



HAL
open science

Le confort thermique dans les bâtiments

Frédéry Lavoye, Françoise Thellier

► **To cite this version:**

| Frédéric Lavoye, Françoise Thellier. Le confort thermique dans les bâtiments. 2008. hal-02180957

HAL Id: hal-02180957

<https://hal.science/hal-02180957>

Submitted on 11 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.

Le confort thermique dans les bâtiments

Problématique

Un bâtiment, incluant sa structure, son éclairage, son système de production énergétique, etc., se doit d'offrir les conditions intérieures les plus confortables pour l'être humain. La notion de confort thermique est dès lors étroitement liée à la performance énergétique dans le bâtiment. Cependant, cette notion est difficile à appréhender étant donné son caractère subjectif. Il est en effet hasardeux d'imposer des conditions climatiques strictes en espérant que ces dernières satisfassent tous les occupants du bâtiment. Cela est d'autant plus vrai qu'une ambiance thermique est influencée par une multitude de paramètres auxquels les individus sont plus ou moins sensibles selon le contexte.

Malgré tout, la volonté de satisfaire une majorité de personnes est envisageable. Des méthodes sont ainsi développées pour définir, interpréter et optimiser les ambiances thermiques. Ces méthodes permettent de traduire les facteurs sensibles en termes d'indices de sensation. Elles peuvent être émises par des enquêtes sur terrain et des expérimentations avec l'être humain, par des mannequins thermiques ou par le calcul des échanges thermiques entre le corps humain et son environnement.

L'enjeu quant à la résolution de cette problématique est de prévoir le plus précisément possible la sensation thermique dans un bâtiment afin de minimiser les consommations énergétiques indispensables à l'établissement de conditions satisfaisantes.

Cette fiche est complémentaire de celle portant sur l'éclairage, la ventilation, le diagnostic énergétique d'un bâtiment, les codes de qualité énergétique des bâtiments et l'architecture bioclimatique.

Principes de base

«Le confort thermique est un état d'esprit qui exprime une satisfaction de son environnement; le sujet ne peut pas dire s'il veut avoir plus chaud ou plus froid.»

Quel que soit l'environnement dans lequel il se trouve, l'Homme est une machine thermique qui doit maintenir sa température interne la plus constante possible grâce à des mécanismes de thermorégulation physiologique qui lui permettent de maintenir un bilan thermique équilibré. Ainsi, à partir de ces réactions physiologiques perçues puis interprétées de façon subjective en faisant intervenir ses préférences psycho-socio-

affectives individuelles, l'Homme essaie de limiter l'amplitude des sensations de désagrément en développant des processus de régulation comportementale et adaptative.

Bilan thermique du corps humain

La partie suivante expose les différents échanges thermiques mis en jeu.

- *La conduction (K)* est un mode de transfert de chaleur par contact direct entre le corps et une surface à température différente. Elle dépend des températures de surface et d'un coefficient d'échange thermique. La conduction est le transfert thermique par exemple entre le sol et les pieds nus d'un individu.
- *La convection thermique (C)* est un échange de chaleur entre la surface du corps et l'air ambiant. Elle dépend essentiellement de la température et de la vitesse de l'air. La convection est le transfert thermique entre l'air soufflé par un aérotherme (système de chauffage à air soufflé) et l'Homme.
- *Le rayonnement (R)* correspond aux échanges radiatifs entre la surface du corps et les parois qui l'entourent. Il s'effectue par propagation d'ondes électromagnétiques et dépend des températures de surface de chaque paroi, de la surface effective de rayonnement et de l'émissivité du corps humain et des parois environnantes. Chaque paroi étant généralement à température différente (émetteur de chaleur, vitre froide...), on parle de température moyenne de rayonnement qui est une température moyenne équivalente d'échange.
- *L'évaporation cutanée (E_{vap})* est un échange de chaleur latente dû à l'évaporation de l'eau à la surface de la peau. C'est le moyen le plus efficace du corps humain pour évacuer la chaleur en ambiance chaude. La quantité d'eau à évacuer est déterminée par le système de régulation physiologique et dépend essentiellement de la pression de vapeur dans l'air et de sa vitesse.
- *Les échanges de chaleur par voie respiratoire (R_{esp})* s'effectuent à la fois par voie sensible (convection) et latente (évaporation), c'est-à-dire qu'il y a non seulement un transfert de chaleur mais également de masse. Ce phénomène est régi par la différence de température et de pression entre l'air expiré et l'air ambiant. Cet échange est faible et dépend essentiellement de l'activité.

- **Le métabolisme (M)** est l'énergie thermique produite par le corps humain. Il permet la production de chaleur indispensable aux fonctions vitales et dépend de la physiologie de l'individu (poids, taille, âge, sexe), de son activité et de l'ingestion de nourriture. La puissance thermique dégagée par le corps en fonction de son activité s'exprime en **met** où 1 met = 58 W/m² de surface corporelle, correspondant à celle d'un homme « standard » assis au repos (le sommeil requiert 0,7 met tandis que jouer au basket requiert 5 à 8 met). La surface corporelle (A_{DU}) se calcule en fonction du poids (P) et de la taille (H) de l'individu: $A_{DU} = 0,203 \times P^{0,425} \times H^{0,725}$
- **L'habillement** est un moyen de lutte contre les échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Il est considéré comme une résistance thermique permettant de limiter ces transferts de chaleur. L'unité de cette résistance est le **clo**, où 1 clo = 0,155 W/m²/K, correspondant à une tenue « classique » d'hiver. Une tenue en short, tee-shirt, caleçon, chaussettes et chaussures représente une isolation thermique de 0,33 clo, tandis qu'une tenue en pantalon léger, chemise manches longues, veston demi-saison, caleçon, chaussettes et chaussures représente 1 clo.

