

6^{ème} congrès Européen de Science des Systèmes Paris
19-22 septembre 2005

Complexité du confort thermique dans les bâtiments

Dr R.Cantin, B. Moujalled, Dr HDR G. Guarracino

Chercheurs

Laboratoire des Sciences de l'Habitat, DGCB - URA CNRS 1652 - ENTPE

Rue Maurice Audin

69518 Vaulx en Velin Cedex - France

Tel. 04 72 04 70 31

richard.cantin@entpe.fr

bassam.moujalled@entpe.fr

Résumé : Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches statiques, simplifiant la complexité des phénomènes interactifs. Ainsi, les exigences constructives et les recommandations pour les concepteurs ne sont pas adaptées pour anticiper des ambiances thermiques changeantes. Elles favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment.

Or, le confort thermique désigne l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et le bâtiment. Complexe, il peut être décrit avec de nombreux paramètres physiologiques, psychologiques, physiques, quantitatifs ou qualitatifs, plus ou moins incertains et imprécis. Pluridisciplinaire, il est tout ce qui contribue au bien-être, et s'exprime par une sensation agréable procurée par la satisfaction de besoins physiologiques et l'absence de tensions psychologiques.

Une lecture systémique du confort thermique conduit à une caractérisation nouvelle de différents facteurs et mécanismes adaptatifs observés in situ. Cette approche systémique permet la représentation de la dynamique du confort et une élaboration des caractéristiques structurelles d'un modèle dynamique.

Dans cet article, un état de l'art des approches statiques du confort thermique est présenté, montrant les limites des démarches analytiques. Puis, à partir des résultats de différentes études des ambiances intérieures, les principaux mécanismes complexes du confort thermique, observés in situ, sont décrits. Enfin, nous montrons comment une approche systémique permet une investigation nouvelle du confort thermique permettant une modélisation susceptible de donner lieu à une simulation dynamique.

Abstract : *Complexity of thermal comfort in buildings*

Currently, buildings thermal comfort is considered by methods and tools emerged from static approaches that simplify the complexity of interacting adaptive phenomena. Thus, buildings designers do not dispose requirements and recommendations adapted for dynamic thermal environment. Such requirements lead to oversize climatic equipments (heating, ventilation and air conditioning), main source of energy consumption and greenhouse gas emission in buildings sector.

However, thermal comfort is concerned by the multiple interactions between occupant and building. As complex, it can be described by many uncertain variables, quantitative or qualitative, and of different nature (physiological, psychological, physical).

A systemic approach of the thermal comfort can lead to a new characterizing of various factors and adaptive mechanisms that were observed in field. This systemic approach allows the representation of comfort dynamics and the development of the structural characteristics of a dynamic model.

In this article, a state of the art of thermal comfort approaches is presented, showing the limits of the analytical methods in buildings. Then, we will describe the main complex thermal comfort mechanisms that were observed in field. Finally, using the systemic approach, we will show its capacity in representing the complexity of thermal comfort, contributing hence to a dynamic model that can allow dynamic simulation in future prospects

1 Introduction

La définition du confort thermique dans les bâtiments est importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance. Or l'énergie utilisée pour chauffer, ventiler ou climatiser les bâtiments représentent la majorité de l'énergie consommée par ce secteur, un secteur qui à lui seul, utilise 45 % de la consommation d'énergie finale en France, et est responsable du quart des émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre [ADEME].

Avec les préoccupations grandissantes du développement durable, le secteur du bâtiment doit répondre à deux exigences primordiales : maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur, tout en assurant des ambiances intérieures saines et confortables. Ainsi, une vision globale du confort thermique qui tient compte de sa pluridisciplinarité est indispensable. En fait, physiologie, physique, psychologie et sociologie sont tous des domaines qui interviennent, dans une certaine mesure, lors de la définition du confort thermique.

