



HAL
open science

Effets du comportement humain sur le confort et la consommation d'énergie dans l'habitat climatisé

Mala Endravadan, Françoise Thellier, Françoise Monchoux

► To cite this version:

Mala Endravadan, Françoise Thellier, Françoise Monchoux. Effets du comportement humain sur le confort et la consommation d'énergie dans l'habitat climatisé. Conférence IBPSA, 2004, chambéry, France. hal-02175483

HAL Id: hal-02175483

<https://hal.science/hal-02175483>

Submitted on 5 Jul 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets du comportement humain sur le confort et la consommation d'énergie dans l'habitat climatisé.

Mala ENDRAVADAN*, Françoise THELLIER, Françoise MONCHOUX

Université Paul Sabatier, Laboratoire d'Energétique, 118 route de Narbonne,
31062 Toulouse, France.

Email: khatri_mala@yahoo.com*, thellier@cict.fr

RESUME

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de la régulation comportementale grâce à la création d'un modèle de régulateur représentant l'adaptabilité de l'être humain. La démarche adaptative prend en compte le fait que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de sa sensation thermique. Il agit sur les moyens mis à sa disposition, c'est-à-dire des ajustements personnels (modification des vêtements,.....) ou externes (mise en route de la climatisation,...). Les ajustements personnels jouent un rôle important car ils peuvent entraîner une modification de la température optimale de confort..

Il serait coûteux de faire des expériences sur les effets du comportement humain, par conséquent nous proposons d'étudier ce couplage numériquement. Un modèle de 'régulateur comportemental' ('Behavioural Regulator' (BR)) a été créé et inséré dans un logiciel de simulation des bâtiments (TRNSYS). Les ajustements faits par l'occupant dépendent de sa sensation thermique, calculée par le 'Predicted Mean Vote' (PMV) [i].

Les différents paramètres sont étudiés en conditions estivales dans le cas d'un bâtiment climatisé et non climatisé. Les résultats obtenus avec la régulation comportementale sont comparés avec d'autres types de régulation, la question est: Est-il possible d'avoir un confort acceptable et une consommation d'énergie minimale en donnant la possibilité à l'occupant de contrôler l'ambiance?

Mots clés: comportement humain, climatisation, démarche adaptative

INTRODUCTION

L'énergie utilisée pour le chauffage, la ventilation et la climatisation (HVAC) de l'environnement intérieur est déjà le plus grand secteur la consommation d'énergie dans la plupart des pays développés, aussi bien que dans les pays en voie de développement. C'est particulièrement vrai dans les régions tropicales d'Asie Pacifique qui se développent rapidement et où les styles de vie traditionnels dans les bâtiments non ventilés (NV) amènent à une confiance accrue dans la climatisation. Ceci change radicalement la manière de concevoir et de construire les bâtiments ainsi que les attentes des occupants.

On estime généralement que les personnes dans les pays économiquement développés passent au moins 80 % de leur temps à l'intérieur. La qualité de l'environnement intérieur a donc un impact significatif sur le confort et la santé. Pour maintenir la

qualité des conditions intérieures, les bâtiments sont conditionnés pour fournir un climat constant, uniforme et 'confortable' [ii]. En France, d'après la *Réglementation Thermique* [iii], les bureaux devraient être climatisés à 26 °C en été. Mais l'impact des comportements individuels doit être analysé c'est le sens du travail présenté.

LE DEMARCHE ADAPTATIVE

L'approche 'adaptative' prend en compte le comportement humain, c'est-à-dire qu'elle considère que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins. Il est possible de distinguer trois catégories d'adaptation : les actions comportementales, l'acclimatation et l'accoutumance. *L'adaptation comportementale* offre aux personnes la possibilité de jouer un rôle actif dans le maintien de leur propre confort [iv]. Donc si un individu n'est pas confortable, par exemple, s'il

a chaud – il peut utiliser une climatisation, adopter une posture plus confortable ou enlever un vêtement.

Le degré de réaction des occupants dépend fortement ‘des possibilités adaptatives’ comparées aux ‘contraintes’ ou aux restrictions, c’est-à-dire les moyens d’intervention qu’un bâtiment peut leur offrir [v]. Ceci peut provenir de :

- (a) une spécificité du bâtiment lui-même, comme la fonctionnalité des fenêtres, la distance entre les occupants et les fenêtres, la disposition intérieure (bureaux ouverts ou individuels).
- (b) les caractéristiques énergétiques du bâtiment, comme le système de commande de la climatisation – individuelle ou globale ; la proximité des différentes commandes du système.