Le bilan thermique entre l'homme et son environnement est établi comme suit:

$$\text{Avec: } (M - W) - (E_{\text{vap}} + R_{\text{esp}} + K + C + R) = m.c. \frac{dT}{dt} = S$$

S: la charge thermique calculée en fonction des variables de l'ambiance (température d'air, de rayonnement, vitesse d'air et humidité) et celles de l'individu (métabolisme, habillement). Si celle-ci est nulle, l'individu est en situation d'équilibre thermique. Si cet équilibre est atteint avec peu de réactions physiologiques, le corps est à la thermoneutralité: le confort est alors possible.

Dans le cas contraire, la thermorégulation physiologique puis comportementale se met en marche.

M*: l'énergie reliée au métabolisme

W: le travail mécanique extérieur fourni par le corps, il est généralement pris égal à zéro.

E_{vap} *: l'énergie reliée à l'évaporation cutanée

R_{esp} *: les échanges de chaleur par voie respiratoire

K*: l'énergie de conduction

C*: l'énergie de convection thermique

R*: le rayonnement

(* Tels que définis ci-dessus)

Indices empiriques de sensation thermique: le PMV et le PPD

Le bilan thermique très simplifié présenté ci-dessus a permis de développer les indices internationalement reconnus pour qualifier une ambiance: PMV (Predicted Mean Vote) et PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), fournis par les normes ISO 7730 (1994), et développés dans les années 1970 par Fanger.

Leurs expressions sont les suivantes:

$$PMV = (0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028) \cdot S$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)]$$

Le PMV donne des valeurs comprises entre -3 (froid) et 3 (chaud). Le PPD, quant à lui, représente le pourcentage de personnes non satisfaites. Pour des valeurs du PMV comprises entre -0,5 et 0,5, le PPD est inférieur à 10%, ce qui correspond à des situations acceptables. Ces relations ont été établies statistiquement à partir d'études expérimentales auprès de 1 300 sujets en chambre climatique. Sa principale limite réside dans le fait qu'il a été déterminé en conditions homogènes et stationnaires, représentant des conditions théoriques rarement rencontrées en réalité dans les bâtiments.

L'inconfort local

Voici quelques exemples connus de situations pouvant provoquer un inconfort:

- Un courant d'air peut entraîner un inconfort d'autant plus important selon son taux de turbulence (T_u), sa vitesse (v) et sa température (T_a). Le risque d'inconfort est d'autant plus grand que les températures d'air sont faibles. On notera qu'en climat chaud, l'augmentation de la vitesse d'air reste l'unique moyen d'augmenter l'évaporation de la sueur à la surface cutanée et donc l'évacuation de chaleur. L'indice Draft Risk, DR, permet de déterminer le pourcentage de gens insatisfaits par un courant d'air:

$$DR = (3,143 + 0,3696 \cdot v \cdot T_u) \cdot (34 - T_a) \cdot (v - 0,05)^{0,622}$$

- Une différence de température de rayonnement entre deux parois opposées (plafond, mur) est aussi synonyme d'inconfort, d'autant plus que cette différence est importante. Cette asymétrie se retrouve lors de la présence de vitrages peu performants ou un système de chauffage ou de refroidissement par parois.
- Finalement, en raison de la dépendance entre la température et la densité de l'air, il est fréquent de constater une stratification de l'air, et donc de la température, contribuant à l'inconfort.

La thermorégulation physiologique

Les réactions de thermorégulation physiologique se traduisent par des phénomènes tels que la modification du débit sanguin, la sudation ou encore le frisson. En ambiance chaude, les vaisseaux sanguins se dilatent, augmentant le débit sanguin et de fait l'évacuation de chaleur du centre vers la peau: c'est la vasodilatation. La sudation intervient en aval et consiste en l'évacuation de chaleur et de masse d'eau du corps humain vers l'environnement. Cette quantité d'eau est évaluée avec la moullure cutanée qui est le rapport entre la surface de la peau mouillée et la surface totale de la peau. Cette donnée varie de 0,06 (perspiration insensible) à 1 (corps entièrement mouillé). Inversement, la vasoconstriction réduit les échanges thermiques pour mieux conserver la chaleur interne et ainsi supporter

Le confort thermique dans les bâtiments

des ambiances froides. Le frisson permet, par contraction des muscles, d'augmenter le métabolisme. Un frisson peut atteindre 4,5 met (soit 261 W/m²).

La prise en compte de ces mécanismes permet de déterminer des indicateurs physiologiques tels que la mouillure cutanée, la température de peau, le débit sanguin, la température corporelle, etc. Ces indicateurs sont déterminants quant à l'interprétation et le calcul d'indices d'évaluation du confort. De nombreux modèles de physiologie permettent de déterminer en régime transitoire les données thermo-physiologiques nécessaires à l'interprétation d'une situation de confort ou d'inconfort. Gagge et ses collaborateurs ont développé un modèle numérique simple représentant le comportement thermique du corps humain face à une (des) contrainte(s) climatique(s). Ce dernier est schématisé comme deux compartiments concentriques (on parle de modèles à deux nœuds) isothermes. Les transferts de chaleur entre eux se font par conduction tissulaire et convection sanguine. Les échanges avec l'extérieur se font par les modes de transferts décrits précédemment. Des modèles beaucoup plus précis ont été mis au point: le plus connu étant celui de Stolwijk et Hardy qui modélise le corps humain en 25 nœuds et permet d'avoir une vision plus nette de l'inconfort local.