Le confort thermique est souvent défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique [ISO 7730: 1994]. L'homme étant homéotherme¹, il doit assurer en continu son équilibre thermique. Pour cela, il dispose d'un système de thermorégulation qui lui permet de régler les échanges de chaleur avec son environnement, en exerçant des réactions conscientes (adaptation comportementale) et inconscientes (vasomotricité, frisson et sudation). Avec un bilan thermique global nul, le corps humain assurera son équilibre thermique. La neutralité thermique résulte d'un équilibre thermique obtenu par peu (ou aucune) de réactions physiologiques [Bruant]. Toutefois, cette neutralité thermique ne correspond pas nécessairement au confort thermique. Au delà des facteurs physiques et physiologiques qui régissent la sensation thermique, d'autres facteurs d'ordre psychosociologiques influencent le confort thermique. En effet, la satisfaction perçue, par un occupant dans une ambiance donnée, s'exprime en fonction de l'accord entre les conditions thermiques actuelles dans le bâtiment (satisfaction obtenue) et celles qui correspondent aux attentes de l'occupant (satisfaction anticipée) [Brager & de Dear].

2 Etat de l'art sur le confort thermique

Le confort thermique a été le sujet de nombreux travaux de recherche. Ils ne concernent pas uniquement les bâtiments, mais aussi les moyens de transport (voitures, avions) ou les lieux de travail sous des conditions extrêmes.

En ce qui concerne les bâtiments, le domaine de recherche sur le confort thermique est partagé entre deux approches. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique. Elle n'est pas restreinte aux bâtiments. La deuxième approche, basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments, est l'approche adaptative.

2.1 Approches analytiques (statiques)

L'approche analytique du confort thermique est basée sur le calcul du bilan thermique du corps humain, par des modèles physiques et physiologiques essentiellement. L'objectif est de prédire la sensation thermique des occupants afin d'identifier les conditions de confort thermique. Pour déterminer les grandeurs physiologiques de l'individu (température cutanée, température interne et mouillure cutanée), des modèles physiologiques du système de thermorégulation ont été développés. Des modèles physiques sont aussi utilisés pour calculer

¹ Homéotherme : dont la température centrale est constante et reste indépendante de celle du milieu extérieur.

les échanges de chaleur entre l'occupant et son environnement (conduction, convection, rayonnement et évaporation).

Ces modèles utilisent comme variables d'entrée les grandeurs physiques de l'ambiance thermique (température d'air, température de rayonnement, humidité d'air et vitesse d'air), ainsi que les caractéristiques de l'individu (taille et poids de l'individu, production de chaleur métabolique, caractéristiques des vêtements...). En sortie sont proposés des nombreux indices qui prévoient la sensation thermique ou le niveau de confort pour les conditions étudiées.

Les différents modèles développés se différencient au niveau de la modélisation physiologique de la thermorégulation. Certains modèles ont été déterminés expérimentalement dans des chambres climatiques avec des individus sous des conditions homogènes et stationnaires. D'autres modélisent le corps humain en le découpant en plusieurs compartiments. Ces modèles ont l'avantage d'être applicables sous des conditions instationnaires. Par contre, l'hétérogénéité des conditions dans l'espace est plus ou moins prise en compte selon le nombre de compartiments considérés dans le modèle.

Dans les bâtiments, les modèles du confort thermique les plus couramment utilisés sont celui de Fanger [ISO 7730: 1994], le PMV (vote moyen prévisible), et celui de Gagge [ASHRAE Handbook], le SET (température effective standard). Le modèle de Fanger a servi de base pour la norme internationale ISO 7730 qui porte sur les conditions de confort dans les ambiances thermiques modérées, et celui de Gagge pour la norme américaine ASHRAE standard 55 qui lui aussi précise les conditions de confort thermique dans les bâtiments.

2.1.1 Le modèle de Fanger

Fanger a déterminé expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et sudation) nécessaires pour le confort thermique sous des conditions thermiques homogènes et stationnaires. En écrivant le bilan thermique, il a exprimé, à l'aide de l'indice PMV, la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui qui correspondent aux conditions de confort. Le PMV exprime la sensation thermique moyenne éprouvée par un large groupe d'individus sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (fig. 1).

