



HAL
open science

Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant !

Françoise Thellier, Jean-pierre Bedrune, Françoise Monchoux

► **To cite this version:**

Françoise Thellier, Jean-pierre Bedrune, Françoise Monchoux. Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant!. La Revue 3E.I, 2012. hal-02001574

HAL Id: hal-02001574

<https://hal.science/hal-02001574>

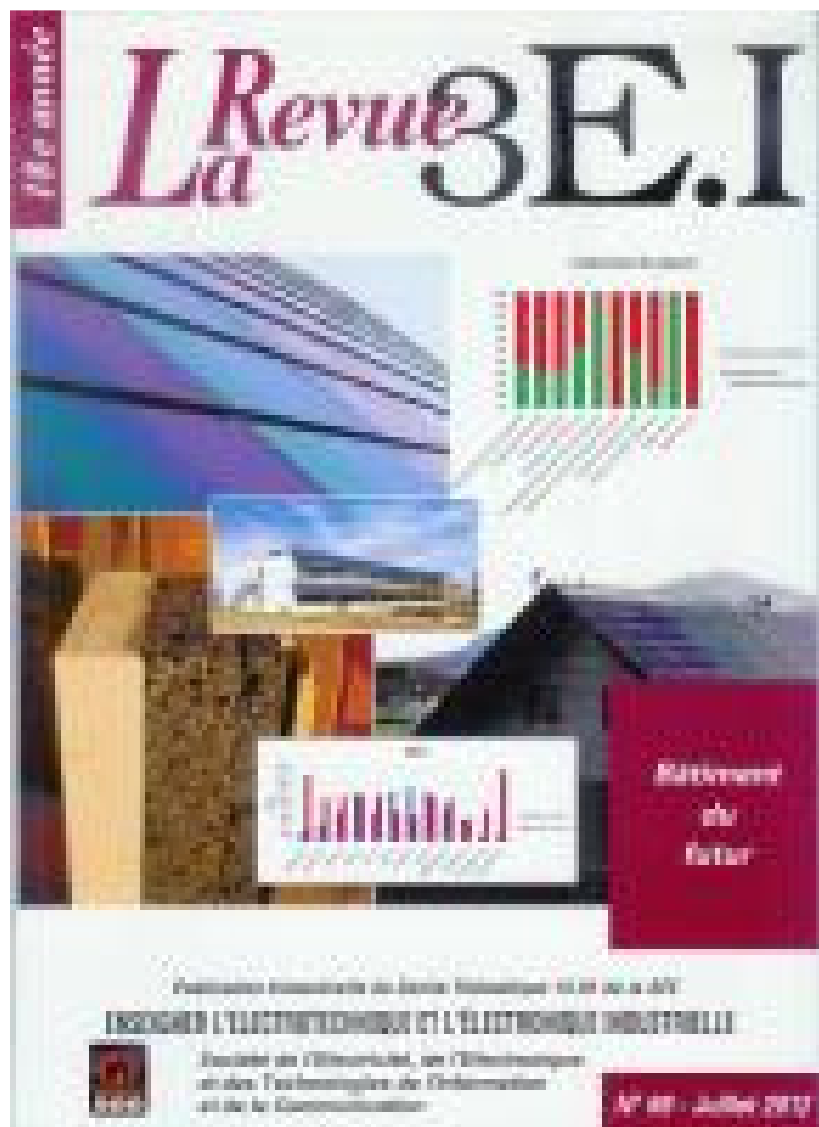
Submitted on 31 Jan 2019

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.

La Revue 3E.I

N° 69 spécial BATIMENT DU FUTUR





La Revue 3EI

publication trimestrielle
du Cercle Thématique 13-01
de la SEE

SOCIETE de l'ELECTRICITE, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16
Tél : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

La Revue 3EI, Édition SEE,
17 rue de l'Amiral Hamelin
75783 PARIS Cedex 16

Directeur de la publication
Paul FRIEDEL
Président de la SEE

Rédactrice en Chef
Marie Michèle LE BIHAN

Adresser les propositions d'article à :
revue3ei.art@voila.fr

Communication
Micheline BERTAUX
communication@see.asso.fr
01 56 90 37 17

publicité au rapport

Abonnement (4 numéros par an)
Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2012.

tarifs TTC :

Individuel :

France et CEE.....39 €
Pays hors CEE.....49 €

Collectivités

France et CEE.....55 €
Pays hors CEE.....68 €

Réalisation et impression
Repro-Systemes

23, rue de Verdun 77181 Le Pin

Routage et Expédition
Départ Presse
ZI les Richardets
93966 Noisy le Grand

Dépôt Légal : Juillet 2012

Commission Paritaire 1212 G 78028
ISSN 1252-770X

Sommaire du n° 69

Thème : Bâtiment du futur

- p. 2 *Éditorial,*
- p. 3 *Publications, Informations,*
- p. 7 *Introduction journées EEA thème : "Bâtiment - Energie : quelles contributions du génie électrique ?*
M. RUELLAN
- p. 8 *La Maison Z.E.N*
A. RICAUD, I. LOKHAT CYTHELIA, 350 route de la Traverse 73000 MONTAGNOLE
- p. 13 *Programme HOMES : une gestion intelligente de l'énergie dans les bâtiments*
V. BOUTIN SCHNEIDER ELECTRIC
- p. 18 *De la passoire thermique aux ilots à énergie positive, un aperçu des défis à relever par les acteurs de la filière électrique*
JC. VISIER Université Paris Est MARNE LA VALLEE
- p. 22 *Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant !*
F. THELLIER*, F. MONCHOUX, J-P. BEDRUNE TOULOUSE
- p. 31 *Causes de pertes dans le calcul des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau*
F. BARRUEL et al. CEA-INES LE BOURGET DU LAC
- p. 39 *Impacts environnementaux de batiments : Comparaison du poids respectif des équipements techniques et du bâti*
L. FLOISSAC, L. FELIX, G. MILESI, H. VALKHOFF LRA TOULOUSE

Hors Thème

- p. 47 *Comptage d'énergie sur une pompe à chaleur*
G. LEGUERN, S. GRENAILLE VILLIERS SAINT FREDERIC
- p. 54 *Mieux connaître sa consommation électrique*
M. OURY, (MOIRAN 38430) G. AUBERT (VERSAILLES)
- p. 60 *L'électricité pas toujours maîtrisée*
L. SIMONOT POITIERS
- p. 69 *La technologie Lithium-ion*
A. CHAGNES ENSCP-LECIME PARIS
- p. 73 *Mesure d'énergie et de quantité d'électricité*
G. HERAULT CACHAN
- p. 791 *Développement d'un modèle de panneau photovoltaïque sous Psim*
JM ROUSSEL, T AUBRY IUT de l'Indre, CHATEAUROUX

Et Demain ?