Les variables physiologiques qui en découlent permettent le calcul d'autres indices, tels que la Temperature Effective (Effective Temperature), ET*, qui représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50% d'humidité relative et dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de calculer PMV* qui tient compte d'un régime transitoire et de mieux interpréter les effets de l'humidité en ambiance chaude.

La Température Effective Standard SET (Standard Effective Temperature), permet de standardiser l'indice ET*. La SET est égale à ET* mais pour des valeurs de vêture standardisées par rapport au métabolisme. Une échelle de sensation est alors établie (tableau I).

La connaissance des pertes par évaporation et de la mouillure cutanée sont des indicateurs mieux adaptés à l'étude du confort en climat chaud. Ils permettent la détermination du rendement évaporatoire, fonction exponentiellement décroissante de la mouillure cutanée, et du débit sudoral, quantité d'eau suée par unité de temps (g/h), directement dépendant des pertes par évaporation et du rendement évaporatoire. Selon des études faites par des physiologistes, un débit sudoral de 70 g/h et une

mouillure cutanée de 0,3 sont des limites au-delà desquelles l'individu est en situation d'inconfort. Des zones de confort, de 1 à 5, sont fixées par l'indice DISC (DISComfort) qui se calcule différemment suivant les auteurs et est plus ou moins sensible à la mouillure cutanée et/ou au débit sudoral. Des formulations sont disponibles pour déterminer un pourcentage d'insatisfaits lié au débit sudoral et à la mouillure cutanée.

La thermorégulation comportementale

Alors que la thermorégulation physiologique est un phénomène inconscient de régulation de la température corporelle, la thermorégulation comportementale est consciente. L'action comportementale intervient lorsque la régulation thermophysologique est insuffisante. Elle se traduit par une action consciente sur les commandes de systèmes énergétiques, le bâtiment lui-même ou encore une action individuelle (modification de la tenue vestimentaire par exemple). Elle sera limitée par des contraintes liées à la fonctionnalité du bâtiment (possibilité de régulation individuelle des systèmes) ou sociales (protocole vestimentaire).

Problèmes observés et solutions techniques

Le « syndrome du bâtiment malsain » (*sick building syndrom*) est un ensemble de symptômes tels que maux de tête, difficulté de concentration, fatigue, sensation de sécheresse, nausées, etc. Les raisons ne sont pas toujours connues mais les conditions thermiques et la qualité de l'air dans les bâtiments en sont les principaux facteurs. Plusieurs mesures sont disponibles pour améliorer ces conditions.

La rénovation des bâtiments

L'audit énergétique de bâtiments a pour vocation d'analyser les problèmes énergétiques rencontrés et de trouver les solutions pertinentes permettant de les résoudre (voir notamment les fiches techniques de PRISME sur le diagnostic énergétique d'un bâtiment, sur l'éclairage, sur la ventilation). Si ces opérations visent à améliorer la performance énergétique, elles peuvent aussi proposer des solutions visant l'amélioration de la qualité des ambiances.

La solution la plus adaptée pour déterminer les causes d'un éventuel inconfort est de demander directement l'opinion des occupants. Ces enquêtes sur terrain sont basées sur des

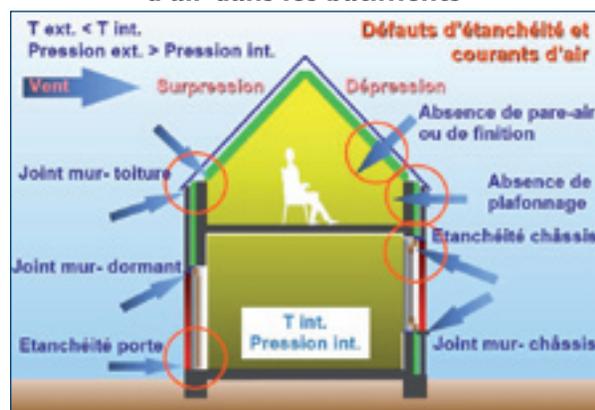
Tableau I : Relation entre SET (Température Standard Effective) et sensation

SET (°C)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
>37,5	Extrêmement chaud	Échec de la régulation
34,5 – 37,5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30,0 – 34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25,6 – 30,0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22,2 – 25,6	Confortable et acceptable	Neutralité
17,5 – 22,2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14,5 – 17,5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10,0 – 14,5	Très froid, très inacceptable	Frissons

questionnaires et peuvent être couplées à des campagnes de mesures. Ces dernières permettent la détermination des données climatiques exploitables pour le calcul ou la détermination d'indices de confort. Des solutions techniques sont alors proposées. Les paragraphes suivants soulignent les problèmes les plus fréquemment rencontrés dans ce genre de campagne et les solutions les plus efficaces à mettre en œuvre.