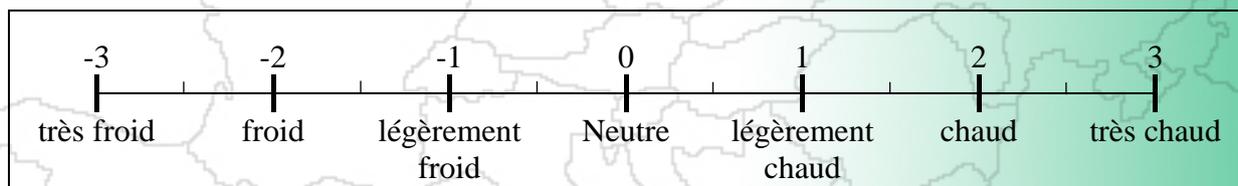


Figure 1. Echelle de sensation thermique de l'ASHRAE

La sensation thermique n'étant pas suffisant pour exprimer le confort, Fanger a proposé un autre indice qui complète le PMV, le « PPD » (pourcentage prévu des insatisfaits). Cet indice permet de prévoir le pourcentage des insatisfaits à une sensation donnée.

2.1.2 Le modèle de Gagge

Pour ce modèle, Gagge a modélisé le corps humain en deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et la peau. Le modèle est une version simplifiée de celui développé par Stolwijk et Hardy pour la NASA [ASHRAE Handbook]. Contrairement au modèle statique de Fanger, ceci est un modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires.

En sortie du modèle, la température cutanée et la mouillure cutanée sont utilisées pour le calcul d'un indice développé par Gagge, le SET. Cet indice représente la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet portant une vêtue standard échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même

réponse physiologique que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Cet indice est ainsi associé au confort thermique.

2.2 *Approche adaptative*

Si l'approche analytique cherche à déterminer les conditions du confort thermique par des modèles physiques et physiologiques qui prévoient l'état thermique du corps humain, une autre approche a été développée pour le confort thermique dans les bâtiments.

Cette approche est basée sur les constatations des investigations menées dans des bâtiments in situ. Il s'agit de construire une large base de données sur les conditions thermiques qui règnent dans différents types de bâtiment, pour différents climats et régions, par la mesure des grandeurs physiques de l'ambiance thermique. Ces mesures sont accompagnées simultanément par les réponses subjectives des occupants sur la qualité de leurs ambiances thermiques. Les occupants indiquent, au moment de la mesure, leurs sensations thermiques sur l'échelle de l'ASHRAE (fig. 1). Cette base de données est ensuite analysée par les méthodes de la statistique afin de déterminer la température ou une combinaison de variables (température, humidité et vitesse d'air) jugée neutre ou confortable par les occupants, ce qui permet de déterminer, par la suite, les conditions de confort thermique dans d'autres bâtiments dans des circonstances similaires.

Cette approche a commencé à susciter plus d'intérêt lorsque les chercheurs ont montré qu'en appliquant les indices établis par l'approche analytique à leur base de données, le confort prévu ne correspondait pas toujours au confort perçu par les occupants. L'écart était plus marqué dans les bâtiments non climatisés que dans ceux climatisés. En effet, les conditions dans ces derniers s'approchent souvent des conditions statiques des chambres climatiques qui ont servi pour développer les outils de l'approche analytique. Par contre, dans les bâtiments non climatisés, les conditions sont dynamiques et suivent les changements dans le climat extérieur. La plage de confort trouvée dans ces bâtiments est plus large que celle donnée par les outils de l'approche analytique [Nicol & Humphreys].

Pour expliquer ces résultats, certains chercheurs ont adopté la thèse de l'adaptation selon laquelle des facteurs en dehors de la physique et la physiologie influencent la perception du confort thermique [Nicol & Humphreys]. Il s'agit du contexte dans lequel se déroulent les études, notamment le climat, la région et le type du bâtiment. En effet, au lieu de subir les conditions de son ambiance, l'occupant réagit en s'adaptant à son ambiance. Cette approche met en doute la causalité linéaire de l'approche analytique (physique \Rightarrow physiologie \Rightarrow confort). L'adaptation s'exprime par des boucles de rétroaction qui se met en œuvre face à une situation d'inconfort. Ces boucles peuvent être les réactions comportementales, l'acclimatation, l'accoutumance ou les attentes des occupants.