- p. 85 *Et demain ? Tour d'horizon des avancées technologiques*

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées.

Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

Comme vous le savez, les questions du développement durable et de la gestion de l'énergie orientent considérablement de nos jours les réflexions sur le « **Bâtiment du futur** », thème de ce numéro.

Vous trouverez ainsi les articles des entreprises **Schneider Electric** et **Cythélia**, qui n'ont pas hésité à nous exposer leurs projets et réalisations et nous les en remercions. Vous trouverez également le fruit d'une collaboration avec le Club EEA (Club des enseignants et chercheurs en Electronique, Electrotechnique et Automatique) sous la forme de quatre articles issus des journées électrotechnique du mois de mars dernier :

- « de la passoire thermique aux îlots à énergie positive, un aperçu des défis à relever pour les acteurs de la filière électrique » (J.-C. Visier),
- « le confort dans le bâtiment: n'oublions pas l'habitant ! » (F. Tellier, F. Monchoux et J.P. Debrune),
- « impacts environnementaux de bâtiments : comparaison du poids respectif des équipements techniques et du bâti » (L. Floissac, L. Felix, G. Milesi et H. Valkhoff),
- « causes de pertes dans le calcul des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau » (F. Barruel).

Nous laisserons à **Marie Ruellan** le soin de les introduire.

Un grand merci à **Arnaud Brugier** qui a piloté ce travail autour du thème : la richesse de ce dernier va réjouir tous les collègues qui doivent développer de nouvelles activités pour leurs élèves, dans le cadre des réformes des baccalauréats STIDD et Ssi et de certaines STS.

Dans la **partie hors thème**, plusieurs articles à caractère pédagogique, dont deux exploitations pour le lycée, touchent à un sujet connexe au thème : la mesure de la consommation d'énergie. La modélisation de modules photovoltaïques sous PSIM, la technologie Lithium – Ion pour le stockage de l'énergie et une réflexion sur les difficultés de la compréhension des lois de l'électricité viennent les compléter.

La rubrique « **Et demain ?...** » a pour centre d'intérêt les éoliennes ce trimestre.

Il n'y a pas d'article dans la rubrique Histoire des Sciences dans ce numéro. Nous sollicitons donc votre participation pour que des propositions permettent d'alimenter cette rubrique très prochainement.

Après le dernier numéro de cette année en Octobre 2012, **Pratiques pédagogiques**, de nouveaux thèmes seront abordés en 2013 : Biologie et EEA, Enseignement à l'Etranger....

Un support numérique des **archives de la Revue 3EI** des quinze premières années (60 numéros au format « .pdf ») est en préparation et sera bientôt disponible à la commande.

Continuez à nous envoyer des articles à vocation pédagogique : fiches de TP, TD, cours, présentation de projets... Nous sommes toujours très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire et nous serons heureux de les recueillir dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est revue3ei.art@voila.fr

Bonne lecture à toutes et tous.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

Nous comptons sur vous pour faire connaître notre revue afin d'assurer sa pérennité.

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Pascal LOOS

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL

Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant !

Françoise THELLIER*, Françoise MONCHOUX, Jean-Pierre BEDRUNE

Université Toulouse 3 - Paul Sabatier Laboratoire PHASE - EA 3028 - Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement Bat. 3 R1 B2 - 118, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex 9 - FRANCE

*Tel : (33) (0)561.55.64.79 francoise.thellier@univ-tlse3.fr <http://phase.ups-tlse.fr/>

Résumé : *Les crises de l'énergie successives ont conduit à des dispositions et des réglementations destinées à réduire les consommations. Leurs efficacités ont été démontrées et l'effort se poursuit régulièrement. Cela donne des bâtiments thermiquement très isolés, et théoriquement peu consommateurs. On constate toutefois que les bâtiments habités normalement présentent des performances dégradées par rapport aux prévisions. Le travail présenté ici décrit les phénomènes et les outils mis en œuvre pour caractériser le couplage entre l'habitant et le bâtiment et pour la prise en compte du ressenti humain. On amorce la réflexion quant au rôle que les disciplines de l'EEA pourraient jouer dans cet enjeu : procurer le confort à l'habitant tout en limitant les consommations énergétiques.*

I INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'être humain n'a eu de cesse de développer des stratégies et des techniques pour se protéger des agressions climatiques. L'Habitat et la Thermique sont les plus anciennes préoccupations de l'Homme, sa première grande découverte, « le feu » en est la preuve. Depuis toujours, l'amélioration de la qualité de vie a été le moteur essentiel d'une partie des grandes découvertes.

L'être humain est un homéotherme, c'est-à-dire que pour assurer ses fonctions vitales, il doit maintenir sa température interne à $(37,0 \pm 0,5)$ °C sur une planète dont la température peut varier globalement de -50 à +50 °C.

L'homme produit de la chaleur interne suite aux réactions chimiques de transformation des aliments. C'est ce qu'on nomme le métabolisme, qui dépend entre autre de l'activité physique. Cette chaleur doit être évacuée dans l'environnement afin de maintenir l'équilibre thermique et donc la température interne constante [1].

Pour un homme nu au repos la « température idéale » à proximité de la peau est aux alentours de 29°C. Par conséquent, il a développé divers niveaux de protection successifs pour maintenir cette température quelles que soient les conditions climatiques terrestres. Tout d'abord, il possède un système de thermorégulation physiologique très performant. Ensuite, la première couche de protection est le vêtement, et la deuxième l'habitat. En fonction des besoins et des conditions climatiques, il doit réguler ces systèmes de protection.

L'imbrication des divers niveaux de régulation est donc la condition de sa survie.