Problème 1 : On note une **hétérogénéité des températures de surface**. La thermographie infrarouge est alors particulièrement adaptée: elle permet de déterminer les températures de surface et de déceler les éventuels défauts d'isolation à la source de l'inconfort. En excluant la présence d'un système de chauffage ou de climatisation par les parois, une mauvaise isolation peut créer des ponts thermiques importants et des températures de parois non uniformes. Le champ d'action est alors plutôt faible; il consiste essentiellement en la sur-isolation de la dite paroi. Si l'isolation est inexistante, la solution est évidemment de la réaliser. Des revêtements de sol et des enduits sur les murs peuvent être une solution tout à fait appropriée. Outre l'isolation des parois opaques, la présence d'un simple vitrage crée un rideau froid. Le remplacement de ce type de vitrage est à l'heure actuelle une nécessité tant au niveau énergétique qu'au niveau de l'amélioration des conditions d'occupation.

Figure 1 : Défauts d'étanchéité et courants d'air dans les bâtiments



Un mauvais dimensionnement d'un système de chauffage ou de climatisation par rayonnement peut aussi induire des températures de parois inadaptées. Vérifier l'installation est alors indispensable pour corriger le dysfonctionnement.

Problème 2 : On mesure des **vitesse d'air** locales trop importantes (*Draught risk* élevé, plainte des occupants). Bien que ces courants d'air soient souvent causés par des systèmes énergétiques mal dimensionnés ou mal positionnés, il peut arriver que dans des bâtiments anciens, l'air extérieur pénètre par des fissures dans les murs ou les châssis des fenêtres. Une solution est d'évaluer la perméabilité à l'air par un « test de la porte soufflante » (*blower test door*) et pouvoir alors corriger les problèmes d'étanchéité.

S'il s'avère que ces courants d'air sont induits par un système énergétique, il convient d'analyser ce dernier et d'y remédier

en vérifiant: les débits d'air mis en œuvre, les dimensions des bouches de soufflage, leur position (éviter par exemple que la zone de panache du jet d'air soit dans la zone d'occupation), etc. La possibilité qui est laissée aux occupants de moduler les débits de ventilation (tout en fixant des limites hautes et basses) est une solution s'avérant tout à fait efficace. Une ultime alternative est de renouveler l'installation en question.

Problème 3 : On mesure des **températures d'air** non adaptées et le questionnaire fait apparaître que les occupants ont chaud ou froid (localement ou non).

Un dysfonctionnement du système de régulation peut entraîner des surconsommations énergétiques et des températures inappropriées. La position du thermostat peut être à l'origine du problème: si ce dernier est situé dans un endroit bien ensoleillé, il induira une mauvaise régulation des pièces qui ne le sont pas et inversement. Le partitionnement du bâtiment en zones thermiques est alors une alternative.

Par ailleurs, la consigne de chauffage ou de climatisation doit être adaptée à la typologie du bâti (bureaux, logements, usines...) en raison du lien entre sensation thermique, activité et vêture. Une solution envisageable est de laisser la possibilité aux occupants de moduler individuellement la consigne.

Une autre solution a été initiée lors du projet *Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs)*, coordonné par l'Université d'Oxford Brookes et financé par l'Union européenne. La théorie d'une consigne variable dépendant de la température moyenne mobile extérieure (moyenne pondérée des températures des jours précédents avec un poids d'autant plus important que le temps écoulé est court) permet de moduler les consignes de chauffage et de climatisation en fonction des conditions extérieures et du changement qu'elles sont en train de subir. Un tel concept permet de réaliser une excellente transition entre les différentes saisons. L'étude réalisée dans cinq pays européens laisse apparaître les températures préférées suivantes en fonction de la température moyenne mobile (tableau 2).

La norme européenne NF EN 15251 préconise des températures « préférées » dépendant de la température moyenne mobile (dès lors qu'elle est supérieure à 10 °C) pour des bâtiments non climatisés. La norme fixe ainsi des limites hautes et basses suivant le niveau d'exigence du bâtiment. Trois catégories de bâtiments sont définies dans la norme, dont les températures préférées sont les suivantes :

- Catégorie I (espaces occupés par des personnes sensibles et/ou fragiles): $0,33 T_{rm} + 18,8 \pm 2$
- Catégorie II (bâtiments neufs et rénovations): $0,33 T_{rm} + 18,8 \pm 3$
- Catégorie III (bâtiments existants): $0,33 T_{rm} + 18,8 \pm 4$

Il est important de noter que les températures préférées moyennes initiées par le projet SCATs concordent bien avec celles fixées par la norme étant donné que ces dernières les encadrent.

Outre les problèmes de régulation et de consignes, ces températures non adaptées peuvent être la conséquence d'une

diffusion médiocre de la chaleur ou de la fraîcheur (stratification, zones d'air froides ou chaudes). La cause est, par exemple, un radiateur mal positionné ou sous-dimensionné ou une bouche de soufflage vétuste ou obstruée.

Une installation vétuste de chauffage ou de climatisation ne fonctionne plus correctement et induit inévitablement des problèmes de régulation, une impossibilité de fonctionner à puissance nominale... Les conditions de confort qu'elle est censée atteindre ne le sont jamais : une solution est de vérifier la totalité de l'installation, rééquilibrer le réseau, vérifier l'état des conduits, bouches et émetteurs, et le cas échéant remplacer partiellement ou totalement l'installation.

