

# Perception de la qualité des ambiances intérieures soumises à des transferts thermo-aérauliques

Frédéry Lavoye, Françoise Thellier, Sandra Spagnol, Bérangère Lartigue

Université de Toulouse – Université Paul Sabatier - Laboratoire PHASE  
Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement  
118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9  
[fredery.lavoye@gmail.com](mailto:fredery.lavoye@gmail.com) ; [thellier@cict.fr](mailto:thellier@cict.fr)

---

*RESUME.* Cette étude a pour objectif de développer des méthodes d'analyse de « confort thermique » dans le contexte de constructions actuelles répondant à des objectifs d'économie d'énergie : maisons passives, très isolées, peu inertes et chauffées par air, ou bâtiments tertiaires en climat chaud rafraîchit naturellement par ventilation transversale et brassage d'air. Ces méthodes passent par le développement d'une plate forme de simulation thermique dynamique intégrant non seulement la modélisation du bâtiment et de ses systèmes mais aussi l'occupant en termes de régulation thermo physiologique et comportementale. Elles montrent que l'intégration de l'habitant dans son habitat dans une étude énergétique est tout à fait accessible et offrent la possibilité d'évaluer la performance d'un projet également en termes de qualité de l'ambiance grâce au calcul d'indicateurs appropriés à chaque cas.

*MOTS-CLÉS :* Plate forme de simulation, jugement thermo-sensoriel, thermorégulation humaine.

---

*ABSTRACT.* The aim of this study is to develop a method to analyse "thermal comfort" in the specific cases corresponding to nowadays buildings: passive houses, with high insulation, low inertia and air-heating system or service sector buildings in warm climate, naturally cooled by cross-ventilation and air motion. These methods are built with the development of a dynamic simulation desk which takes into account the building and its systems and also the occupant in terms of thermo physiological and behavioral regulation. The integration of the inhabitant in his habitat in an energy study is thoroughly realistic and permits the evaluation of the efficiency of a project in terms of thermal sensation. This efficiency is measured with appropriate indicators.

*KEYWORDS:* Simulation desk, thermal judgment, human thermoregulation.

---

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. COMMENT EVALUER LA QUALITE D'UNE AMBIANCE ?

Le corps humain est un système thermique complexe régulé, en toutes conditions climatiques, à une température interne voisine de 37°C. Pour garantir cette homéothermie, le bilan thermique du corps humain doit être équilibré, entre la chaleur qu'il produit et les transferts thermiques avec l'environnement. La qualité thermique d'une ambiance peut alors être évaluée à partir de ce bilan thermique et donc tous les phénomènes qui le composent. La chaleur nette produite par le corps, ou métabolisme, dépend de l'activité du sujet donc du contexte, de même que sa tenue vestimentaire. Par ailleurs les données climatiques : température, vitesse et humidité de l'air, et température moyenne de rayonnement, sont aussi des données indispensables à qualification d'une ambiance thermique.

De nombreux indices sont disponibles pour calculer a priori les sensations thermiques d'un individu en fonction des variables citées précédemment. Les plus connus sont le PMV (*Predicted*

*Mean Vote*), et le PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*) [norme ISO 7730]. Cependant, leur utilisation reste limitée à des ambiances modérées, stationnaires et homogènes c'est-à-dire une proportion infinitésimale des cas rencontrés dans le bâtiment. C'est avec précautions qu'ils seront utilisés.

A partir de la connaissance de la température d'air ( $T_a$ ), sa vitesse ( $v$ ) et éventuellement de son taux de turbulence ( $T_u$ ), le pourcentage de personnes insatisfaites d'un mouvement d'air, ou Draught Risk [ASH 05], peut être évalué par la formulation suivante :

$$DR = (3,143 + 0,3698.v.T_u).(34 - T_a).(v - 0,05)^{0,6223} \quad [1]$$

Ces indices dépendent exclusivement des données citées ci-dessus et ne prennent pas en compte les mécanismes de thermorégulation que le corps humain engendre en fonction des contraintes climatiques. Hors particulièrement en climat chaud l'apparition de sueur pas exemple peut permettre l'équilibre thermique, il est donc indispensable de pouvoir évaluer ces phénomènes.