Le maintien de conditions « idéales » dans les bâtiments est très consommatrice d'énergie, ce qui est à l'origine d'une forte pollution [2]. Il est alors évident que pour réduire les consommations et les coûts il faut impérativement optimiser le système ce qui passe, entre autres exigences contradictoires, par une régulation qui minimise l'énergie utilisée tout en procurant des conditions de confort maximales. La crise de l'énergie et l'obligation de réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre, imposent que toutes les compétences soient réunies pour répondre à ces exigences.

En fait il faut voir les choses différemment. C'est l'habitant qui est très consommateur d'énergie, via les systèmes qu'il a développés pour répondre à ses exigences de qualité de vie. De même, l'augmentation de la pollution et la disparition des combustibles fossiles ne mettent que très peu en danger la planète, mais elles compromettent la survie de l'homme dans les conditions qu'il connaît actuellement. C'est donc avec une vision anthropo-centrée qu'il faut amorcer la réflexion et tout particulièrement dans le domaine des sciences pour l'ingénieur [3].

Actuellement les problèmes énergétiques sont au devant de la scène, mais malheureusement on oublie trop souvent que l'objectif premier de tout habitat est de répondre aux besoins de l'habitant ! La tendance est souvent de croire qu'il suffit de diminuer les températures de consigne pour diminuer la facture énergétique, mais cette solution n'est pas acceptée, car

l'homme est hédoniste et cherche tout d'abord à maintenir ses conditions de vie préférées. Sur le terrain, on constate alors que le plus souvent, les thermostats sont réglés à 21°C alors que la réglementation les prévoit à 19°C.

L'Homme et l'Habitat sont deux systèmes thermiques complexes présentant quelques similarités. Dans un premier temps nous ferons une présentation simplifiée de leur bilan thermique et de leurs modes de régulation respectifs, avant d'aborder les interactions entre les deux.

II BILANS THERMIQUES : HOMME ET HABITAT :

Le bilan thermique d'un système s'écrit selon l'équation suivante (1). Elle régit l'évolution de sa température au cours du temps.

$$C \times \frac{dT}{dt} = Prod + \Phi_{in} - \Phi_{out} \quad (1)$$

C	Capacité thermique totale (J/°C)
T	Température moyenne du système (°C)
t	temps (s)
$Prod$	Puissance produite (W)
Φ	Flux de chaleur échangé (W)
	$in = entrant ; out = sortant$

A. Thermique du Corps humain

Pour rester en vie, l'Homme doit maintenir sa température centrale assez stable et autour de 37°C, pour cela il doit maintenir un bilan thermique équilibré (fig.1).

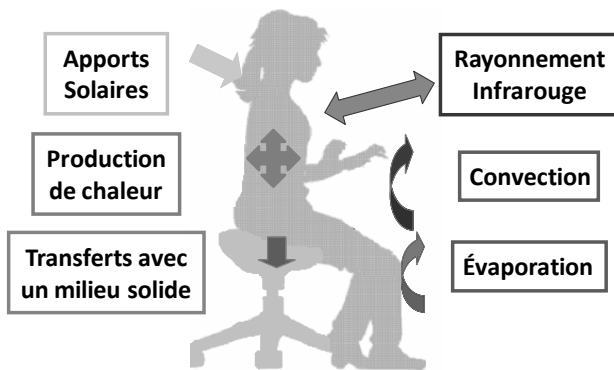


Figure. 1 : Transferts thermiques du corps humain

- **La puissance produite** (ou métabolisme, M , ou thermogénèse), dépend surtout de l'activité et peut varier de 70 à 900 W pour un adulte. Ce métabolisme peut également varier en fonction du système de régulation. Une partie de cette énergie, produite au centre du corps et dans les muscles, peut être transformée en travail mécanique (W). Le reste ou métabolisme net ($M_{net} = M - W$), doit être évacué sous forme de chaleur. Les transferts du centre vers la

périphérie du corps se font par conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine qui est régulée.

- **Les transferts thermiques** (ou thermolyse), entre le corps et l'environnement, se font par tous les mécanismes classiques de transferts, au niveau cutané et par les voies respiratoires [9, 12]. Les échanges notés * sont le plus souvent des pertes, mais peuvent devenir des apports en ambiance chaude.

- Rayonnement Solaire (Ray_{sol}).
- Evaporation ($Evap$) cutanée* et respiratoire.
- Convection ($Conv$) cutanée * et respiratoire.
- Rayonnement Infra rouge (Ray_{IR})*.
- Conduction avec un milieu solide ($Kond$)*.

- **Bilan thermique global du corps Humain**

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = M_{net} + Ray_{sol} - Evap \pm Conv \pm Ray_{IR} \pm Kond \quad (2)$$

Tous les transferts avec l'ambiance dépendent des variables physiques de l'ambiance : températures (T_{air}) et vitesses (V_{air}) d'air, températures des surfaces (T_{surf}), pression de vapeur ($P_{v,air}$) et rayonnement solaire.

Ces échanges dépendent aussi des données physiques de l'individu, essentiellement de surface, Température (T_{sk}) et mouillure (ω_{sk}) de la peau. Ils peuvent largement être modifiés par de la présence éventuelle de vêtements.

Pour garder un bilan thermique (2) équilibré, c'est-à-dire, (dT_h/dt) proche de 0, le corps humain dispose de réactions de thermorégulation, qui vont moduler les différents termes du bilan.

B. Thermique de l'habitat

L'objectif premier de l'habitat est de maintenir, autour de l'homme, un climat intérieur propice à ses activités. Il peut donc être variable en fonction des besoins humains. Les échanges au sein du bâtiment se font par tous les modes de transferts thermiques (Fig.2).

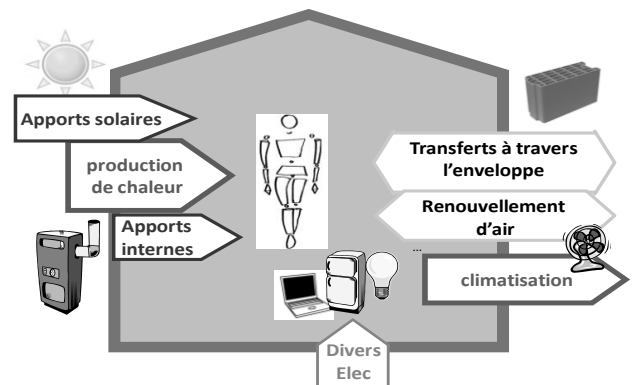


Figure. 2 : Transferts énergétiques dans l'habitat

- **La puissance produite** est composée de 2 parts distinctes :

- Les apports internes, liés au dégagement de chaleur interne (P_{int}) : êtres humains, éclairage, électroménager, informatique, etc. Ils sont variables et incontrôlés.