Ainsi, dans un bâtiment offrant plus de moyens d'adaptation (ouverture de fenêtres, ventilateur, store...), un occupant aura plus de possibilités de se trouver dans une situation de confort. Dans les chambres climatiques, les conditions d'ambiance ont été imposées aux individus, et, par suite, les conditions de confort établies ne tiennent pas compte de l'interactivité de l'occupant et sa capacité d'adaptation, ce qui est le cas aussi des bâtiments climatisés.

Les normes actuelles étant basées sur l'approche analytique, des algorithmes alternatifs ont été développés afin de rendre compte de l'adaptation, via l'exploitation statistique des bases de données. L'algorithme est de la forme d'une expression linéaire de la température de confort en fonction du climat extérieur. Ces algorithmes sont ainsi de la forme d'une boîte noire qui donne les conditions de confort en fonction du climat extérieur. Le projet européen SCATS [McCartney & Nicol] qui a porté sur le confort adaptatif dans les bâtiments, a contribué au développement de l'algorithme du contrôle adaptatif ACA avec une version adaptée pour chacun des pays participants. Aux Etats-Unis, le projet de recherche ASHRAE

RP-884 [de Dear & Brager] a lui aussi permis d'élaborer le standard du confort adaptatif ACS qui a été inclus dans l'ASHRAE standard55.

2.3 Constat sur les approches du confort thermique

Bien que l'approche analytique permette d'assurer les conditions de confort thermique dans les bâtiments, cela ne suffira pas pour répondre aux exigences du développement durable. La consommation énergétique doit être considérée au même titre que le confort. Or, avec des méthodes statiques telle que le PMV, la climatisation active risque d'être généralisée dans les bâtiments pour garantir le confort au détriment de la consommation énergétique. Ceci a été vérifié par les résultats des investigations dans les bâtiments non climatisés où les conditions de confort thermique trouvées étaient plus amples que celles recommandées par le PMV.

Les chercheurs se sont vite rendus compte des lacunes de l'approche analytique en multipliant leurs investigations dans les bâtiments. En développant l'approche adaptative, ils ont proposé un alternatif aux méthodes reprises par les normes, afin de prendre en compte la capacité d'adaptation des occupants. Mais les algorithmes développés sont de la forme d'une boîte noire et basées sur l'exploitation statistique des investigations, ce qui limitent leur validité à l'étendue des mesures réalisées.

3 Investigation systémique du confort

Les différentes approches actuelles du confort thermique ne permettent pas de représenter les différents états du confort thermique de l'individu dans les bâtiments. Le confort thermique est trop complexe pour comprendre facilement et anticiper les comportements. De la reconnaissance d'un grand nombre d'éléments différents et constitutifs du confort thermique naît un sentiment de complexité [Atlan].

Il ne s'agit plus de représenter le bâtiment occupé par une boîte noire (fig.2) où les mécanismes complexes du confort ne sont pas explicitement définis.

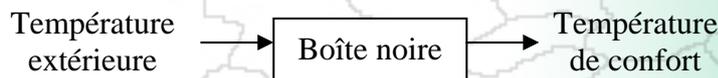


Figure 2. Représentation simplifiée du bâtiment

Une approche systémique conduit à caractériser le confort thermique à l'aide de deux sous-systèmes complexes en interaction: le bâtiment et l'occupant. Cet ensemble suggère une interface forte (fig.3) par un complexe d'échanges multidisciplinaires, dans leur nature et leur contenu, entre les sous-systèmes d'un macro-système plus large [Thiel].