### 1.2. LE MODELE DE THERMOREGULATION PHYSIOLOGIQUE A DEUX NŒUDS

Un modèle numérique de thermorégulation humaine issue du modèle de Gagge [GAG 88] est utilisé pour modéliser le comportement thermique du corps humain face aux contraintes climatiques en régime instationnaire. Le corps dans son ensemble est composé de deux compartiments isothermes. Les transferts de chaleur entre eux se font par conduction tissulaire et convection sanguine et les échanges avec l'extérieur sont alors calculés au niveau cutané. Ce modèle tient compte des réactions de thermorégulation physiologique tels que la modification du débit sanguin (vasomotricité), la sudation ou encore les frissons. Il permet ensuite d'obtenir toutes les variables thermo-physiologiques telles que la mouillure et la température de peau, ... qui sont représentatives de l'état thermique du sujet. A partir de ces grandeurs on peut alors déterminer les sensations thermiques perçues par les occupants. Ces sensations, liées aux températures cutanées, varient de -3 (très froid) à 3 (très chaud) où 0 est la thermo-neutralité sensorielle (ni chaud, ni froid). La sensation liée à la mouillure varie de 0 à 3. Les relations permettant ce calcul ont été développées lors d'études précédentes [GAL 91].

Les variables issues du modèle permettent en outre le calcul d'autres indices :

- La température effective,  $ET^*$  [GAG 88], qui est 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. Cet indice permet de calculer un nouveau  $PMV^*$  qui permet de tenir compte d'un régime transitoire et de mieux interpréter les effets de l'humidité en ambiance chaude.
- Le SET, (*Standard Effective Temperature*), permet de standardiser l'indice  $ET^*$  alors dépendant de la vêtue et de l'activité du sujet. Il permet de construire un indicateur de sensation variant de -3 (froid inacceptable) à 4 (chaud inacceptable).
- D'autres indices liées à la mouillure cutanée peuvent être calculés et permettent d'évaluer l'inconfort liée à cette dernière. On citera le rendement évaporatoire, le débit sudoral, l'indice DISC (de 0 à 5, de moins en moins agréable). [GAY 98]

### 1.3. L'APPROCHE ADAPTATIVE DU CONFORT THERMIQUE : LE REGULATEUR COMPORTEMENTAL

La régulation comportementale se traduit par des actions conscientes sur les commandes des systèmes énergétiques du bâtiment, le bâtiment lui-même ou encore des actions individuelles. Bien que les actions comportementales puissent être très variées, seules quelques actions simples sont prévues dans un premier temps. Ces actions sont limitées par des contraintes liées à la fonctionnalité du bâtiment (possibilité de régulation individuelle des systèmes, ouverture/fermeture des fenêtres...) ou sociales (protocole vestimentaire par exemple). Un régulateur comportemental est ensuite intégré dans la simulation. En fonction des sensations, une action est ou non enclenchée : modification des consignes, action sur les stores, l'ouverture des fenêtres...[END 06]

## 2. METHODOLOGIE DE SIMULATION

### 2.1. PRESENTATION DE LA PLATE FORME DE SIMULATION

Les différentes études sont réalisées avec le logiciel de simulation dynamique TRNsys. Ce dernier laisse une grande liberté quant à l'élaboration de nouvelles routines et à leur intégration dans la simulation. La méthodologie de simulation est la suivante :

- Modélisation du **bâtiment** : conditions météorologiques, géométrie, orientation, composition des parois, protections solaires, systèmes énergétiques ...
- Modélisation de l'**habitant** : intégration du modèle de thermorégulation physiologique et d'un régulateur comportemental. Des indicateurs de confort et la réaction comportementale de l'occupant sont ainsi appréhendés mais dépendent de la catégorie de conditions intérieures étudiées : chauffage de bâtiment passif, climat chaud dans un bâtiment non climatisé.

La figure 1 représente la méthodologie de simulation réalisée qui intègre tous les paramètres nécessaires à l'évaluation de la qualité des ambiances thermiques et des dépenses énergétiques.