(c) les conditions d’organisation sociale régnant dans les bâtiments, par exemple l’existence d’un code strict d’habillement ou des employés restant à leur poste de travail pour la journée entière [iv].

A l’inverse de ces occasions ou ces possibilités adaptatives (c’est à dire le manque de....), on définit des contraintes [v].

L’ajustement comportemental représente le lien de rétroaction le plus immédiat envers l’environnement thermique (Fig.1.). Ce qui pouvait avoir été précédemment considéré comme la conséquence dans le modèle statistique d’équilibre thermique (sensation d’inconfort) devient le point initial pour cette rétroaction dans le modèle adaptatif.

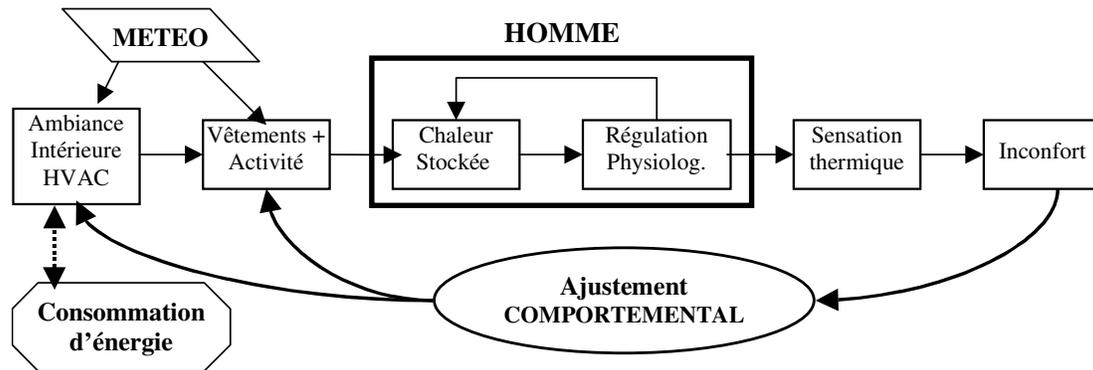


Figure 1: Boucle de rétroaction pour l’ajustement comportemental (modifiée par rapport à l’original: réf [ii])

REGULATEUR COMPORTEMENTAL

Description

L’objectif de cette étude est d’évaluer l’effet de la régulation comportementale par la création d’un modèle de régulation qui prend en compte l’adaptabilité de l’être humain en considérant qu’il peut agir sur son environnement en fonction de ses sensations thermiques.

Dans un habitat, l’homme agit sur les moyens mis à sa disposition, c’est-à-dire par des ajustements *personnels* (changement de posture, modification de vêtement, ...) ou *externes* (mise en route de la climatisation ou du chauffage, ouverture des fenêtres ...). On se concentre ici sur les deux principales modifications possibles: l’habillement (Icl) et la température de consigne du système de régulation (Treg). Ces deux variables sont les

valeurs de sortie du régulateur comportemental BR (*Behavioural Regulator*), qui vont alors rétro-agir sur le reste du système, entraînant alors des modifications dans le bilan thermique du bâtiment et/ou de l’homme lui même, comme le représente la Fig.1.

Dans un premier Icl et Treg ont été choisis car leurs effets sont différents, la première ayant un effet direct sur le confort, la deuxième influence directement les consommations d’énergie. Il faut noter que des campagnes d’études sur les d’autres possibilités de changement ont été faites, par exemple, l’adaptation de la posture, ainsi que l’ouverture des fenêtres ou des stores [vi], ces possibilités ne sont pour l’instant pas envisagées.

- ✓ **L’ajustement de la tenue vestimentaire:** est peut être le plus important de tous les ajustements de confort disponibles pour les

occupants de bureaux. Chacun d'eux a une température de confort différente de celle d'un autre parce qu'ils portent des vêtements différents. La vitesse d'évolution avec laquelle la température de confort peut changer, en réponse à une variation de température intérieure, dépend de la rapidité avec laquelle les gens adoptent des vêtements appropriés.

- ✓ **L'ajustement de la température de consigne:** Comme cela a déjà été remarqué, les modifications de la température de consigne du chauffage et de la climatisation modifient la consommation d'énergie. Donc, il peut être intéressant de voir, par rapport à un bâtiment non climatisé, les changements de confort dans un bâtiment climatisé (parce que dans ce cas le climat intérieur est découplé du climat extérieur). Est-ce que la climatisation en été peut être remplacée par d'autres moyens moins coûteux?

