$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Actions	$P_{CP}$	$P_{CP} = P_{max}$					$P_{CP} = 0$	

Contrôle des Panneaux Horizontal et Vertical d'après la sensation et les densités de flux sur les jambes								
Causes	$S_{jambes}$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	$P_{panneaux}$	+100%	+ 50%	+ 25 %	0	- 25 %	- 50 %	-100 %
Actions	$P_{HP}$	$P_{HP} \nearrow$	$P_{HP} \nearrow$	$ \varphi_{cuis}  \leq  \varphi_{mol}  \Rightarrow P_{HP} \nearrow$	rien	$ \varphi_{cuis}  >  \varphi_{mol}  \Rightarrow P_{HP} \searrow$	$P_{HP} = 0$	
	$P_{VP}$	$P_{VP} \nearrow$	$P_{VP} \nearrow$	$ \varphi_{cuis}  >  \varphi_{mol}  \Rightarrow P_{VP} \nearrow$		$ \varphi_{cuis}  \leq  \varphi_{mol}  \Rightarrow P_{VP} \searrow$	$P_{VP} = 0$	

Tableau 1 : Raisonnement de 'causes-actions' pour le fonctionnement du LBR

On remarque que le tableau n'est pas symétrique; le chauffe pieds (CP) fonctionne à puissance maximale, sauf si la sensation sur les pieds passe à chaud ou très chaud, auquel cas il est arrêté. Pour la régulation des panneaux fixés à la table, nous supposons que l'individu

réagit également en fonction des densités de flux radiatif échangés sur les cuisses et les mollets. Par exemple : si l'individu a une sensation "chaude" sur les jambes ( $S_{\text{jambes}}=+2$ ), il baisse la puissance du panneau horizontal ( $P_{\text{HP}}\searrow$ ) si la densité de flux sur les cuisses ( $\phi_{\text{cuiss}}$ ) est supérieure à celle sur les mollets ( $\phi_{\text{mol}}$ ) et dans le cas contraire, il agit sur le panneau vertical ( $P_{\text{VP}}\searrow$ ). Par contre, s'il a froid ( $S_{\text{jambes}}=-2$ ), il agit sur les 2 panneaux simultanément.

## 5. Résultats et commentaires

Les conditions de simulation correspondent à l'un des essais avec sujet réel. Le local n'est pas contrôlé en température et évolue lentement de 16,5 à 18,5°C au cours de l'expérience. Pendant les premières 30 minutes le LHS reste obligatoirement éteint. A ce moment-là, le sujet qui a froid, et dès qu'il peut il fait fonctionner les panneaux chauffants (Fig. 5).

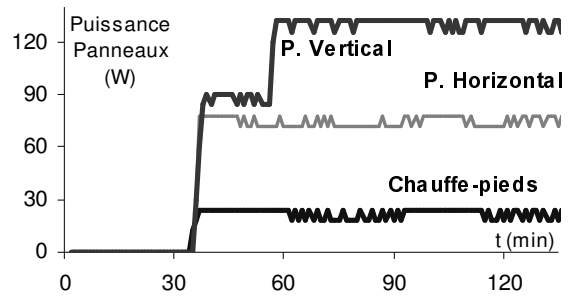


Figure 5 : Puissances des panneaux mesurées

Pour cette simulation, le local n'est pas modélisé et les conditions thermiques internes sont les variables mesurées dans le local (températures des murs, vitesse et température d'air). Les modèles MARCOT et LHS modélisent le sujet et la table chauffante. Les paramètres fixés sont ; l'activité métabolique (repos assis, 70 W.m<sup>-2</sup>), la tenue vestimentaire (tenue d'hiver) et les puissances maximales du LHS (133 W pour VP et HP et 25 W pour CP).

Le LBR augmente les puissances des panneaux de 25% à chaque pas de temps (5 mn) et par conséquent les puissances arrivent rapidement au maximum. Dans la réalité, il est probable que le sujet après avoir touché au régulateur, attende un instant avant d'intervenir à nouveau, ce phénomène n'a pas pu être mis en évidence lors des essais. Par ailleurs les panneaux ont une très forte inertie, ce qui entraîne que lorsque la puissance d'alimentation varie, il n'y a pas d'effet immédiat sur le sujet. Comme on le voit sur la figure 6, les densités de flux radiatif calculées sur le bas du corps évoluent très lentement et elles restent plus importantes sur les cuisses que sur les mollets, ce qui pousse le sujet à agir d'abord sur le panneau "vertical".

