

# Modélisation et évaluation détaillée du comportement thermique du corps humain et intégration du modèle dans un bureau

Perihan TULUMOGLU<sup>1\*</sup>, Antoine NUTTIN, Samuel GIULIANA, Véronique FELDHEIM<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMONS – Service de Thermique et Combustion  
Rue de l'Épargne, 56 – B-7000 Mons

\*(auteur correspondant : [perihan.tulumoglu@umons.ac.be](mailto:perihan.tulumoglu@umons.ac.be))

**Résumé** - Cet article s'inscrit dans le contexte global de l'étude du confort thermique par simulation dynamique des occupants de bâtiments soumis à des systèmes de chauffage ou de refroidissement par rayonnement, basé sur des modèles CFD simplifiés. Cette étude est une première étape vers la modélisation avancée du comportement thermique d'un être humain et son intégration dans un bâtiment. Elle permet de comparer les besoins énergétiques du bâtiment évalués en tenant compte de la chaleur émise par le corps humain via le modèle détaillé avec ceux obtenus en considérant une émission constante de la part du corps humain.

## Nomenclature

$act$  niveau d'activité, met (1 met = 58.2 W/m<sup>2</sup>)

$A$  élément de surface, m<sup>2</sup>

$f_{cl}$  facteur de surface des vêtements

$\varphi$  densité moyenne de flux, W/m<sup>2</sup>

$h_x$  coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur, W/K

$H$  charge de travail, W

$I_{cl}^*$  isolation intrinsèque entre les vêtements et la peau, m<sup>2</sup>K/W

$i_{cl}^*$  facteur de perméabilité

$M$  taux de génération de chaleur, W

$P_{air}$  pression partielle de vapeur de l'air, Pa

$q_m$  génération interne, W/m<sup>3</sup>

$q_{sk}$  quantité de chaleur perdue par la peau, W/m<sup>2</sup>

$w$  taux de perfusion dans le sang, 1/s

$v_{air,eff}$  vitesse de l'air, m/s

*Symboles grecs*

$\alpha$  coefficient d'absorption des faibles longueurs d'ondes

$\omega$  terme adimensionnel, vaut 1 en cylindrique et 2 en sphérique

$\tau$  temps, s

*Indices et exposants*

$0$  valeur prise à la température de référence

$e$  évaporation

$hum$  humain

$sh$  frissonnement

$sk$  peau

$sr$  surface environnante

$w$  activité physique

## 1. Introduction

Pour pouvoir réaliser des systèmes de chauffage et de refroidissement dans des bâtiments dont la performance énergétique ne cesse de croître, il est important de savoir comment le corps réagit à certaines conditions. La plupart des logiciels utilisés dans le cadre de simulation de systèmes thermiques considèrent que la puissance dégagée par un corps humain est constante. Plusieurs travaux ont déjà été réalisés sur la modélisation du corps humain et de nombreux modèles existent. Thellier [6] a évalué le confort des occupants dans un local soumis au rayonnement solaire. Le corps humain a été modélisé sur base du modèle de Stolwijk [8] composé de 6 segments. Ce modèle a ensuite été intégré à l'outil de simulation thermique dynamique TRNSYS auquel un modèle avancé de calcul du rayonnement solaire incident et un

modèle d'analyse de confort thermique ont été ajoutés. Cet outil permet d'évaluer les consommations énergétiques et le confort thermique des occupants et met en évidence le fait que le bâtiment renforce l'impact du rayonnement solaire par une augmentation des températures de l'air et des surfaces par rapport à la température extérieure et agit comme un concentrateur de rayonnement sur le sujet. L'étude doit encore prendre en compte le comportement du sujet soumis à des températures très basses ou très élevées et le caractère adaptatif par rapport à des situations inconfortables (changement position, habillement, etc.). Notre travail consiste aussi au développement d'un modèle humain cohérent couplé au bâtiment. Un premier pas vers cet objectif est le développement d'un modèle thermique basé sur le modèle de D. Fiala [1] et [2] qui décompose la thermorégulation humaine en une partie passive et une partie active (celle-ci reprend le frissonnement, la transpiration et la vasomotricité). Notre modèle considère actuellement uniquement la partie passive. Nous avons réalisé un premier couplage du modèle humain avec un modèle numérique d'un local.

## 2. Modélisation du comportement thermique d'un humain

### 2.1. Modèle humain

Nous travaillons avec un mannequin de 73,5 kg mesurant 1m82 décomposé en 15 éléments: la tête, la face, le cou, les épaules, le thorax, l'abdomen, les bras, les jambes, les mains et les pieds. Ces éléments sont représentés par 14 cylindres et une demi-sphère (tête). Le nombre de couches est de quatre pour tous les éléments sauf le thorax, l'abdomen et la face qui sont composés de cinq couches. La composition de ces couches ainsi que les taux de génération interne et de perfusion de sang sont connus [1].