Niveau de confort et ajustements

Malgré toutes les discussions possibles sur les normes, le PMV/PPD a été utilisé. La définition du niveau de confort est basée sur la norme ISO 7730 [vii] – la valeur recommandée du PMV pour un confort optimal est comprise entre -0.5 (légèrement frais) et +0.5 (légèrement chaud) et le PPD maximum est de 10 %. A cause de variations physiologiques, les gens évaluent le climat de différentes manières. Par conséquent, même avec un PMV égal à zéro, 5 % d'une population a (très) chaud ou (très) froid ; 40 % a légèrement chaud ou froid et seulement 55 % des gens votent zéro (neutre). Cette 'zone neutre' couvre un écart de température de 4 à 5 °C [viii].

On suppose qu'une variation du PMV entre -0.5 et +0.5, ne cause en général pas de problème d'inconfort, mais pour une personne sensible cela peut être faux. Ce raisonnement nous a incité à partager la zone neutre en deux. Le contrôleur fonctionne alors de la façon suivante :

- Si les valeurs du PMV sont comprises entre -0.2 et +0.2 représentant la zone de confort optimal, aucun changement de vêtements et/ou de température de consigne n'est permis.
- Si le PMV est compris entre -0.2 et -0.5 ou entre +0.2 et +0.5, de petits changements d'habillement (± 0.1 clo) ou de la température de la régulation (± 0.5 °C) sont possibles. Ces

petits ajustements de vêtements consistent à – desserrer la cravate, relever les manches, enlever une écharpe, etc

- Quand les valeurs du PMV sont au dessus de -0.5 ou +0.5, de plus grands ajustements sont permis. Par exemple, un vêtement entier peut être enlevé ou ajouté (± 0.25 clo en hiver ou ± 0.20 clo en été) ou bien la température de consigne est augmentée/diminuée de 1.5 °C.

Modes de fonctionnement

Plusieurs modes de fonctionnement sont possibles pour prendre en compte les différents comportements humains. Les modes sont les suivants:

- V - ajustement des vêtements uniquement
- T - ajustement de la température de consigne uniquement
- V--T - l'occupant change ses vêtements avant de toucher le thermostat
- T--V - l'ajustement du régulateur précède celui des vêtements
- VT - les deux ajustements sont possibles simultanément.

Dans les résultats présentés ici, l'accent sera mis sur le mode V--T. On notera que chaque matin, l'isolation vestimentaire et la température de consigne sont initialisés à leurs valeurs standard. En conditions estivales, ces valeurs sont 0.5 clo et 26 °C.

SIMULATIONS ET RESULTATS

Description du bâtiment

Une simple cellule correspondant à un bureau a été créée dans TRNSYS [ix]. Les dimensions de la cellule sont données Fig.2a, le volume est de 50 m³. La fenêtre (3.5 m²) est sur le mur Est. Les murs se composent de briques appelées monomur (Fig. 2b), dont le coefficient de transmittance thermique est $U = 0.45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Les murs de la cellule ont une inertie thermique élevée (noté HWB ou H dans les graphes).

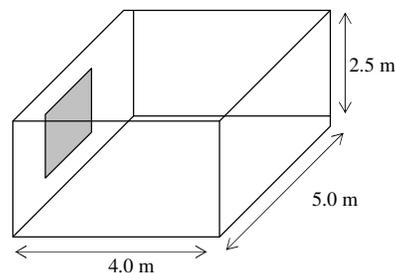


Fig. 2a Dimensions du bureau dans les simulations.

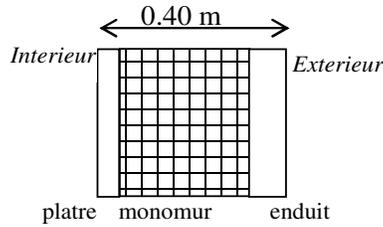


Fig. 2b Composition du mur de forte inertie.

La ventilation dans la zone est maintenue constante à un taux de 0.5 vol/h et la vitesse d'air est supposée être de 0.1 m s⁻¹. Il n'y a aucun gain interne et aucun changement d'ouverture ou fermeture des fenêtres, stores ou volets.