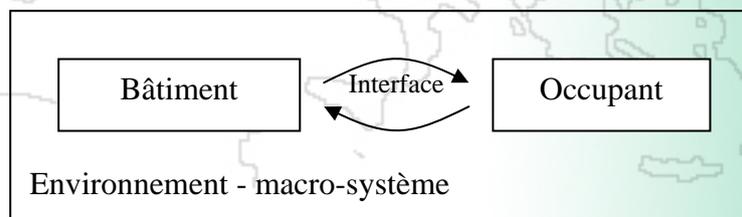


Figure 3. Notion d'interface forte

Le caractère ouvert de cet ensemble est assuré en considérant le bâtiment occupé inscrit dans un environnement englobant, qui est plus ou moins urbanisé, appartenant lui-même à l'écosystème planétaire traversé par les flux énergétiques solaires.

Le confort thermique désigne ainsi une interaction forte entre l'occupant et le bâtiment, plus riche que celle d'un simple voisinage décrit par un nombre limité d'équations physiques décrivant les transferts thermiques. Plusieurs configurations sont possibles:

- le bâtiment influence l'occupant;
- l'occupant agit sur le bâtiment;
- le bâtiment et l'occupant s'influencent mutuellement.

L'investigation des conditions de confort conduit alors à étudier des phénomènes où interagissent de multiples facteurs, et où se combinent des principes de régulation et de déséquilibre.

Ces deux systèmes peuvent être décrits selon le modèle canonique du système général [Le Moigne] et par les outils de la systémique avec une lecture structurelle et fonctionnelle. Des échanges de flux d'énergie, d'information et de matière sont identifiables entre ces deux systèmes complexes aux finalités différentes.

L'occupant, système thermorégulé, évolue ainsi dans cette ambiance intérieure. Pour le système "occupant", la frontière sera la peau et la vêtue, alors qu'elle sera l'enveloppe (murs verticaux et horizontaux) pour le système "bâtiment". L'ambiance intérieure du bâtiment constitue un environnement immédiat (ou le réseau de communication) dans lequel s'effectue les échanges de flux d'énergie, de matières (air, eau) et d'informations, entre l'occupant et le bâtiment. Les composants des deux systèmes ont de nombreuses finalités: stockage d'énergie, de matières, et d'informations, production, distribution et émission d'énergie, transformation des produits et matières (air, CO₂, H₂O, etc.), contrôle et régulation des échanges.

Plusieurs points de vue, correspondant aux objectifs de l'étude du confort thermique, peuvent être retenus pour une lecture systémique du confort. Du point de vue physiologique, le fonctionnement des différents organes et l'activité musculaire de l'individu, nécessitent une dépense énergétique continue, le métabolisme.

Du point de vue physique, le maintien de l'homéothermie pour l'individu implique que la quantité de chaleur produite par le métabolisme et reçue de l'environnement extérieur bâti soit égale à la quantité de chaleur cédée à l'environnement par l'individu. Ainsi, les échanges de chaleur se font par différents modes de transfert thermique (conduction, convection, rayonnement et évaporation) et sont identifiables à la frontière du système occupant, c'est-à-dire à la surface de la peau avec une régulation vestimentaire, et par les voies respiratoires avec un débit respiratoire.

Du point de vue psychophysique, les flux d'information, en provenance des différents récepteurs sensoriels et de la mémoire, permet au système occupant d'identifier l'environnement et son état, de décrire des sensations et d'apprécier ou non ses propres états successifs. Les sensations thermiques dépendent de chaque individu, sont variables dans le temps, et se caractérisent par des seuils et des intensités. Par exemple, la sensation thermique, en régime dynamique, dépend de la température de la peau, de sa vitesse de variation, de la température ambiante et des flux d'énergie échangés à travers la frontière du système, la peau.

4 Eléments de modélisation dynamique du confort

L'étude du comportement de l'occupant qui recherche le confort thermique dans le bâtiment met en évidence une organisation dynamique avec existence de relations causales circulaires. Cette organisation est décrite en s'intéressant aux flux qui la régulent, plutôt qu'aux éléments qui la composent [Theil].