Problème 4: On mesure des **humidités** extrêmes. Une humidité excessive peut avoir des conséquences catastrophiques sur le bâtiment et la santé : développement de moisissures, air malsain, asthme, etc. La cause est souvent liée à un mauvais dimensionnement du système de ventilation : ce dernier insufflé des débits trop faibles par rapport au taux d'occupation ou aux dégagements de certains process (cuisson, séchage, etc.). La solution est de réévaluer le dimensionnement du système de ventilation en augmentant les débits ou en imposant une régulation hydroréglable ou fonction de l'occupation.

En climat tropical, l'air extérieur est souvent saturé en humidité, et le meilleur moyen pour éviter toute sensation de mouillure cutanée est l'augmentation des vitesses d'air par ventilation naturelle traversante ou brassage mécanique de l'air.

Dans le cas contraire, un taux d'humidité trop faible est souvent dû à un renouvellement d'air trop important l'hiver et entraîne l'assèchement des muqueuses et une diminution de la résistance aux bactéries. Une solution est d'humidifier l'ambiance par des systèmes adaptés (humidificateur dans la centrale de traitement d'air) ou en augmentant la présence de végétaux...

Problème 5: On note des problèmes de **surchauffe** dans le bâtiment. Avant de se préoccuper du système de climatisation, s'il y en a un, il paraît plus judicieux de mettre en œuvre des dispositions passives de rafraîchissement et surtout de limiter les apports : protections solaires (réglables individuellement), limitation des puissances dissipées par les équipements électriques, la liberté laissée aux occupants d'adapter leur tenue vestimentaire (*cool business*), préférer une ventilation traversante qu'un système de climatisation, adopter une surventilation nocturne...

Certains cas particuliers (hôpitaux par exemple) imposent une rigueur exemplaire et l'adoption d'une centrale de traitement d'air est souvent indispensable.

La conception des bâtiments neufs

La volonté de construire des bâtiments énergétiquement performants est aujourd'hui courante et passe souvent avant la prise en compte du confort thermique. Il n'est pas anodin de constater des problèmes de surchauffe dans les maisons passives, des problèmes de relance du chauffage dans des bâtiments très inertes à occupation intermittente, des systèmes de chauffage non adaptés au climat, etc. Ainsi, la prise en compte de l'occupant lors de la conception de bâtiments est à l'heure actuelle un défi qu'il est indispensable de mener afin de trouver le juste compromis entre confort thermique et dépenses énergétiques.

La simulation dynamique des bâtiments est un outil incontournable (par exemple, avec les logiciels TRNsys, Pléiades+Comfie, Design Builder, etc.) afin d'anticiper les performances du bâtiment pour les optimiser.

Elle peut en outre jouer un rôle considérable quant à la prise en compte de la régulation physiologique et comportementale de l'occupant. L'intégration d'un modèle numérique de physiologie éventuellement couplé à un régulateur comportemental permet de prévoir la sensation thermique et l'action qui en découle : ouverture des fenêtres, changement de tenue vestimentaire, modulation de la consigne, etc. Cette action peut avoir un impact considérable sur les consommations énergétiques du bâtiment. En ambiance chaude, un contrôle des ouvertures et des stores peut souvent éviter le déclenchement de la climatisation. Au Japon, la liberté laissée aux employés de bureau d'adapter leur tenue vestimentaire a permis une économie de 17% sur les besoins de climatisation.

Ainsi, une telle solution permet d'intégrer l'habitant dans son habitat et de vérifier la cohérence du projet (hypothèses en termes de systèmes énergétiques, choix de parois, proportions de surfaces vitrées) et d'optimiser le dimensionnement des installations.

La qualité d'une ambiance thermique étant habituellement évaluée comme un pourcentage de temps où la température dépasse une valeur limite (28°C en été) ou en vérifiant le respect d'une consigne de chauffage (19°C), l'intégration d'un modèle de physiologie et d'un régulateur comportemental est particulièrement bien appropriée à l'étude du confort thermique des bâtiments.

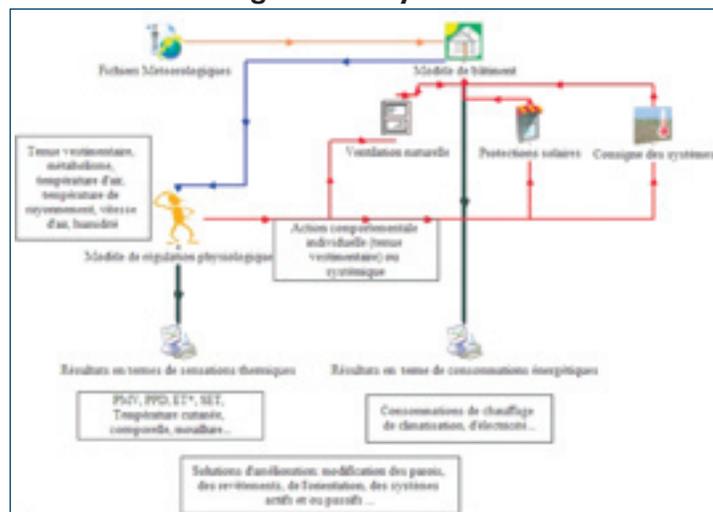
Des méthodes de construction comme le choix des matériaux, le choix des revêtements de paroi, la mise en place de protections solaires, l'orientation du bâtiment et des vitrages, des solutions de refroidissement passif, le choix de l'émetteur de chaleur et/ou de fraîcheur sont autant de critères pouvant être optimisés en termes d'économies d'énergie et d'amélioration du confort.