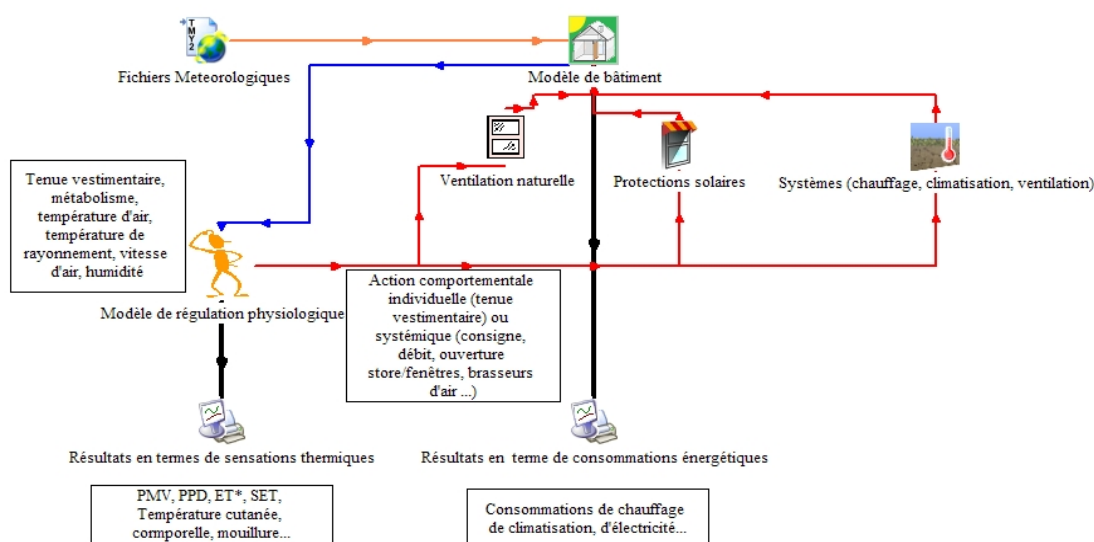


Figure 1 : schéma simplifié des liens entre les modules de la simulation

2.2. VALIDATION ET LIMITES DE LA SIMULATION

2.2.1. Validation du modèle de thermorégulation physiologique

Dans un premier temps après intégration du modèle de thermorégulation dans l'ensemble de la simulation les résultats ont été comparé dans des situations simples à ceux que l'on peut obtenir grâce à l'outil mis en ligne par De Dear [DED 08]. Cet outils ne permet que le calcul de l'évolution de l'état thermique du corps humain entre un état d'équilibre et des conditions constates fixes.