Conditions de simulation

Les simulations sont réalisées dans le logiciel TRNSYS avec un pas de temps de une heure sur toute la saison estivale. Les résultats présentés correspondent à quatre journées chaudes représentatives. La météo d'Agen est représentée sur la Fig.3. : Température extérieure (Text), rayonnement solaire total horizontal (HSRAD).

La température moyenne est de 24.7 °C, mais peut monter jusqu'à un 35 °C.

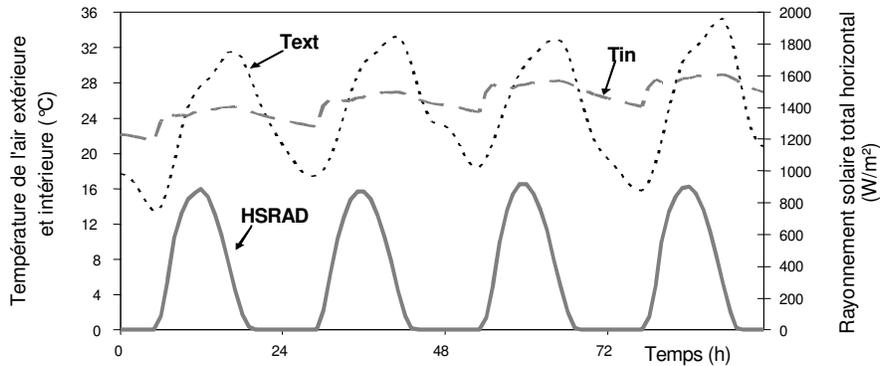


Figure 3: Conditions météorologiques d'Agen

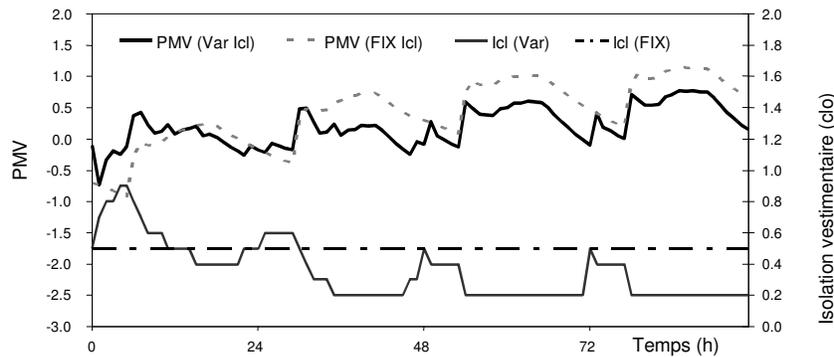


Figure 4: Variations du PMV avec habillage fixe (FIX) et habillage ajustable (Var) (bâtiment de forte inertie)

Deux types de ventilation sont analysés bâtiment non climatisé (ou naturellement ventilé - NV) d'une part, et bâtiment climatisé d'autre part, dans ce cas le régulateur BR marche dans le mode V--T, donc l'occupant peut changer ses vêtements (Icl) puis il touche la température de consigne (Treg).

L'occupant a une activité de bureau (métabolisme de 70 W m⁻²) et l'isolation des vêtements est de 0.5 clo.

Bâtiment non climatisé

La courbe de température de l'air intérieur (Tin) est aussi présentée sur la Fig. 3. Les moyennes de Tin et de la température des parois intérieures pendant les quatre jours sont de 26 °C (δ=1.9). La Fig. 4 montre les variations du PMV lorsque l'habillement est fixe (0.5 clo) et lorsque les ajustements d'habillement sont possibles.

On voit que pour les troisième et quatrième jours que la valeur du PMV pendant le moment le plus chaud de la journée dépasse 1.0 quand le vêtement est fixé. La valeur est réduite à 0.4 lorsque l'individu décide de faire des ajustements.