Les variables de niveau (niveau de prestations, de confort) décrivent l'état des systèmes par une intégration continue des résultats de l'action dans ces systèmes. Les variables de flux expriment l'action par des débits d'entrée et de sortie dans les niveaux. Il s'agit de débit ou quantité par unité de temps, par exemple, des flux énergétiques exprimés en kWh.

Les équations de flux définissent les politiques de décision dans les systèmes et interagissent sur les niveaux, donc sur les états dans ces systèmes. Le principe de ces équations est de reconnaître en premier lieu un objectif local vers lequel la décision doit tendre (par exemple, avoir plus chaud ou plus froid). Puis l'état apparent est comparé à cet objectif pour détecter un éventuel écart utilisé pour guider une nouvelle action.

Le processus décisionnel en matière de confort thermique peut être représenté par une boucle élémentaire, la décision étant prise à l'intérieur d'une boucle de feedback en suivant une séquence logique. L'occupant traite les informations acquises sur le niveau de confort, en vue de produire des décisions. Celles-ci sont déclinées en actions qui modifient les taux d'entrée et de sortie des flux de chaleur. Il en découle des résultats en terme de niveau de prestations ou de confort (fig.4).

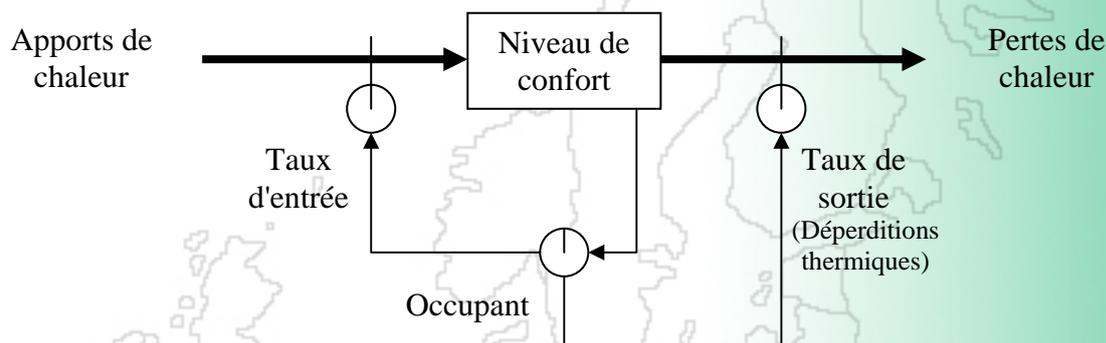


Figure 4. Exemple de représentation de la dynamique du confort

Les décisions de l'occupant ne sont pas prises instantanément, mais de façon progressive et successive. La méthode de la dynamique des systèmes permet cette prise en compte des délais qui se manifestent entre la décision et l'achèvement de l'exécution de cette décision.

Le principe des simulations de ce modèle élémentaire est le suivant [Theil]:

Les équations exprimant les variations de niveaux de confort sont des équations aux différences finies de la forme:

$$\text{niv}(t) = \text{niv}(t-1) - (\text{tauxentrée} - \text{tauxsortie}).dt \quad \text{avec un pas d'itération } dt$$

L'équation intégrale-différentielle correspondante est:

$$\text{niv}(t) = \text{niv}(t=0) - \int_{t=0}^t (\text{tauxentrée} - \text{tauxsortie}).dt$$

De cette modélisation dynamique, il apparaît que le modèle du confort thermique peut être représenté par un système auto-organisateur où l'occupant du bâtiment possède la capacité de modifier son comportement en fonction du niveau de confort, de son expérience et des transformations de son environnement (fig.5).

Le confort thermique concerne les interactions entre ces deux systèmes et les mécanismes d'adaptation liés aux différentes boucles rétroactives.

Parmi celles-ci, l'ajustement comportemental représente une liaison de rétroaction agissant, par exemple, sur le climat intérieur du bâtiment et sur la frontière vestimentaire entre les deux systèmes.