- La production des systèmes de génie climatique (P_{gc}), régulée en fonction des besoins. Elle est positive pour le chauffage (P_{cha}) et négative en cas de climatisation (P_{cli}).

- **Les transferts** de masse et de chaleur avec l'environnement sont liés à plusieurs phénomènes. Ils sont fonction des conditions météorologiques : températures (T_{ext}) et vitesses (V_{ext}) d'air, pression de vapeur ($P_{v,ext}$) et rayonnement solaire. Les échanges notés * sont des gains ou des pertes selon le cas.

- Transferts à travers l'enveloppe (Φ_{env})* : mur, fenêtre, toiture, etc.

- Transferts aérauliques liés au renouvellement d'air (Φ_{air})* : infiltration, ventilation, etc.

- Apports solaires à travers les vitrages (Φ_{sol}).

Les échanges dépendent évidemment de la forme du bâtiment, de sa situation géographique, de son orientation, etc.

- Bilan thermique global d'un habitat/ bâtiment

$$C_b \frac{dT_b}{dt} = P_{int} \pm P_{gc} + \Phi_{sol} \pm \Phi_{env} \pm \Phi_{air} \quad (3)$$

Pour garder un bilan thermique équilibré, c'est-à-dire (dT_b/dt) proche de 0, la régulation du bâtiment module P_{gc} . En fonction du type de construction et du climat, les grandeurs physiques intérieures ; T_{air} , V_{air} , T_{surf} , etc. seront très différentes d'un bâtiment à l'autre, et variables au cours du temps.

III SYSTEMES DE REGULATION HOMME ET HABITAT

Tous les phénomènes de transferts sont variables dans le temps, mais aussi dans l'espace, puisqu'un bâtiment est rarement isotherme. Il en est de même pour le corps humain dont la température de peau peut varier entre 20 à 37°C d'un endroit à l'autre. Dans les deux cas ils sont très dépendants du système de régulation en température et donc des consignes, qui peuvent être globales et/ou locales.

A. Régulation du corps humain

S'il y a un déséquilibre de la balance thermique, le corps réagit grâce à la thermorégulation physiologique qui est complexe et pilotée par le système nerveux central. On a l'habitude de représenter son fonctionnement de façon très simplifiée en 3 étapes :

1. les thermorécepteurs périphériques et centraux envoient au cerveau des informations qui dépendent de l'état thermique du corps,

2. ces informations sont comparées à des valeurs de consigne, puis intégrées,

3. le système central détermine la commande générale et envoie des informations aux différents effecteurs. Des effets locaux supplémentaires peuvent également se produire.

- o Si la température du corps est trop haute ;

- la vasodilatation augmente le diamètre des vaisseaux sanguins, pour accélérer les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie.

- la transpiration produit de l'eau à la surface cutanée, pour augmenter les pertes par évaporation (Evap).

- o Si la température du corps est trop basse ;

- la vasoconstriction en réduisant le diamètre des vaisseaux sanguins, minimise les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie,

- les frissons augmentent la production de chaleur (M) surtout dans les muscles.

Ces réactions sont limitées dans leur efficacité et surtout dans leur durée. La régulation humaine ne fait pas de compromis, son but est de conserver à température constante les organes vitaux (cerveau, cœur, reins,...), ce qui peut se faire au détriment des organes périphériques (mains, pieds,...). Si la contrainte thermique est forte, les réactions physiologiques ne sont plus suffisantes pour maintenir l'équilibre thermique et c'est la mort à plus ou moins court terme, par hypo ou hyper thermie. Par ailleurs, des réactions de fortes amplitudes sont perçues comme désagréables.

On définit alors une zone de neutralité thermique ou thermo-neutralité physiologique où le bilan thermique est proche de l'équilibre avec des réactions physiologiques minimales.

B. Régulation de l'habitat

Bien évidemment les bâtiments actuels sont munis de systèmes de régulation plus ou moins perfectionnés, dont le but est de maintenir la température intérieure et l'hygrométrie égales à la consigne fixée en modulant uniquement la puissance (P_{gc}) des appareils de génie climatique. On peut schématiser de façon grossière les systèmes « classiques » en 3 étapes :

1. la/les sondes de températures envoient des informations au central de commande.

2. le central de commande compare l'information pour déterminer si la consigne est atteinte ou non.

3. le système central envoie une commande aux appareils de génie climatique. De plus, des systèmes locaux peuvent moduler la commande générale.

Actuellement, les grands bâtiments sont tous munis d'une Gestion Technique Centralisée (GTC), qui peut réguler plus finement par zones thermiques. Mais les maisons individuelles n'ont souvent qu'un système général, avec une faible modulation au niveau des émetteurs.

Pour décrire les actions, il faut alors se mettre dans deux configurations extrêmes :

o Si la température intérieure (T_{int}) est inférieure à la température de consigne, l'ordre va être donné d'augmenter la production de chaleur (P_{chauf}).

o Dans le cas inverse si T_{int} est trop élevée, l'ordre va être donné de mettre en marche la climatisation (P_{clim}). C'est le cas en été lorsque les apports sont importants et que de la chaleur entre également par l'enveloppe. En fait, si le bâtiment est bien conçu, cette situation sur une longue période est rarement indispensable sous nos latitudes, sauf en cas de canicule.

Il faut noter que, pour maintenir l'équilibre thermique, les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation sont coûteuses et polluantes. Il va donc falloir les réduire le plus possible.

C. Commentaire

Si on compare ces deux systèmes, la régulation de l'être humain est actuellement beaucoup plus précise que celle du bâtiment. D'une part, la température de consigne pour les organes vitaux est de $(37.0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ et n'admet aucune dérive. D'autre part, le système intégrateur prend en compte les températures de la périphérie qui servent de « barrière de protection » du noyau. Il faut aussi noter que le nombre de thermorécepteurs cutanés est très grand, de 1 à 20 / cm^2 selon la zone corporelle, et qu'ils sont sensibles à la température et à sa vitesse de variation. Dans le meilleur des cas pour un bâtiment, il y a une sonde de température par pièce.