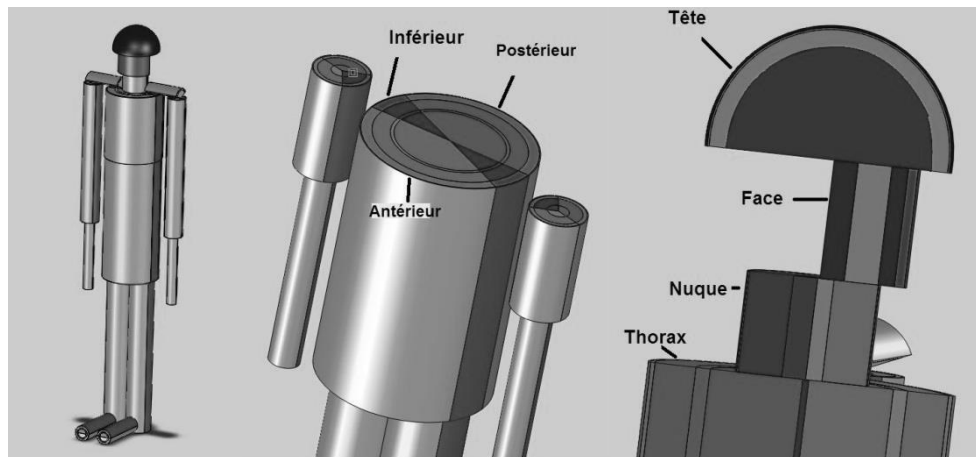


Figure 1 : Représentation du modèle [Source : TFE A. Nuttin,[3]]

### 2.2. Mise en équation de la thermorégulation – Système passif

Pennes a développé un modèle qui décrit le mécanisme de transfert de chaleur dans les cellules vivantes par l'équation suivante:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\omega}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_m + (\rho \omega c)_{bl} (T_{bl,a} - T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

Le premier terme représente la conduction de chaleur entre les différents tissus. Le second terme est un terme de génération interne. Le troisième terme représente la quantité de chaleur qui est transmise par convection entre le sang (bl) et les tissus. La somme de ces trois termes est égale à l'accumulation de chaleur.

La génération interne de chaleur [1][2] peut être divisée en différents termes suivant les équations 2 et 3. L'état de repos correspond à un sujet allongé, émettant une puissance de 87.1W et soumis à une température de l'air de 30°C, une vitesse de l'air de 0.05m/s et une humidité relative de 40%. L'équation 4 permet de calculer la variation de la quantité de chaleur produite par le corps au repos par rapport aux conditions de référence (*bas*). L'équation 5 permet de calculer la part relative à la production de chaleur des muscles au cours d'un effort physique, qui dépend de  $a_{m,w}$ , un coefficient qui permet de répartir la quantité de chaleur produite par une activité physique dans tout le corps. L'équation 6 donne la charge de travail. La valeur  $\eta$  est considérée égale à 0 dans l'étude en raison du faible niveau d'activité du sujet.

$$q_m = q_{m,bas,0} + \Delta q_m \quad (2)$$

$$\Delta q_m = \Delta q_{m,bas} + q_{m,sh} + q_{m,w} \quad (3)$$

$$\Delta q_{m,bas} = q_{m,bas,0} \cdot \left( 2^{\left[ \frac{(T-T_0)}{10} \right]} - 1 \right) \quad (4)$$

$$q_{m,w} = \frac{\partial(a_{m,w}H)}{\partial V_{mus}} \quad (5)$$

$$H = act \frac{M_{bas,0}}{act_{bas}} (1 - \eta) - M_{bas,0} \quad (6)$$

La circulation sanguine a pour rôle de maintenir chaque partie du corps à une température bien déterminée. Elle est simulée comme la somme de trois composantes : une réserve de sang (p) (qui correspond à la zone du corps où la température est la plus élevée), composée de la tête, du cou, du thorax et de l'abdomen, un échangeur contre-courant entre les artères et les veines et des capillaires allant des artères (a) et des veines (v) vers les tissus. Les artères puisent le sang chaud dans la réserve de sang (bl) et échangent de la chaleur avec les veines (vx) dans un échangeur contre-courant, avant d'irriguer les extrémités. Le sang revient ensuite dans les veines pour se réchauffer à nouveau en passant dans l'échangeur.