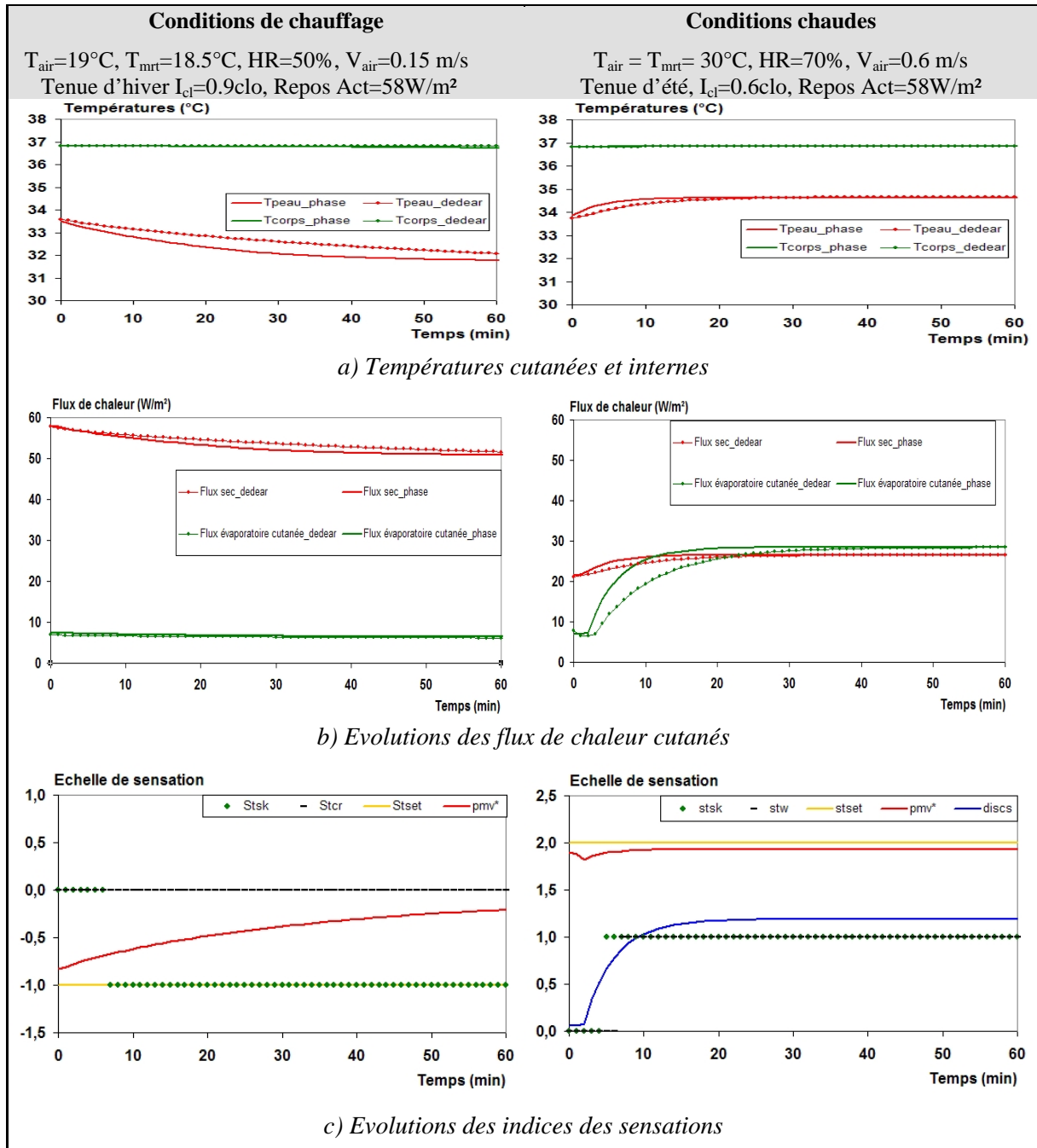


Figure 2: évolution des diverses variables thermo-physiologiques dans 2 conditions ambiantes

Sur les figure 2a) et 2b) on remarque une bonne corrélation entre les deux modèles. Les différentes évolutions tendent rapidement vers les mêmes valeurs. En ce qui concerne les flux de chaleur, on note une évolution plus rapide avec notre modèle, ceci s'explique en particulier par la modélisation de la couche vestimentaire qui diffère entre les deux modèles. On constate rapidement que selon le climat

les différentes variables n'ont pas du tout le même comportement, donc les outils de qualification doivent être différents.

**Conditions de chauffage :** Les indices de sensations les plus représentatifs de ce type d'ambiance sont les sensations basées sur les températures cutanées (Stsk), le PMV\* et la sensation liée à la SET (Sset). On note (fig.2c) que la sensation est plutôt froide quelque soit les indices, mais que le climat étant constant la Sset reste constante, alors que la Stsk varie en fonction de la température de peau et baisse au cours du temps. Par contre il semble étonnant que le PMV\* augmente alors que le sujet semble se refroidir.

**Conditions Chaudes :** La sensation est chaude (fig.2c) étant donné que le PMV\* et Sset sont égaux à 2 ce qui traduit une ambiance chaude inconfortable. La température cutanée (fig.2a) varie peu et ne peut donc pas être un bon indicateur on prendra alors dans ce cas les sensations calculées à partir de la mouillure, Stw ou Disc, qui sont plus représentatives du fait que le sujet transpire de manière à augmenter les pertes par chaleur latente et arrive à équilibrer son bilan thermique.

#### 2.2.2. Limite des simulations liées à l'aéraulique

Dans les configurations étudiées la principale difficulté concerne la détermination des profils de vitesse et de température d'air, car le risque majeur d'inconfort est lié à l'aéraulique. Comme on peut le noter sur la définition du Draught Risk il faut, en plus des deux variables précédentes, connaître le taux de turbulence, actuellement très difficile à calculer et rarement mesuré. Lors des simulations les profils utilisés sont évalués ; soit à partir de corrélations établies, par simulations CFD ou par expérimentations [GUE 08], soit directement issues de mesures faites sur le terrain.