Autre point : la régulation physiologique est permanente et proportionnelle aux besoins, alors que celle du bâtiment est le plus souvent en tout ou rien, et peut éventuellement être déconnectée pour laisser le bâtiment en évolution libre aux intersaisons. C'est alors la période où des zones froides et d'autres en surchauffe peuvent coexister.

IV ENERGETIQUE DES BATIMENTS OCCUPES

Depuis la prise de conscience des problèmes énergétiques suite au premier choc pétrolier apparu à la fin des années 70, des réglementations successives ont été mises en place pour réduire les consommations de chauffage, comme on peut le voir sur la fig. 3.

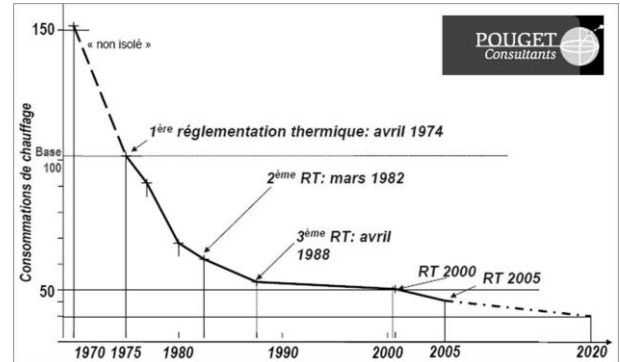


Figure 3 : Évolution de la consommation de chauffage au cours du temps

Les premières étapes avaient pour objectif principal d'améliorer l'enveloppe, puis la ventilation. Avec la Réglementation Thermique du début des années 2000 (RT2000) renforcée par la RT2005, on a eu une approche plus globale du bâtiment en jouant sur tous ses aspects, et la baisse enregistrée des consommations a été notable.

Allant plus loin, on s'intéresse maintenant à l'énergie primaire totale consommée et équivalent pétrole pour pouvoir additionner tous les usages. Il faut alors prendre en compte les consommations d'électricité spécifiques : éclairage, électro-ménager, informatique, etc. Ces consommations sont croissantes et prennent une part de plus en plus forte, surtout dans le bilan énergétique des bâtiments à faible besoin de chauffage (Fig.4).

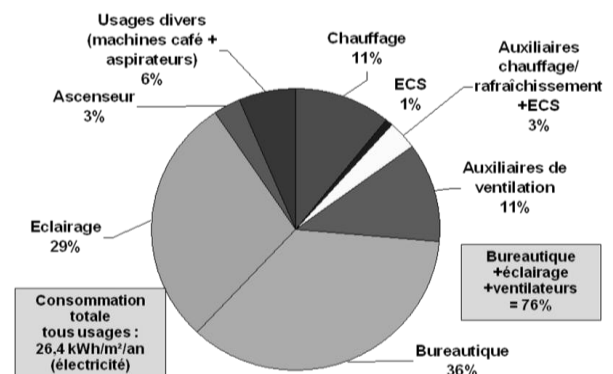


Figure 4 : Répartition des consommations énergétiques dans un immeuble de bureaux à énergie positive [11]

D'autre part, tout système qui consomme de l'électricité produit toujours de la chaleur qui doit être prise en compte dans les apports internes, ce qui peut

générer des surchauffes dans les bâtiments thermiquement très isolés où les problèmes d'inconfort d'été deviennent de plus en plus fréquents.

Actuellement pour passer à un bâtiment « zéro énergie » il faut réellement optimiser l'ensemble du bâtiment et de ses équipements. On se rend également compte que l'être humain joue un rôle qui devient totalement prépondérant alors qu'il a été jusqu'ici plutôt négligé. Cet objectif ne sera réellement obtenu que si la présence humaine, son ressenti, et les actions qui en résultent sont prises en considération.

On arrive donc tout naturellement à la conclusion que pour que les prédictions de consommation énergétique soient fiables, ils doivent impérativement avoir une approche multi-physiques et multi-échelles, mais également intégrer de plus en plus les usages et les usagers.

La difficulté de l'approche du système complet est en partie liée à des temps caractéristiques très différents pour chaque phénomène :

- Pour l'éclairage (naturel et artificiel) et l'électricité, le temps est bien inférieur à la seconde,
- Pour l'être humain le "temps physiologique" va de quelques minutes à quelques heures, par contre son comportement est instantané, mais son acclimatation est optimale au bout de 15 jours,
- Pour le bâtiment dans son ensemble, le temps caractéristique va de l'heure à plusieurs jours. Mais certains phénomènes aérauliques peuvent être beaucoup plus rapides.

Si de plus on prend en compte d'autres éléments, la réflexion devient encore plus complexe ; la durée de vie d'un bâtiment est d'environ 50 ans, le milieu professionnel s'approprie lentement les nouvelles technologies, et pour les usagers, les modifications d'habitudes sociologiques et donc d'acceptabilité sont également très lentes.

Dans nos sociétés occidentales, l'homme passe la majeure partie de sa vie à l'intérieur d'un habitat (bâtiment, voiture, transport en commun, ...). Les études concernant l'habitat se sont considérablement affinées depuis quelques années et ont permis d'améliorer de façon sensible l'habitabilité, pour un coût d'utilisation constant. Cet effet se traduit par la nécessité de prendre en compte des variables de complexité croissante. Il ne s'agit plus de décrire une ambiance uniquement par ses caractéristiques physiques, mais par les impacts que celles-ci ont sur l'habitant.

L'analyse des ambiances physiques et la conception architecturale doivent mieux intégrer les techniques nouvelles de la construction et rapprocher les personnes travaillant sur l'habitat, dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, et sur l'habitant dans le domaine des sciences de l'homme et de la société.

V COUPLAGE DE L'HOMME ET DE L'HABITAT

En fait depuis longtemps, l'usager est pris en compte de façon sous-jacente : dans le domaine du génie climatique, ce que l'on nomme hiver correspond à la période où il faut chauffer un bâtiment, pour maintenir une température acceptable pour un homme chaudement vêtu, c'est-à-dire entre 19 et 21°C. L'été est à l'inverse défini comme étant la période où il faut rafraîchir pour maintenir des conditions optimales pour un homme légèrement vêtu c'est-à-dire entre 25 et 28 °C.