Cette réduction est significative, et entraîne une amélioration du confort. Le PPD global est réduit de 14.5 % ($\delta = 8.8$) à 7.9 % ($\delta = 3.7$). Pendant trois jours sur quatre, on constate que s'il y a une 'possibilité adaptative', l'individu préfère diminuer l'isolation à 0.2 clo au lieu de garder de 0.5 clo. Dans les bâtiments NV le taux de renouvellement d'air par heure (ACH) et donc la vitesse d'air peuvent jouer un rôle important sur la sensation thermique de l'individu. Par exemple, en utilisant une simple logique linéaire, pour simuler d'autres conditions de ventilation - avec ACH=1.0 vol/h, $v=0.5 \text{ m s}^{-1}$ et ACH=2.0 vol/h, $v=1.0 \text{ m s}^{-1}$; les résultats obtenus pendant une journée la plus chaude (jour 3) sont montrés sur les Fig. 5 et Fig. 6. Un ACH=2.0 vol/h permet à la température intérieure de tomber autour de 23.7 °C pendant la nuit; ce qui entraîne un PMV de -0.1. L'après-midi autour de 15 h,

quand la Text est maximale, l'air extérieur qui est chaud rentre dans le bâtiment et augmente T_{in} . C'est la seule fois où $T_{in}(ACH=2.0)$ dépasse légèrement $T_{in}(ACH=0.5 \text{ ou } 1.0 \text{ vol/h})$ pendant quelques heures. Avec ACH=1.0 ou 2.0 vol/h, la valeur du PMV est inférieure de 0.4 par rapport au PMV obtenu avec ACH=0.5.

La Fig. 6 montrent l'évolution de la tenue vestimentaire pour la même journée dans les mêmes conditions, les valeurs moyennes sont également indiquées. Il est normal que pendant la nuit, quand les vitesses d'air augmentent, l'individu se couvre davantage, et pendant la journée un peu moins d'isolation est utilisée. Pour les conditions calmes ($v=0.1 \text{ m/s}$), mises à part quelques heures tôt le matin, pendant la plupart de la journée l'isolation des vêtements est de 0.2 clo bien que le PMV soit élevé, ceci correspond à la valeur minimale de la tenue.

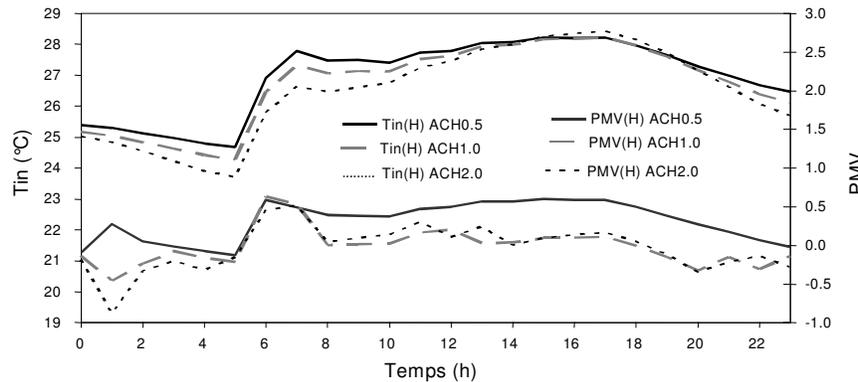


Figure 5: Variations de T_{in} et PMV pour une journée chaude avec 3 taux de renouvellement d'air

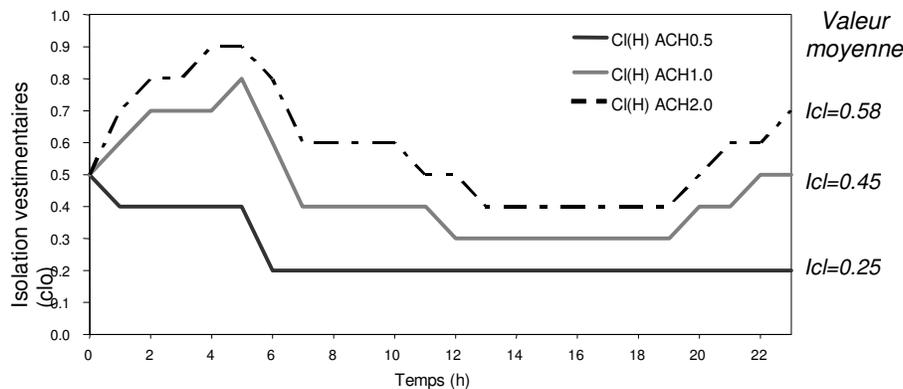


Figure 6: Variations d'isolation vestimentaire pour une journée chaude avec différents taux de renouvellement d'air.

Bâtiment climatisé

Le système de régulation est basé sur la température d'air intérieur, le contrôleur a une bande morte de $\pm 0.5 \text{ °C}$. Une puissance de refroidissement de 0.36 kW est assurée quand nécessaire. La température de régulation est

déterminée par un régulateur fixe ou un régulateur comportemental (BR).