Tableau 2: Température préférée en fonction de la température moyenne mobile

(notée *trm*, *running mean temperature*) – Projet SCATs

	Méthode d'investigation n° 1		Méthode d'investigation n° 2	
	Trm < 10	Trm > 10	Trm < 10	Trm > 10
France	0,049 Trm + 22,58	0,206 Trm + 21,42	0,041 Trm + 21,29	0,188 Trm + 20,10
Grèce	–	0,205 Trm + 21,69	–	0,244 Trm + 18,89
Portugal	0,381 Trm + 18,12	–	0,45 Trm + 16,37	–
Suède	0,051 Trm + 22,83	–	0,061 Trm + 23,03	0,084 Trm + 22,24
Angleterre	0,104 Trm + 22,58	0,168 Trm + 21,63	0,047 Trm + 21,10	0,188 Trm + 19,55
Moyenne	22,88	0,302 Trm + 19,39	21,61	0,267 Trm + 18,88

Figure 2: Exemple de plate-forme de simulations sur le logiciel TRNsys



Résultats attendus et stratégies de mise en œuvre

La stratégie principale à mettre en œuvre consiste à fixer les indicateurs les plus représentatifs du confort en fonction des contraintes climatiques (intérieures et extérieures). Certains indices sont plus adaptés que d'autres selon les conditions étudiées : en climat chaud, on utilisera les indices liés à la mouillure cutanée et sensibles à l'humidité. Dans des bâtiments naturellement ventilés, le « Draught Risk » permet d'anticiper l'impact des vitesses d'air sur le confort. Le PMV et le PPD restent pertinents dans des conditions stables et homogènes, et particulièrement en zone tempérée. Connaître la proportion de chaque échange thermique permet de déceler lequel est prioritairement moteur et ainsi anticiper la stratégie à mettre en œuvre. La température cutanée (locale ou globale) est un indicateur fort dans la mesure où elle est reliée à une sensation thermique. De nombreux indices établis expérimentalement sont disponibles dans la littérature et s'adaptent à des cas particuliers.

Dans le cas de rénovation et d'audit de bâtiments, le couplage de mesures expérimentales à des questionnaires individuels permet non seulement de déceler la source de l'inconfort mais également d'établir une relation de cause à effet entre variables physiques et sensations thermiques : c'est ainsi que de nouveaux indices peuvent être construits.

Dans le cas de projets de construction, la simulation numérique est le meilleur moyen d'anticiper l'ambiance thermique du bâtiment.

Par la suite, il convient de déduire de cette première analyse quelle est la variable la plus sensible et dans un second temps, quelle est la source d'inconfort qui y est liée. Que ce soit pour un projet de construction ou de rénovation, la démarche est la même à la différence que dans le premier cas, la stratégie consiste en l'optimisation du projet et dans le second cas, en son amélioration. En construction, l'enquête et la campagne ne pourront se faire qu'après la réception des travaux et permettront de valider les hypothèses.

La stratégie développée aboutit en la proposition de solutions techniques à toutes les échelles : architecture, enveloppe, système, régulation, fonctionnement (action comportementale), etc.

Les résultats attendus sont multiples :

- Amélioration des conditions de vie et de travail dans les bâtiments. Ceci se traduit par un meilleur accueil des occupants et une volonté accrue de ces derniers de s'y rendre.
- Optimisation de l'efficacité énergétique des bâtiments. Fixer justement les objectifs en termes de confort permet d'éviter tout gaspillage d'énergie.
- Mise au point d'une démarche d'amélioration continue de la conception de bâtiments efficaces et confortables adaptés à leur utilisation et à leur environnement.
- Mise au point d'équipements ou de concepts énergétiques en adéquation avec les objectifs énergétiques et de confort.

Conclusion

Dans les années 1970, face à une croissance démographique et économique importante, la nécessité de construire rapidement des bâtiments pour tout usage a entraîné la perte de l'équilibre qui régnait entre l'homme et son habitat. Les conséquences se traduisent par la construction de bâtiments standardisés, inadaptés, énergivores et inconfortables. À l'heure où les défis énergétiques deviennent une priorité, il devient décisif non seulement de repenser notre façon de construire mais également de rénover un parc immobilier vétuste. Les solutions proposées par des démarches environnementales ou des standards de construction (par exemple : maison passive, minergie, etc.) sont tout à fait intéressantes et le couplage avec des études de confort thermique les fortifie. L'objectif de proposer des habitations confortables et énergétiquement performantes est alors tout à fait accessible.

Références

- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005. *ASHRAE Handbook. Fundamentals. Chapter 8 Thermal Comfort*. S.I. Edition, supported by ASHRAE research.
- CVC, la revue des climaticiens. n° 822, mars-avril 2003.
- De Herde, A. et A. Liébard, 2005. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique: concevoir, édifier et aménager*. Éditions Le moniteur.
- Fanger, P.O. 1972. *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Book Company.
- Gagge, J.A.J., 1973. *Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation*. Federation proceedings. 32(5):1572-82.
- Gagge, A.P., J.A.J. Stolwijk et Y. Nishi, 1995. *An effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response*. In: Ergonomics and Human factors II, Edward Elgar Publishing Ltd.
- INNOVA, Air Tech Instruments. *Thermal Comfort*, http://www.lumasense.dk/Thermal_Comfort.indoor_climate.0.html
- ISO 7726, 1998. *Thermal Environments-Instruments and Methods for measuring physical quantities*.
- ISO 7730, 1995. *Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*.