A. Le système global

Pour réellement prendre les usagers en compte, il faut avoir une approche du système dans son ensemble pour étudier les couplages forts (fig. 5) qui ont une importance croissante.

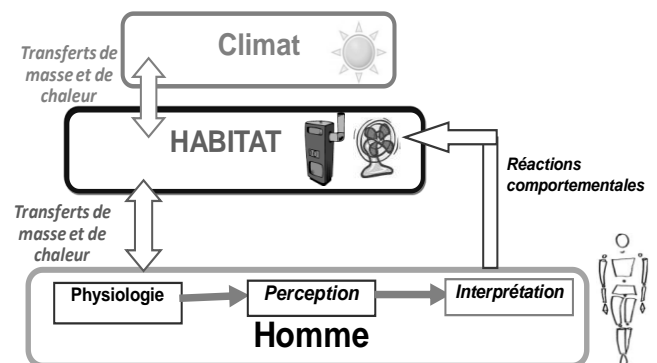


Figure 5 : Schématisation du couplage entre l'homme et l'habitat

B. Evaluation des ambiances

Les transferts thermiques entre l'Homme et l'habitat, mais également l'activité de l'homme et ses vêtements vont entraîner un certain état thermo-physiologique du corps, qui va être perçu puis interprété (fig.5). A ce stade, la personne est consciente de son ressenti. Elle dispose de plusieurs échelles de description :

- Le jugement thermo-sensoriel est tout jugement porté par un individu sur son état thermique, il peut être perceptif, évaluatif, préférentiel, ... Il s'exprime selon plusieurs échelles adaptées.

- La sensation thermique, est un jugement perceptif, c'est une notion assez objective. Elle est liée aux températures (T_{sk}) et mouillure (ω_{sk}) de peau en grande partie, mais aussi à la perception des réactions

physiologiques. Elle est le plus souvent exprimée sur une échelle bipolaire en termes allant de « *très froid* » à « *très chaud* ». La sensation globale « *ni chaud ni froid* » ou neutre ou encore thermo-neutralité sensorielle n'est possible que dans la zone de neutralité physiologique.

- *Le confort thermique* est un jugement évaluatif. L'ASHRAE (association internationale de génie climatique) donne comme définition : "*l'état d'esprit où l'homme exprime la satisfaction des conditions thermiques*" [11]. La déclaration de confort comporte une composante psycho-socio-affective qui est subjective et dépend des préférences de chaque individu. Il s'exprime sur une échelle unipolaire allant de « *confortable* » à « *très inconfortable* ».

Entre la sensation et le confort, il existe un lien qu'il est impossible de représenter sous forme d'équation, car ce passage fait appel à des processus encore inconnus. D'après toutes les études, même si les conditions de thermoneutralité sont à peu près les mêmes pour tous les individus, et peuvent être calculées, les conditions préférées ou de 'confort' sont très différentes selon les habitudes de chacun, la culture, les situations et les attentes personnelles.

Ces définitions sont importantes, car de fait il n'existe pas de méthode de calcul du « confort thermique ». Dans ce domaine, il est posé comme hypothèse forte que dans la majeure partie des cas, le confort peut n'être atteint que pour une perception presque neutre (ni chaud – ni froid). Donc pour maintenir ce jugement pour un individu standard, ou bien pour une majorité de personnes, on détermine les conditions ambiantes qui vont minimiser les réactions physiologiques. Les indices de « confort » sont basés sur ce principe.

De fait, la réalité est plus complexe car l'être humain, après avoir interprété son état thermique, va se déclarer ou non en situation de confort et "*si un changement a lieu produisant un inconfort, les gens réagissent de façon à rétablir leur confort*". Ce concept est à la base de la démarche adaptative et comportementale.

C. Action-commande de l'homme

La *thermo-régulation* comportementale est déclenchée consciemment par l'être humain en fonction de ses préférences personnelles. Il modifie, soit le climat, soit directement les échanges, ce qui a pour conséquence directe de modifier son bilan thermique (fig.5). Ces comportements sont de deux types :

- *régulation individuelle* : ce sera un changement de posture (modification de la surface d'échange), de vêtements (modification de la résistance aux transferts thermiques), ou d'activité (augmentation de la production de chaleur), ...
- *régulation collective ou technique*, par la création ou la modification de l'environnement artificielle pour recréer un micro climat plus acceptable : ouverture/fermeture des fenêtres, modification de la température de consigne, ...

Les réactions comportementales dépendent des opportunités (par exemple, si on peut ou non modifier la consigne), et sont limitées par les contraintes (par exemple la possibilité de changer de tenue vestimentaire). Les opportunités et les contraintes peuvent être techniques, sociales ou affectives. Elles dépendent également des attentes, c'est ce qui fait que l'habitat personnel sera géré d'une façon très différente des espaces de travail. L'un des autres facteurs qui influencent le comportement est l'impact financier d'une décision.

A ce stade on peut aussi souligner que la thermo-régulation physiologique est inconsciente et a pour but le maintien de l'homéothermie, alors que les réactions comportementales sont conscientes et guidées par des choix hédoniques. Ces deux modes de régulation peuvent avoir lieu simultanément, mais aussi être antagonistes.

Malgré tout, des conditions moyennes produisant un confort thermique global peuvent induire des problèmes locaux. On parle alors d'inconfort local, car le plus souvent c'est en ces termes que l'individu s'exprime, par exemple : "*je me sens globalement bien, mais j'ai un peu froid aux pieds*". L'inconfort local peut avoir diverses origines :

- un environnement thermique local particulier entraînant des flux locaux très différents : courant d'air, soleil, sol froid, asymétries de température de parois,
- des réactions physiologiques ; par exemple, si l'individu a légèrement froid, sans même qu'il en ait conscience, il peut y avoir un début de vasoconstriction qui diminue le flux sanguin et donc l'apport de chaleur dans les extrémités. Il se plaint d'avoir froid aux pieds ou aux mains, mais la cause principale de ce phénomène peut être ailleurs.

Il arrive bien souvent qu'un inconfort local soit dû aux deux causes simultanément. Mais selon les cas les solutions pour remédier aux problèmes sont totalement différentes. A contrario un phénomène local n'entraîne pas forcément les mêmes effets ; un individu qui a

chaud appréciera un courant d'air local, mais s'il a froid, il ne supporte plus ce même courant d'air. Les inconforts locaux peuvent engendrer des problèmes qui dépassent une simple gêne, il faut donc avoir des méthodes performantes d'analyse, de prédiction et finalement de régulation.