Pour le régulateur fixe, la température est de 24,5 °C selon les recommandations de l'ISO 7730 [vi]. Pour le BR la température est fixée à 26 °C chaque matin selon la réglementation française.

Sur les figures 7 et 8 les variations de la température de régulation (T_{reg}), la température d'air intérieur (T_{in}), le signal de fonctionnement de la climatisation (CP), l'isolation vestimentaire (I_{cl}) sont présentés. Le pic du matin observé sur le PMV, dans les deux cas, est dû à l'augmentation des températures intérieures de l'air et des murs en réponse au rayonnement solaire.

Dans le cas de la régulation fixe (Fig.7), la T_{in} moyenne est de 24.2 °C, le PPD moyen obtenu pour cette période est de 6.5 % ($\delta=3.5$).

Pour le cas du BR (Fig. 8) la température de l'air intérieur est autour de 25 °C alors que la température de régulation reste à 26 °C, bien qu'elle puisse être modifiée. Le niveau de PMV indique que l'ambiance est confortable la plupart du temps, le PPD obtenu est de 6.0 % ($\delta=1.8$). Il faut noter que dans ce cas, à confort égal la température de consigne est plus élevée, par conséquent la climatisation fonctionne moins souvent conduisant à des économies d'énergie.

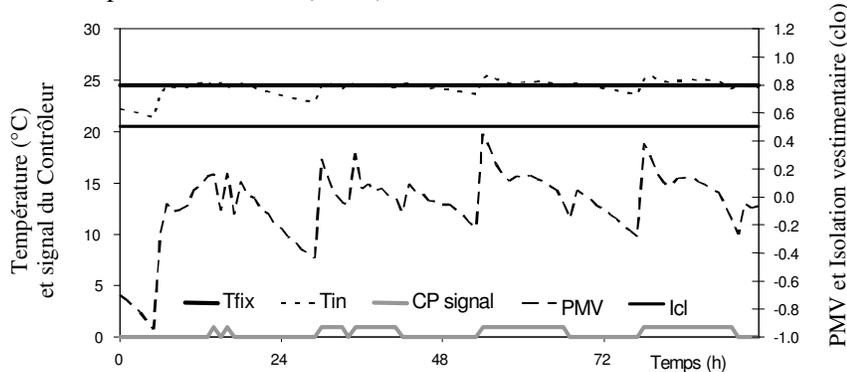


Figure 7: Les variables pour un système contrôlé par un régulateur fixe.

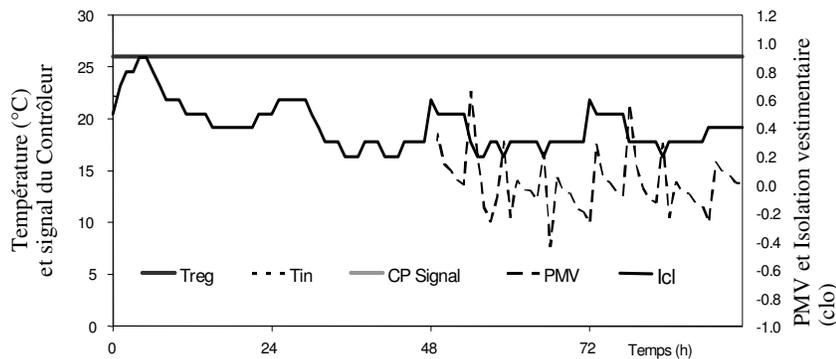


Figure 8: Les variables pour un système contrôlé par un régulateur comportemental

DISCUSSION

Sur le terrain, même si c'est faisable, il est difficile de demander aux gens à chaque heure quel est leur état de confort, quel état de confort ils souhaiteraient et aussi les changements d'habillement qu'ils ont faits dans la dernière heure, etc. Donc, une des raisons de cette étude était de créer un modèle représentatif des comportements humains.

Pour être confortable, l'option la plus commune disponible pour un occupant est l'ajustement vestimentaire. Les simulations montrent que dans le cas étudié pour améliorer son confort l'homme abaisse sa tenue moyenne,

0.35 clo pour le cas NV et 0.41 pour le cas climatisé avec BR, contrairement à la base de calcul qui est fixée (ISO 7730) à 0.5 clo en été .