Dans le cas de chauffage par air, nous supposons que le jet d'air provient de bouches rectangulaire ou circulaire. Le débit maximum étant de 60 m<sup>3</sup>/h, les vitesses de sortie sont de 0.93 m/s pour la bouche rectangulaire et 1.18 m/s pour la circulaire. Ces jets sont de type libre axisymétrique anisotherme vertical pour la circulaire et pariétal plan horizontal pour la rectangulaire. Les lois de décroissance sont de type gaussiennes et sont les mêmes pour la vitesse et la température ; seuls des coefficients correctifs les différencient. Les résultats montrent que la diffusion de ces jets d'air dans les conditions nécessaires à l'établissement d'une consigne de chauffage n'a que très peu d'impact dans la zone d'occupation. Dans le cas de la bouche rectangulaire, une zone d'air chaud est établit le long du plafond par effet Coanda : la décroissance de la vitesse et de la température en dehors de cette zone est assez rapide. En ce qui concerne les bouches circulaires, l'épaisseur du jet et sa diffusion sont faibles, d'autant plus que la température de soufflage est élevée et la vitesse faible. Dans les deux cas on note que pour une température moyenne de 19°C, des zones froides apparaissent ( $\pm 18^\circ\text{C}$ ) dans les coins du volume considéré. La vitesse quant à elle est faible dans la zone d'occupation ( $< 0.2\text{m/s}$ ) même lorsque l'on considère un fonctionnement à débit maximum.

### 3. PRESENTATION DES CONDITIONS ETUDIÉES

De manière à étudier des cas réels deux types de bâtiments dans deux climats différents sont analysés. Les méthodes de qualification d'ambiances sont alors différentes.

### 3.1. LOGEMENTS PASSIFS MICRO CONSOMMATEURS

**Présentation du bâtiment** : Ce logement respecte le standard passif, c'est-à-dire que ces besoins en énergie utile de chauffage sont inférieurs à 15 kWh/m<sup>2</sup>.an. Cet objectif est atteint grâce à : une forte isolation de l'enveloppe à ossature bois, une excellente étanchéité à l'air, un traitement efficace des ponts thermiques et la mise en œuvre d'une ventilation performante (ventilation double flux avec récupérateur de chaleur sur l'air extrait). Outre la dalle béton sur terre plein (isolée), le bâtiment a une inertie thermique très faible. Aux vues des faibles besoins de chauffage et du système de ventilation mis en œuvre, le chauffage par air devient une alternative tout à fait intéressante.

**Evaluation de l'ambiance** : Comme il s'agit d'une maison individuelle et que l'on s'intéresse aux situations de chauffage, on suppose que le sujet a une activité légère et qu'il est vêtu d'une tenue classique d'hiver. Les conditions climatiques dans ce type de bâtiments ne semblent pas critiques. Le principal risque d'inconfort est lié au chauffage aéraulique lorsqu'il fonctionne en conditions extrêmes : recyclage, température de soufflage élevé. On évalue l'ambiance à partir des sensations calculées en fonction de la température cutanée. Le risque d'inconfort lié à la vitesse d'air est estimé avec le Draught Risk.

### 3.2. BATIMENTS A ENERGIE POSITIVE EN CLIMAT CHAUD

**Présentation du bâtiment** : L'université de Saint Pierre à La Réunion a souhaité se doter d'un bâtiment dont une des finalités est de proposer le premier bâtiment exemplaire à énergie positive des DOM-TOM. La conception optimisée permet de réduire de façon drastique le recours à la climatisation : limitation des apports solaires, diminution des charges internes, mise en œuvre d'une ventilation naturelle transversale de jour et de nuit, brassage de l'air. Une importante surface de capteurs photovoltaïques permet alors une production d'électricité supérieure à l'énergie consommée.

**Evaluation de l'ambiance** : A partir d'une analyse des conditions climatiques à La Réunion et des études réalisées dans les bâtiments naturellement ventilés, il semble décisif de faire le choix d'indicateurs prenant bien en compte le rôle de l'humidité et des vitesses d'air. On utilise prioritairement la sensation calculée à partir de la mouillure cutanée et l'indice SET. Le calcul du PMV\* est effectué ainsi que l'indice DISC. Le DR est déterminé à partir d'une estimation du taux de turbulence et des vitesses d'air engendrées par la ventilation naturelle et le brassage de l'air.