On voit que la régulation comportementale lie encore plus étroitement l'homme et son habitat. Par exemple, pour qu'un système de chauffage soit jugé « confortable » par un individu, il faut qu'il lui procure non pas la thermo-neutralité mais ses conditions thermiques préférées, globales et locales, ce qui est beaucoup plus délicat à obtenir. Il faut que de surcroît le système de chauffage lui-même soit accepté d'un point de vue symbolique et esthétique. Si toutes ces conditions ne sont pas réunies, l'être humain peut alors faire une mauvaise utilisation ou dégrader les systèmes mis à sa disposition. Il en résulte invariablement un surcoût énergétique et financier. On peut rapidement en conclure, qu'il est totalement vain de vouloir déterminer et calculer le "confort thermique universel" mais qu'il faut développer des techniques pour que chaque individu puisse réguler son espace comme il le souhaite sans générer des surconsommations d'énergie.

VI REGULATION DU SYSTEME HABITAT HABITANT

La régulation de l'ensemble doit donc être vue comme un tout où les éléments sont liés, comme le montre la fig.6.

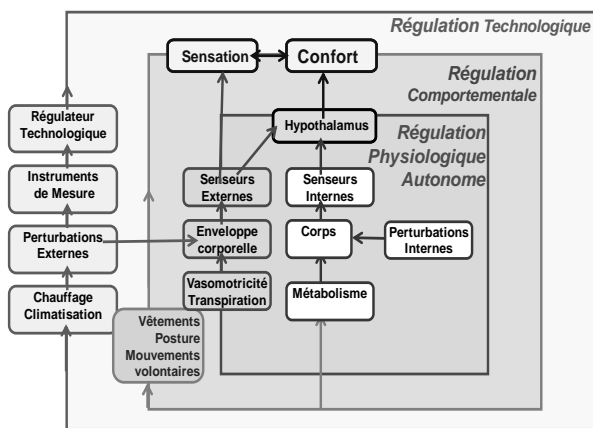


Figure 6 : Les différents niveaux de régulation de l'homme dans l'habitat

Un courant de recherches, nommé « démarche adaptative » a prouvé que si l'être humain a des moyens d'actions sur l'ambiance intérieure [7], il est plus tolérant. La fig. 7 donne la température de confort en fonction du climat extérieur.

On constate que pour des bâtiments naturellement ventilés, l'Homme accepte des températures intérieures bien plus élevées en été car il peut agir sur le bâtiment,

ouverture des fenêtres par exemple, et rester en contact avec le milieu extérieur.

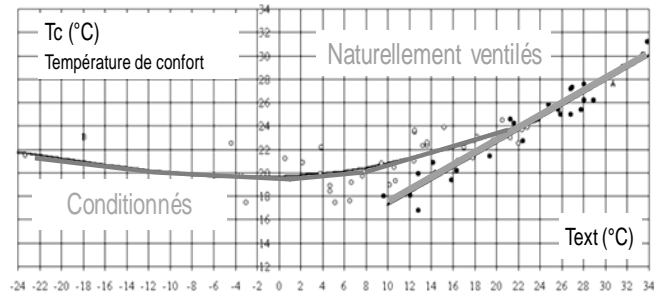


Figure 7 : Température de confort en fonction de la température moyenne courante extérieure [4].

Avec les progrès de l'électronique, de l'automatique et de l'informatique, on est en capacité d'avoir plusieurs niveaux de régulation des équipements techniques, qui doivent répondre aux exigences des utilisateurs. Des systèmes performants ont été développés dans le domaine des transports (voitures, avions, ..). Ils permettent de créer des conditions thermiques qui conviennent globalement à toutes les personnes présentes, et offrent de surcroît des moyens pour personnaliser l'environnement proche. Ceci peut être appliqué dans le domaine du bâtiment [10], des systèmes techniques commencent à se développer pour créer des « bulles de confort » qui sont alors beaucoup moins consommatrices d'énergie, plutôt que de conditionner un bâtiment entier. Ces systèmes ont en plus l'avantage de pouvoir répondre aux souhaits personnels pour arriver à un confort individuel optimal.

VII MODELISATION DU SYSTEME

Pour prévoir le comportement thermique dynamique des bâtiments, de nombreux outils numériques ont été développés, la plupart dans les années 80. On cherchait alors seulement à prédire et à comprendre l'évolution d'un système. Actuellement, on se retrouve confronté à plusieurs difficultés. Bien que ces logiciels aient emmagasiné énormément de connaissance, ils sont souvent centrés sur une seule discipline, et le couplage multi-physique est problématique. Comme on l'a souligné, les temps caractéristiques des phénomènes sont différents. Par exemple les logiciels de thermique du bâtiment ont un pas de temps de calcul de l'ordre de l'heure pour pouvoir faire une simulation sur toute l'année sans nécessiter des temps de calcul prohibitifs. La modélisation de l'humain impose un pas de temps beaucoup plus faible, et en contrôle-commande les temps sont inférieurs à la seconde. Comment alors prendre en compte les actions possibles de l'homme sur le bâtiment?

Il faut bien souligner que des problématiques nouvelles sont apparues très récemment avec les objectifs de baisse des consommations énergétiques globales. Par exemple, si les usagers ouvrent les fenêtres 2 fois par jour, l'impact relatif qui était faible dans une "passoire énergétique", peut atteindre 20% de surconsommation dans un Bâtiment Basse Consommation (BBC).

Les résultats obtenus par les logiciels de thermique du bâtiment sont souvent loin des résultats mesurés sur le terrain. Pour des bâtiments à faibles besoins énergétiques, on peut constater en moyenne des écarts de consommation d'un facteur 2, et pouvant aller jusqu'à un facteur 8. En fait les simulations supposent une utilisation « idéale » mais de fait, les bâtiments sont inoccupés.

Dans la nouvelle RT2012, la démarche adaptative commence à apparaître et les températures intérieures doivent se situer dans la zone de Brager, issue de la démarche adaptative, comme le montre la fig. 8. Ce qui, là encore, ne signifie pas que tout le monde acceptera les situations thermiques prévues par le calcul.