- NF EN 1525, 2007. *Critères d'ambiance intérieure pour la conception et l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique.*
- Nicol et al., 2000. *Smart Controls and Thermal Comfort Project.* Oxford Brookes University.
- Parsons, K.C., 1993. *Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. The principles and the practice.* Taylor&Francis.
- Stolwijk, J.A.J. et J.D. Hardy, 1977. *Control of body temperature.* Handbook of physiology, Section 9: Reaction to environmental agents. DHK Lee, ed. Williams & Wilkins, Baltimore, p. 45-68.
- Stolwijk, J.A.J., 1970. *Mathematical model of thermoregulation.* In: Physical and Behavioural Temperature Regulation. Eds J.D. Hardy et al., Springfield.

Thèses et recherches :

- <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/2007/moujalled/these.pdf>
<http://www.afsctet.asso.fr/resSystemica/Paris05/cantin.pdf>

Méthodologies :

- <http://atmos.es.mq.edu.au/~rdeedear/pmv/>
http://www.esru.strath.ac.uk/Reference/concepts/thermal_comfort.htm
<http://www.learn.londonmet.ac.uk/portfolio/1996-1998/mulcom.shtml>

Autres informations :

- <http://www.minergie.ch/fr/>
<http://www.maisonpassive.be/>
<http://www.assohqe.org/>
<http://phase.ups-tlse.fr/>

Étude de cas

Comparaison du confort de deux collèges dans la région de Sedjoumi (Tunisie) en vue de la mise en place d'une réglementation thermique

Raisons du projet

Depuis que la balance énergétique nationale de la Tunisie est devenue déficitaire (depuis les années 1990), une stratégie globale d'économie d'énergie est devenue indispensable. Cette dernière passe inévitablement par la mise en place d'une réglementation thermique et énergétique dans le secteur du bâtiment. Afin d'entreprendre un tel projet, le gouvernorat de Tunis, en partenariat avec l'ANER (Agence Nationale des Énergies Renouvelables), a amorcé la construction de deux bâtiments publics bioclimatiques caractéristiques des problèmes énergétiques rencontrés le plus fréquemment dans le pays.

L'objectif est de proposer des bâtiments énergétiquement performants tout en respectant des conditions de confort exemplaires et d'en retirer une expérience riche en matière de constructions neuves. Les principales motivations étaient la mise en place de solutions reproductibles tant au niveau technique que financier.

Le suivi expérimental de ces deux opérations permet de valider les choix effectués et d'en tirer des recommandations techniques pour la future réglementation.

Description

Cette étude de cas présente le suivi post-réalisation du collège de Sidi Hassine. Pour ce faire, les performances du collège, dit « bioclimatique », ont été comparées à celle d'un autre collège, dit « témoin », situé à 3 km et présentant donc les mêmes contraintes (climat, occupation, charges internes, niveau de confort, etc.).

Le suivi a été réalisé par une équipe de l'Unité de Recherche en Thermique du Bâtiment et Énergie Solaire de l'ENIT (École Nationale des Ingénieurs de Tunisie) et vise les objectifs suivants :

- Établir une étude comparative entre les deux bâtiments ;
- Étudier le confort thermique à l'intérieur des bâtiments ;
- Proposer des améliorations aux concepts retenus pour ces bâtiments.

La démarche passe tout d'abord par un suivi instrumenté dans différentes zones thermiques des deux collèges, et ce, durant 4 mois de l'année à raison d'un mois par saison (octobre, février, avril et juin). Cette instrumentation garantit la mesure des

températures de l'air, humides et globales. L'ensemble des données est ensuite collecté pour traitement.

Cette campagne de mesure est couplée à une enquête auprès des utilisateurs du bâtiment. Un questionnaire fourni à ses derniers permet de juger leurs sensations et préférences (échelle à 7 points) et de répertorier les conditions dans lesquelles ils ont voté (habillement, moyens de contrôle de l'ambiance, mouvement d'air, etc.). À partir de là, une comparaison des températures mesurées et des votes de sensations est réalisée entre les deux bâtiments et des corrélations « sensation en fonction des températures » sont établies.

La dernière étape consiste à la modélisation numérique du bâtiment dit bioclimatique. Après la validation de ce modèle par rapport aux mesures de températures, des simulations dynamiques paramétriques sont effectuées afin d'évaluer la pertinence de solutions telles que la ventilation nocturne, les pare-soleil, les surfaces de fenêtre, le choix des matériaux etc. Les corrélations obtenues lors de la campagne de mesures permettent d'obtenir des notes de sensation à l'issue de ces simulations.

Stratégie de mise en œuvre et financement

Face à la croissance démographique et économique des pays du Maghreb, il devenait impératif de mettre en avant des solutions contribuant à l'amélioration des conditions de confort dans les bâtiments. Proposer ces solutions dans le cadre de bâtiments exemplaires était donc un défi que le GERES (Groupe Énergies Renouvelables, Environnement et Solidarités) a souhaité relever en élaborant un programme d'appui au Gouvernorat de Tunis, dans le cadre de la coopération décentralisée avec le département des Bouches du Rhône pour la réalisation de deux bâtiments bioclimatiques, dont le collège de Sidi Hassine. La conception de ces bâtiments a été amorcée par le GERES en collaboration avec les ingénieurs du bureau d'études BE Cabirol et Celaire et l'architecte G. Saurel. Le suivi technique, quant à lui, a été réalisé par l'ENIT et le GERES. D'un point de vue financier, le Conseil Général des Bouches du Rhône (France) et l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) ont facilité l'élaboration du projet. En fait, seuls les surcoûts liés à

Étude de cas (suite)

l'amélioration du confort thermique (persiennes, compositions des parois, pare-soleil, etc.) ont été financés par le gouvernement tunisien, à hauteur de 7,5% par rapport à l'investissement initial.