## 4. RESULTATS

Les résultats se traduisent en termes d'évolutions temporelles des variables climatiques intérieures, des consommations énergétiques, des variables physiologiques et des indicateurs de confort qui en découlent, et du comportement de l'individu. Par souci de simplicité et afin d'avoir une vision complète de la démarche mise en œuvre, nous ne présentons que les résultats issues des simulations du bâtiment à La Réunion. L'objectif est de visualiser l'impact de la prise en compte du comportement de l'occupant sur son confort et sur les consommations énergétiques liées à l'utilisation de la climatisation. Cette dernière n'est utilisée que très rarement étant donné les efforts mis en œuvre dans la conception globale du bâtiment. La ventilation transversale assure un renouvellement horaire moyen de 20 vol/h : on considère que dans la zone concernée, ce débit induit une vitesse de l'ordre de 0.1 m/s dans la zone d'occupation.

La figure 3 est représentative de l'évolution des indicateurs de sensations sans prise en compte de la régulation comportementale. Les brasseurs d'air sont inexistantes et l'individu porte une tenue de résistance thermique égale à 0.7 clo. La climatisation est régulée sur 30°C :

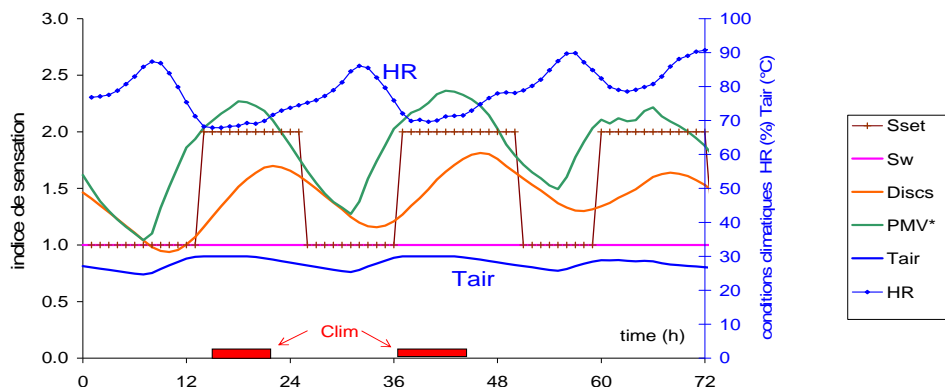


Figure 3 : évolution des indicateurs de confort

L'indice lié au SET est égal à 2 lorsque les températures intérieures sont maximales ce qui indique une sensation inconfortable voire inacceptable. Le PMV\* dépasse la valeur de 2 ce qui correspond à près de 80% d'insatisfait. Les valeurs de DISC indiquent une sensation légèrement inconfortable. L'indicateur lié à la mouillure cutanée reste à 1 ce qui correspond à une mouillure cutanée comprise entre 0.17 et 0.46 : soit entre 17 et 46 % de la surface de peau qui est humide.

Nous analysons l'impact de la régulation comportementale : celle-ci est gérée par la sensation liée au SET. Si celle-ci est positive, l'individu a la possibilité de retirer des vêtements jusqu'à une valeur minimale prise égale à 0.5 clo. Tous les jours, un compteur remet cette valeur à 0.7 clo en début de journée. Une fois que cette isolation vestimentaire minimale est atteinte, l'occupant a la possibilité d'augmenter la vitesse de l'air par le biais des ventilateurs. Trois régimes de vitesses sont accessibles : 0.3, 0.6 et 0.9 m/s se rajoutant à la vitesse engendrée par la ventilation naturelle. Tous les jours, un compteur réinitialise ce régime de vitesse à 0. Enfin, une fois que la vitesse maximum est atteinte, la climatisation est mise en route, régulée sur 30°C.

Sur la même période que précédemment, nous obtenons les résultats présentés sur la figure 4. Tout d'abord, il est important de noter que les évolutions de température et d'humidité sont les mêmes que précédemment étant donné que l'action principale sur les données climatiques est l'augmentation de la vitesse d'air locale et le changement de tenue vestimentaire.