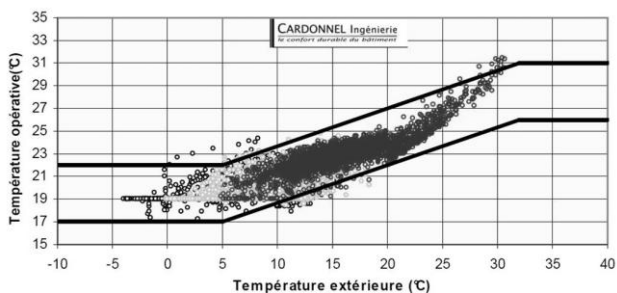


Figure 8 : températures issues de simulation comparées à la zone de Brager (en trait plein)

Les modélisations en cours introduisent maintenant un comportement supposé de l'habitant. Il peut ; se (dé)vêtir, modifier son activité ou la ventilation, actionner des systèmes de chauffage locaux, etc.... [5,12]. On s'approche d'un comportement réel. Du travail reste encore à faire d'une part dans la compréhension de ce qui déclenche tel ou tel type de comportement, et d'autre part sur les systèmes de régulation à mettre à sa disposition.

VIII PERSPECTIVES

Pour réguler les ambiances au plus près des exigences de l'habitant tout en veillant à minimiser les consommations énergétiques, il devient nécessaire d'agir conjointement sur plusieurs équipements et d'étudier simultanément "les confort des ambiances" ; thermique, éclairage, acoustique, qualité de l'air [8].

Outre la régulation du système de chauffage ou de climatisation, il faut adapter le débit de ventilation au nombre d'occupants, piloter l'éclairage en fonction de l'éclairement naturel et de la présence d'occupants, la mise en service, le réglage des protections solaires, etc. La régulation de ces équipements, dont la fonction est d'améliorer le confort chacun dans tous les domaines, aura une influence en retour sur les températures du bâtiment. Ces dernières devront donc être régulées de manière plus fine et surtout plus réactive dans le temps.

Il est fréquent que les scénarios de régulation imaginés par les concepteurs des systèmes produisent des effets mal acceptés par les habitants. Une période de réglage et d'adaptation, bien que rarement planifiée par la Maîtrise d'Ouvrage, s'avère désormais indispensable durant l'année qui suit la construction d'un bâtiment.

Cependant comme il est écrit ci-avant, les conditions préférées de confort varient selon les individus ; il sera donc difficile d'adapter la régulation des systèmes pour des conditions idéales pour tous, ainsi qu'en témoigne l'échec du « tout domotique » constaté ces dernières années. L'automate parfait n'existant pas dans ce domaine, une possibilité de reprise en main des réglages par l'habitant est indispensable. Si le surcoût du doublage des commandes des systèmes (automatisme + humain), en termes de linéaires de fils électriques, s'est avéré souvent prohibitif, des solutions existent aujourd'hui pour le réduire : commandes sans fil ou courant porteur. Il convient donc de réaliser des dispositifs de dialogue avec le système de régulation, ou interfaces, les mieux adaptés. Cependant, comme le montre Meier [6], l'ergonomie des organes de réglages confiés à la charge des habitants doit être étudiée avec soin. En effet, les thermostats programmables de première génération sont bien plus utilisés que leurs homologues hi-tech. La combinaison avec les automatismes requiert de plus des dispositifs de gestion de priorités, de temporisation... autant de notions dont l'acceptabilité par l'habitant est complexe à faire passer.

La nouvelle réglementation considère que les usagers ne peuvent pas ouvrir les fenêtres en hiver, pourtant on sait pertinemment que ce ne sera pas accepté ; il est alors plus judicieux de prévoir un système, contact sur les feuillures, par exemple, qui coupe le chauffage en cas d'ouverture des fenêtres. Si la technologie semble au point, le défi à relever pour une bonne intégration de la régulation des systèmes habitat-habitant dans les bâtiments modernes nécessite des recherches approfondies dans le domaine des sciences humaines.

IX CONCLUSIONS

La consommation énergétique dans les bâtiments est le résultat de l'imbrication des deux systèmes thermiques que sont l'habitat et l'habitant. Si le premier est considéré comme bien cerné, le second fait encore montre de nombreuses inconnues, tant par son comportement que par le jugement qu'il porte sur son environnement.

On peut penser (et espérer !) que le développement de systèmes économes, informés par des capteurs performants, et s'appuyant sur des modèles plus complets, permettra d'éviter les gaspillages et d'offrir à l'homme une ambiance qu'il appréciera. Toutefois, il faudra refuser le « tout automatique » et laisser leur part à la liberté et la fantaisie.

REFERENCES

- [1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2009). ASHRAE Handbook. Fundamentals. Chapter 9.
- [2] De Herde, A., Liébard A. (2005). Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique: concevoir, édifier et aménager. Éditions Le Moniteur.
- [3] Duffaure-Gallais I. (2011) Et si on s'intéressait aux usagers des bâtiments ? <http://www.lemoniteur.fr>
- [4] Humphreys, M.A., Hancock, M. (2007). Do people like to feel, neutral ? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale. Energy and Buildings, vol 39: 867-874.
- [5] Lavoye F., Thellier F., Spagnol S., Lartigue B. (2008). Perception de la qualité des ambiances intérieures soumises à des transferts thermo-aérodynamiques. Conférence IBPSA, Lyon.
- [6] Meier A., Aragon C., Hurwitz B., Mujumdar B., Peffer T., Pritoni M. (2010). How People Actually Use Thermostats. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings 2-19.
- [7] Nicol, J.F., Humphreys, M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings, vol 34: 563-572.
- [8] Norme NF-EN-15251 (2007). Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments, couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. Eds. AFNOR.
- [9] Parsons K.C. (1993). Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate and cold environment on human health. Eds. Taylor & Francis, London.
- [10] Quintela D., Gaspar A., Raimundo A., (2000) Development of local heating systems for thermal comfort and energy savings in buildings. International Conference UIE 2000, Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisbon, Portugal.
- [11] Sidler O. (2011). Les bâtiments à énergie positive : déjà une réalité. <http://www.enertech.fr/>
- [12] Thellier F. (1999). L'homme et son environnement Thermique. Modélisation. Mémoire d'Habilitation à Diriger des recherches Toulouse. <http://phase.ups-tlse.fr/>