Résultats techniques et financiers

La principale difficulté était de trouver des solutions techniques valables toute l'année c'est-à-dire trouvant un juste compromis entre confort d'été et confort d'hiver. Comme tout bâtiment bioclimatique, cet objectif devait être atteint en limitant (voire excluant) tout système de chauffage et de climatisation.

Suite à l'enquête réalisée auprès des occupants, une note de confort est déterminée à partir de l'indicateur, noté PPS (*Predicted Percentage of Satisfied*), qui indique le pourcentage de personnes satisfaites. Le PPS est une note de confort de 0 à 100. Cette campagne expérimentale permet la comparaison du niveau de confort entre le bâtiment bioclimatique et le témoin. Par exemple, les températures estivales sont plus acceptables dans le bâtiment bioclimatique, ce qui se traduit par de meilleures notes de confort. Cela s'explique par une meilleure conception (persiennes, proportion de vitrages, géométrie, etc.). À partir de telles données, il est aisé de tirer des conclusions quant au niveau de confort des deux bâtiments. Un grand nombre de résultats est présent dans l'étude (autres saisons, autres zones thermiques) mais ne sont pas présentés dans le cadre de cette fiche par souci de simplicité.

La superposition des évolutions de température et des évolutions des notes de confort permet de tirer des corrélations pouvant être utilisées par la suite lors de simulations dynamiques paramétriques. Ces simulations sont effectuées sur le bâtiment bioclimatique et testent, en termes de confort, les solutions suivantes :

- Surfaces des fenêtres orientées au sud ;
- Pare-soleil ;
- Persiennes sur les fenêtres sud et moment opportun d'ouverture de ces dernières ;
- Ventilation intensive de nuit (réduite le jour) ;
- Compositions des parois.

Après validation de la modélisation (vérification des évolutions de température), différents scénarii sont simulés durant différentes périodes. Les meilleures notes de confort obtenues en été pendant la journée sont celles qui correspondent à la configuration suivante :

- Grandes fenêtres en façade sud ;
- Grands pare-soleil ;
- Persiennes sur les fenêtres sud (fermées le jour, ouvertes la nuit en été, inversement en hiver) ;
- Ventilation intensive les nuits d'été, ventilation réduite le jour.

À partir de là, une optimisation de la composition des parois est réalisée de la même manière en testant les scénarii suivants :

- Isolation supplémentaire des murs extérieurs de 4 ou 5 cm ;
- Isolation supplémentaire de la toiture de 4 ou 5 cm.

Les simulations montrent que l'isolation de la toiture permet une augmentation sensible du niveau de confort excepté pour l'hiver (diminution de la masse thermique et des apports solaires par conduction). L'isolation des murs extérieurs semblent par ailleurs inutiles, excepté en automne.

Certaines préconisations n'ont pas été mises en œuvre, par exemple l'isolation de la toiture. Ce projet a toutefois permis de conforter les acteurs tunisiens dans leur volonté de mettre en place une réglementation thermique de l'habitation et de soutenir la réalisation de bâtiments exemplaires.

Conclusion

Une telle étude semble confirmer la nécessité de tenir compte du confort de l'occupant lors de tout projet de constructions. Les moyens mis en œuvre dans ce cas sont tout à fait accessibles et complémentaires : la campagne expérimentale sert de base à l'étude dynamique et permet d'optimiser les solutions techniques par rapport aux sensations ressenties par l'occupant.

Références

Cette étude de cas a été rédigée grâce au soutien de l'équipe du GERES et particulièrement de M. Eric Buchet que je tiens à remercier pour son aide précieuse.

<http://geres.free.fr/>



Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF)

L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF). Il est né en 1988 de la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, cette action a été élargie à l'Environnement. Basé à Québec (Canada), l'Institut a aujourd'hui pour mission de contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement de partenariats dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF)
56, rue Saint-Pierre, 3^e étage
Québec (QC) G1K 4A1 Canada
Téléphone : (1 418) 692 5727
Télécopie : (1 418) 692 5644
Courriel : iepf@iepf.org
Site Web : www.iepf.org



50%
Imprimé avec des encres végétales sur du papier dépourvu d'acide et de chlore et contenant 50% de matières recyclées dont 15% de matières post-consommation.

Imprimé en janvier 2008

Les fiches techniques PRISME (Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie) sont publiées par l'IEPF.

Directeur de la publication :
Fatimata DIA Touré, directrice, IEPF

Comité éditorial :
Sibi Bonfils, directeur adjoint, IEPF
Jean-Pierre Ndoutoum, responsable de programme, IEPF

Supervision scientifique et technique :
Maryse Labriet, Environnement Énergie Consultants

Rédaction :
Frédéry Lavoye, en collaboration avec Françoise Thellier, laboratoire Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement, Université Paul Sabatier – Toulouse III, France
fredery.lavoye@gmail.com

Édition et réalisation graphique :
Communications Science-Impact