On constate que l'indice lié au SET est au maximum égal à 1, soit une situation légèrement chaude. L'indice lié à la mouillure cutanée prend la valeur 1 seulement durant 1 pas de temps, autrement il est nul. L'indice DISC est toujours inférieur à 1 ce qui révèle une situation « agréable ». Enfin, le PMV\* varie entre 0 et 1,68 (valeur maximale lorsque l'action comportementale est réinitialisée). Si l'on note une nette amélioration du confort thermique, l'impact sur le fonctionnement de la climatisation est moins flagrant. Sur l'année, on note une diminution de seulement 5% des besoins de froid. Les besoins de climatisation sont réduits à la base par une conception adaptée et la mise en œuvre d'une ventilation transversale efficace (~20 vol/h).

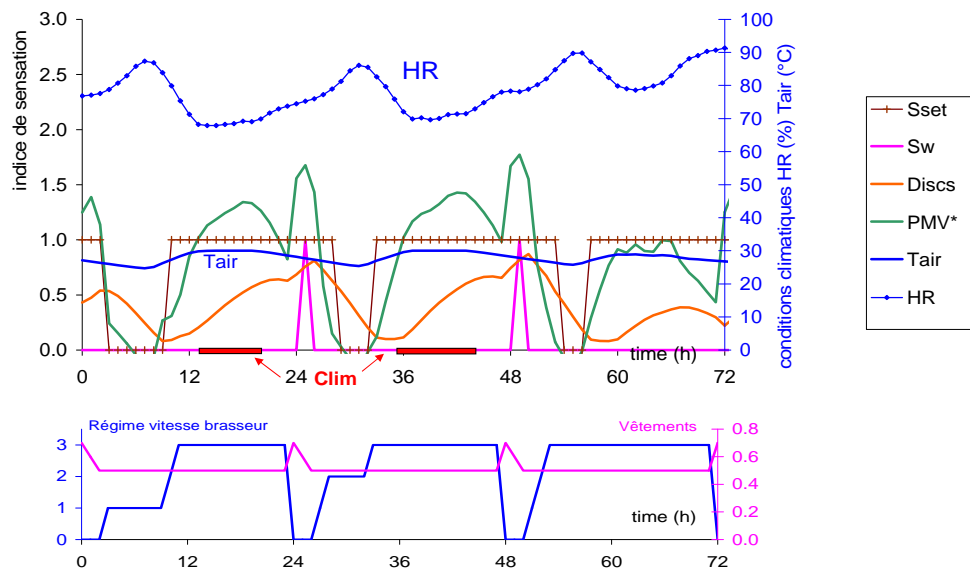


Figure 4 : évolution des indicateurs de confort avec régulation comportementale

## 5. CONCLUSION

La régulation thermo physiologique et comportementale permet d'anticiper la sensation thermique des occupants et ainsi d'ajuster les hypothèses en termes de systèmes énergétiques et de conception : le confort thermique est la priorité de tout bâtiment, ce dernier doit s'y adapter. La sensation thermique ne peut être évaluée que par des indicateurs appropriés traduisant les variables les plus sensibles. La possibilité qui est laissée aux occupants d'agir sur les systèmes et leur tenue vestimentaire et leur comportement joue un rôle considérable sur leur confort thermique et sur les consommations énergétiques.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- [ASH 05] ASHRAE (2005). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. SI Edition, p 8.1-8.29.
- [DED 08] De Dear R. <http://atmos.es.mq.edu.au/~rdedear/pmv/> (consulté le 10/07/2008)
- [END 06] Endravadan M. (2006). *Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine. Impact sur les consommations d'énergie dans les bâtiments*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [GAG 88] Gage A.P. et Fobelets A.P.RR (1988). *Rationalization of the effective temperature  $ET^*$ , as a measure of the enthalpy of the human indoor environment*. ASHRAE trans. 1988, V.94, Pt 1.
- [GAL 91] Galeou M.I. (1991). *La sensation thermique de l'Homme dans son habitat : des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [GAY 98] Gaye S. (1998). *Contribution à l'étude du confort thermique en climat tropical humide : influence de la mouillure cutanée*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop (Dakar).
- [GUE 08] Guernouti S. (2008). *Méthode d'analyse du comportement thermo-aéraulique des bâtiments pour la construction de modèles zonaux adaptatifs*. Thèse de doctorat, ENSA Nantes.

7. **REMERCIEMENTS :** cette étude est financée par l'ANR/ADEME sur deux programmes PREBAT ; « Micro 15 kWh » et « EnerPos ».