Un compteur d'habillement a été mis en place pour déterminer le nombre de fois où l'individu ajuste son habillement. Sur les 4 jours on enregistre 32 changements dans le cas du BR (Fig. 8), alors que 19 changements sont observés dans le cas non climatisé (Fig. 4), de plus ce nombre varie avec le taux de renouvellement d'air (Fig. 6).

Dans le cas du local climatisé régulé par le BR il y a un nombre plus important de changements bien que l'environnement climatisé soit assez stable. Ce nombre plus

élevé, environ 1 changement toutes les 3 heures, est du aux limites de ± 0.2 du PMV. On peut considérer qu'il s'agit d'un individu assez exigeant qui n'hésite pas à changer sa tenue vestimentaire pour optimiser son confort.

L'occupant peut changer sa tenue jusqu'à un niveau minimum d'habillement (Fig. 6 cas ACH=0.5). Ceci signifie qu'être confortable en modifiant les vêtements est limité dans des situations extrêmes, par exemple, pendant une canicule. Par conséquent, l'avantage d'un BR serait de donner aux individus une deuxième option pour améliorer leur propre confort en modifiant la température intérieure.

Dans le cas où l'habillement est fixé à 0.5 clo la température de consigne doit être de 24.5 °C en respect des recommandations ISO. Le PPD moyen est alors de 6.5 % et la consommation d'énergie est de 14.4 kWh pour les 4 jours. Si on permet des modifications de la tenue vestimentaire, avec une régulation en température fixée au départ à 26 °C, l'homme choisit d'abord de baisser l'isolement vestimentaire en moyenne jusqu'à 0.35 clo. La consommation est nettement plus faible ; 8.5 kWh, tout en gardant un confort tout à fait acceptable puisque le PPD moyen est de 6 %.

On peut noter que même si le BR n'en tient pas compte directement, dans le cas d'un bâtiment non climatisé, l'augmentation du taux de renouvellement d'air et par conséquent de la vitesse d'air permet d'améliorer nettement le confort sans arriver à une tenue vestimentaire minimale.

Le point à souligner ici est que, si on laisse à l'homme des possibilités adaptatives, les économies d'énergie sur toute la saison pourront être importantes. Des résultats comparables ont été obtenus en conditions d'hiver pour le chauffage.

CONCLUSION

Les bâtiments doivent être conçus dans le respect des cibles de la Qualité Environnementale des Bâtiments. Economies d'énergie et confort optimal sont des objectifs contradictoires ou antagonistes. La modélisation du comportement des occupants aidera à trouver les solutions optimales.

Le modèle de régulation adaptatif présenté ici est une aide pour atteindre cet objectif, en évaluant l'impact d'un certain type d'actions sur les consommations énergétiques

pour la mise en pratique de comportements judicieux. Les contraintes sociales, les codes d'habillement peuvent être intégrés et conduire à des règles d'utilisation qui rendront les bâtiments plus économes en énergie. L'éducation des occupants et l'analyse socio-économique des bâtiments pourront désormais s'appuyer plus clairement sur les résultats des simulations thermiques.

REFERENCES

- [i] P. O. FANGER, Thermal comfort. McGraw Book Hill Co., USA, 1970.
- [ii] R. J. De DEAR, G. S. BRAGER, et D. COOPER, "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference". Final Report, ASHRAE RP-884, 1997.
- [iii] RT 2000. Réglementation Thermique. France, 2000.
- [iv] R. J. De DEAR et G. S. BRAGER, "Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference". ASHRAE Technical Data Bulletin, Vol.14, No.1, pp 27-49, 1998.
- [v] N. BAKER et M. STANDEVEN. "A Behavioural Approach to Thermal Comfort Assessment in Naturally Ventilated Buildings". Proceedings from CIBSE National Conference, Ch 76-84, 1995.
- [vi] J. F. NICOL et I. A. RAJA. Thermal comfort, time and posture. Oxford Brookes University, England, 1996.
- [vii] ISO 7730. "Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort". International Organisation for Standardisation, Geneva, 1994.
- [viii] VAN der LINDEN, A.C. BOERSTRA, A. K. RAUE, et S. R. KURVERS, "Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response". Energy and Buildings, Vol.34, pp 737-744, 2002.
- [ix] TRNSYS, "A Transient System Simulation Program". Reference Manual (version 15), Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, USA, 2000.
- [x] M. ENDRAVADAN, F. THELLIER et J. P. BEDRUNE. "Modelling of occupant-controlled global heating in buildings". Post Occupancy Evaluation – Closing the Loop, Windsor Conference, 2004.