Les ajustements comportementaux englobent toutes les actions effectuées, consciemment ou non, par un individu pour modifier des flux d'énergie échangés avec l'environnement bâti. Ils peuvent être représentés en trois groupes d'ajustement: personnel (modification de la vêtue), technologique (ouverture ou fermeture d'une fenêtre, mise en marche d'un ventilateur), ou socioculturel (sieste aux heures chaudes).

Une autre boucle rétroactive, finalisant le confort thermique pour l'occupant, est l'acclimatation. Dans l'organisme, elle représente une liaison rétroactive inconsciente obtenue par médiation du système nerveux qui affecte le système physiologique de thermorégulation. Elle caractérise les changements dans les réponses physiologiques suite, par exemple, à une exposition prolongée dans un environnement thermique. L'acclimatation se distingue de l'adaptation génétique qui n'est pas observée sur la durée de vie de l'individu.

L'expérience thermique et la mémoire de l'individu affectent la sensation thermique par les attentes et l'accoutumance. Il s'agit d'une liaison agissant inversement à l'ajustement comportemental.

Dans ce cas, les facteurs psychologiques sont introduits dans l'étude des mécanismes d'adaptation pour prendre en compte l'altération de l'information sensorielle par le passé de l'individu et ses attentes. Elle peut être comparée à la notion d'habituation en psychophysiologie (l'exposition répétée à un stimuli diminue l'intensité de la réponse). La satisfaction d'un individu dépend des conditions thermiques qui existent dans cet environnement et de ce qu'il attend.

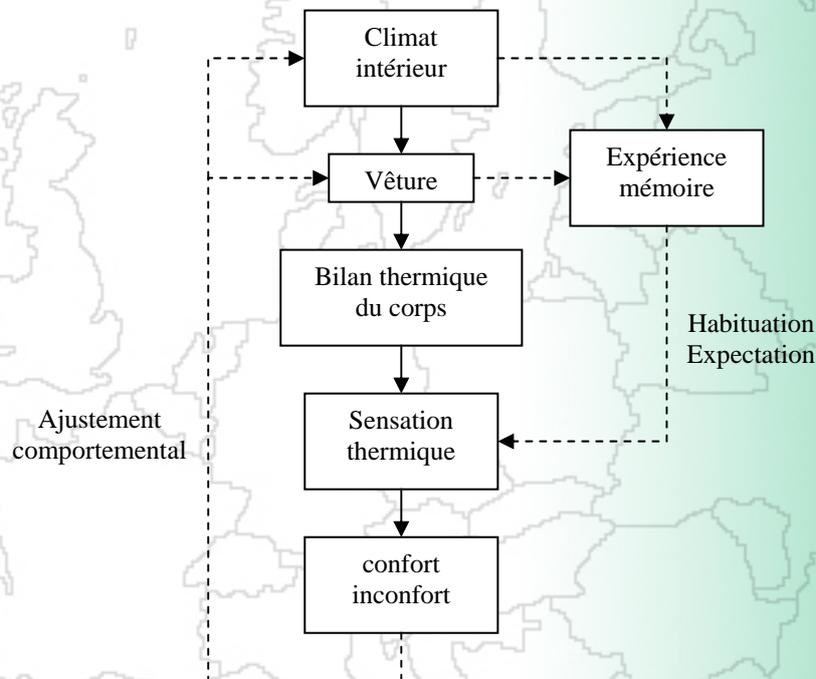


Figure 5. Caractéristiques structurelles d'un modèle du confort thermique

Ces liaisons rétroactives permettent de représenter les mécanismes adaptatifs liés au confort thermique observés in situ.

Ces éléments de modélisation montrent la possibilité d'élaborer un modèle dynamique du confort thermique à partir des caractéristiques structurelles proposées. Le développement du modèle ainsi initié doit se poursuivre à l'aide d'un logiciel de dynamique de systèmes.

5 Conclusion

Les représentations actuelles du confort thermique s'appuient sur des approches analytiques et statiques des conditions de confort pour l'occupant. Elles simplifient empiriquement la complexité pluridisciplinaire de la notion de confort, et négligent les interactions possibles

entre l'occupant et son cadre bâti. En raison de ces interactions, importantes lors de conditions climatiques changeantes ou extrêmes, les approches analytiques actuelles ne permettent pas d'anticiper la dynamique du confort observée in situ.