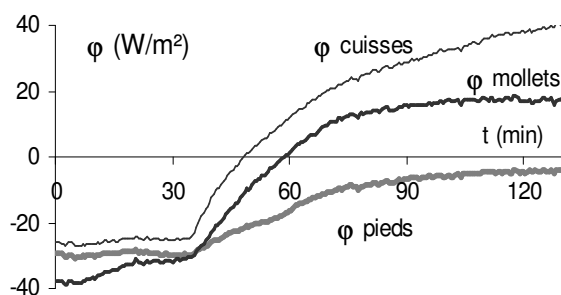


Figure 6 : Densités de flux radiatif calculées

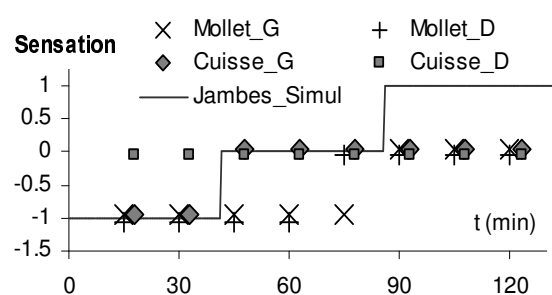


Figure 7 : Sensations réelles et simulées

La figure 7 montre les résultats comparés des sensations simulées et expérimentales. Il faut noter que, contrairement à l'expérience, le modèle MARCOT ne distingue pas "cuisse" de "mollet", et affiche "jambe" seulement. En outre, le pas de temps expérimental (15 mn) est différent de celui de la simulation (5 mn). Ceci explique en partie les écarts de 1 point, qui sont tout de même dans le domaine d'incertitude pour les sensations. Avant la mise en marche du LHS toutes les sensations sont négatives, grâce au chauffage local en fin d'exposition les sensations sont toutes positives ou nulles. Ceci montre clairement qu'avec une faible puissance (250 W) on peut permettre au sujet d'atteindre des conditions plus confortables sans avoir à chauffer tout le local.

Le couplage complet de l'ensemble (LHS, homme et bâtiment) reste à faire pour obtenir des conclusions plus définitives. Le problème actuel reste une incompatibilité, entre autre numérique, entre le pas de temps de simulation du bâtiment, de l'ordre de l'heure, et celui de l'être humain qui est beaucoup plus court (quelques minutes). Au point de vue énergétique, il apparaît toutefois que, si on donne aux occupants la possibilité de régler des panneaux rayonnants proches d'eux, on peut améliorer leur confort, sans avoir besoin de chauffer la pièce entière. Ceci semble être une voie intéressante pour des bâtiments à haute isolation thermique, car on peut alors envisager une réduction de la période de chauffage. On peut ajouter aussi le fait que l'occupant n'utilisera le LHS que s'il est présent dans le local et les économies d'énergie en seront d'autant plus importantes. Ce système a par ailleurs l'avantage d'être individualisé et donc peut permettre de répondre aux différences inter et intra individuelles à moindre coût énergétique tout en procurant le confort désiré par chaque personne.

## 6. Conclusion

Les résultats présentés ici restent préliminaires, mais montrent la possibilité et l'intérêt de développer des systèmes de chauffage locaux pour améliorer le confort et la consommation énergétique. Ils obligent à la prise en compte des comportements des utilisateurs. Les modèles de thermorégulation humaine et de comportement adaptatif, associés dans MARCOT par la sensation thermique, permettent de représenter les actions d'un sujet sur son environnement. Dans la réalité, l'ambiance intérieure est rarement totalement subie, elle est celle qui est désirée, ou du moins la meilleure qu'on puisse obtenir avec le degré de liberté qui est laissé à chacun. Connaissant comment l'habitant réagit, on peut alors évaluer la consommation énergétique réelle d'un bâtiment.

## Références

- [1] N. Baker, M. Standeven. A Behavioural Approach to Thermal Comfort Assessment in Naturally Ventilated Buildings. *Proc. CIBSE National Conference*, 76-84 (1995).
- [2] R. De Dear, G. Brager, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Technical Data Bulletin*, 14(1), 27-49 (1998).
- [3] F. Nicol, I. Raja. Thermal comfort, time and posture. *Eds. Oxford Brookes Univ.*, England (1996).
- [4] K. Van Der Linden, A. Boerstra, A. Raue, S. Kurvers. Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, 34, 737-744 (2002).
- [5] M. Endravadan, F. Thellier, J.P. Bedrune. Modelling of occupant-controlled global heating in buildings. *Proc. Windsor Conf. Post Occupancy Evaluation – Closing the Loop* (2004).
- [6] D. Quintela, A. Gaspar A. Raimundo. Development of local heating systems for thermal comfort and energy savings in buildings, *Proc. Int. Conf. UIE, Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisbonne, Portugal*, 209-217 (2000).
- [7] F. Thellier, A. Cordier, F. Monchoux. The analysis of thermal comfort requirement through the simulation of an occupied building. *Ergonomics* 37(5), 817-825 (1994).
- [8] G. Leduc, F. Thellier, F. Monchoux, A. Bardot. Human radiative exchanges in a complex enclosure Determination of active surface. *Int. J. of Heat and Technology*. 23(1), 47-53 (2005).
- [9] B. Gebhart, Heat Transfer, *Eds. Mc Graw-Hill, New York*, (1961).
- [10] M. Endravadan. Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine. Impact sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, (2006).

## Remerciements

Une partie de ce travail a été fait en collaboration avec ADAI du Département d'Ingénierie Mécanique (Université de Coimbra – Portugal), où les expériences ont été réalisées. Nous remercions toute l'équipe du Pr. D. Quintela et particulièrement A. Gaspar et A. Raimundo.