L'investigation systémique du confort conduit à proposer l'étude des interactions entre deux sous-systèmes complexes aux finalités différentes que sont l'occupant et le bâtiment. Cette approche fournit une nouvelle lecture du confort et des échanges de flux d'énergie, de matières et d'informations. Les différents points de vue permettent d'identifier les composants pluridisciplinaires, les variables de flux et les variables d'état, pour la construction d'un modèle dynamique du confort.

La représentation ordonnée des connaissances conduit à une analyse causale du confort thermique. Les processus décisionnels et les mécanismes adaptatifs liés à l'occupant du bâtiment peuvent être explicités par des boucles de rétroaction.

La dimension systémique de cette approche, décrite dans cet article, est complémentaire des approches analytiques déjà mises en oeuvre. Elle conduit à l'élaboration des caractéristiques structurelles d'un modèle offrant la possibilité d'élaborer une véritable simulation dynamique des phénomènes adaptatifs liés au confort thermique.

6 Références bibliographiques

- ADEME. (1999). *Les Chiffres Clés du Bâtiment: Données et Références*. Ademe.
- ASHRAE Handbook. (1997). *ASHRAE Handbook of Fundamentals. Chapter 8 : Thermal comfort*. ASHRAE Atlanta.
- ATLAN Henri. (1979). *Entre le cristal et la fumée*. p79. Le Seuil. Paris.
- BERTALANFFY Ludwig von. (1973). *Théorie générale des systèmes*. Bordas.
- BRAGER Gail S., de DEAR Richard J. (1998). *Thermal adaptation in the built environment : a literature review*. Energy and Buildings 27 (1).
- BRUANT Marc. (1997). *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance*. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. Lyon.
- CROZIER Michel & FRIEDBERG Erhard. (1977). *L'acteur et le système*. Le Seuil.
- de DEAR Richard J., BRAGER Gail S. (2002). *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55*. Energy and buildings 34 (6).
- DONNADIEU Gérard & KARSKY Michel. (2002). *La systémique, penser et agir dans la complexité*. 269 p. Editions LIAISONS. Rueil-Malmaison.
- DURAND Daniel. (1979). *La systémique*. PUF.
- ISO 7730:1994, *Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique*. AFNOR. Paris.
- KARSKY Michel. (1991). *What is to be done?* Revue Internationale de Systémique. AFCET, Dunod. p109-117.
- KARSKY Michel. (1991). *La dynamique des systèmes* in Deuxième école européenne de systémique. Mont Saint Odile (Strasbourg). Paris. AFCET; p 191-210.
- KARSKY Michel (1997). *La dynamique des systèmes complexes. Séminaire de dynamique des systèmes complexes et simulation*. Nantes: Ecole Nationale d'Ingénieurs des Techniques des Industries Agricoles et Alimentaires. 45 p.
- LABORIT Henri. (1974). *La nouvelle grille*. Robert Laffont.
- LE GALOU F. & BOUCHON-MEUNIER B. (1992). *Systémique, théorie et applications*. Lavoisier.
- LE MOIGNE Jean-Louis. (1984). *La théorie du système général*. PUF. Paris
- LE MOIGNE Jean-Louis. (1990). *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod. Paris

- McCartney Kathryn J., Nicol J. Fergus. (2002). *Developing an adaptive control algorithm for Europe*. Energy and buildings 34 (6).
- MORIN Edgar. (1977). *La méthode. La nature de la nature*. Le Seuil.
- NICOL J. Fergus, HUMPHREYS Michael A. (2002). *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*. Energy and buildings 34 (6).
- ROSNAY Joël de. (1975). *Le macroscope - Vers une vision globale*. Le Seuil. Paris
- THIEL Daniel. sous la direction. (1998). *La dynamique des systèmes*. 317 p. Hermes. Paris.
- WALLISER B. (1977) *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes*. Le Seuil. Paris.