Nous pouvons écrire l'équation 7 sur l'échangeur où nous égalons les flux échangés. Pour trouver la température des artères  $T_{bl,a}$  nous pouvons également écrire dans l'équation 8 le flux total maximum échangé.

$$\rho_{bl} c_{bl} \int w_{bl} dV (T_{bl,p} - T_{bl,a}) = \rho_{bl} c_{bl} \int w_{bl} dV (T_{bl,vx} - T_{bl,v}) \quad (7)$$

$$Q_x = h_x (T_{bl,a} - T_{bl,v}) \quad (8)$$

$T_{bl,a}$  est alors obtenue en substituant le membre de droite de l'équation 7 par le membre de droite de l'équation 8. On obtient également  $T_{bl,v}$  dans l'équation 10.

$$T_{bl,a} = \frac{\rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV \cdot T_{bl,p} + h_x \cdot T_{bl,v}}{\rho_{bl} c_{bl} \int \omega_{bl} dV + h_x} \quad (9)$$

$$T_{bl,v} = \frac{\int \omega_{bl} T dV}{\int \omega_{bl} dV} \quad (10)$$

### 2.3. Echanges de chaleur avec l'extérieur

Le corps humain échange de la chaleur avec le monde extérieur. Ces échanges sont : la convection forcée et naturelle entre la peau ou les vêtements et l'environnement, le rayonnement entre la peau ou les vêtements et les parois avoisinantes, l'évaporation de l'eau ou de la transpiration au niveau de la peau, les pertes par respiration et la conduction entre le

corps et les pièces matérielles avec lesquelles il est en contact. Ce dernier terme est négligé ainsi que l'évaporation de l'eau ou de la transpiration au niveau de la peau.

On peut donc écrire l'équation 11 qui exprime la quantité de chaleur perdue par la peau et les équations 12 et 13 qui expriment la chaleur perdue par convection.  $T_{sf}$  est la température d'un secteur de la peau et  $h_{c,mix}$  le coefficient de transmission thermique, prenant en compte la convection naturelle et forcée, décrit par l'équation de Wang qui a réalisé des expériences sur des mannequins [1].

$$q_{sk} = q_c + q_R + q_e \quad (11)$$

$$q_c = h_{c,mix} \cdot (T_{sf} - T_{air}) \quad (12)$$

$$h_{c,mix} = \sqrt{a_{frc} v_{air,eff} + a_{mix} + a_{nat} \sqrt{T_{sf} - T_{air}}} \quad (13)$$

Les pertes de chaleur par rayonnement varient en fonction de la position du corps et demandent le calcul des facteurs de vue. Une simplification est donc apportée à ce niveau en utilisant un concept de direction dépendante dans lequel on prend en compte une température moyenne pour représenter l'ambiance. Cette température moyenne est définie comme la température d'une enveloppe uniforme fictive "vue" par un secteur,  $T_{sr,m}$ , qui engendre le même échange radiatif avec le secteur que l'enveloppe asymétrique actuelle. Cette température varie avec le temps et avec la position sur le corps. Nous pouvons donc calculer les pertes par rayonnement par l'équation 14. Les  $\epsilon_{sf}$  et  $\epsilon_{sr}$  sont respectivement le coefficient d'émission d'un secteur de peau et celui des surfaces environnantes.  $\varphi_{sf-sr}$  est le facteur de vue entre un secteur de peau et l'ambiance. Les facteurs de vue sont calculés sur base de simulations numériques utilisant une géométrie humaine en 3D suivant les travaux de Kubaha et al. [7].

$$q_R = h_R \cdot (T_{sf} - T_{sr,m}) \quad (14)$$

$$h_R = \sigma \epsilon_{sf} \epsilon_{sr} \varphi_{sf-sr} (T_{sf}^{*2} + T_{sr,m}^{*2}) (T_{sf}^* + T_{sr,m}^*) \quad (15)$$

$$T_{sr,m} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{sr,j} A_{sr,j}}{\sum_{j=1}^n T_{sr,j}} \quad (16)$$

Les pertes de chaleur par respiration sont moins importantes que les autres pertes. On compte la quantité de chaleur perdue par le fait que l'humidité de l'air expiré est supérieure à celle de l'air inspiré ( $E_{rsp}$ ) et on compte également les pertes dues au fait que l'air se soit réchauffé ( $C_{rsp}$ ).

$$E_{rsp} = 4.373 \int q_m dV (0.028 - 6.5 \times 10^{-5} T_{air} - 4.91 \times 10^{-6} P_{air}) \quad (17)$$

$$C_{rsp} = 1.948 \int q_m dV (32.6 - 0.066 T_{air} - 1.96 \times 10^{-4} P_{air}) \quad (18)$$

Enfin, deux coefficients de transfert ont été considérés pour prendre en compte la présence des vêtements : la résistance thermique des vêtements ( $U_{cl}^*$ , conductance, W/m<sup>2</sup>K) et la perméabilité des vêtements. Cette dernière n'a pas été prise en compte dans le modèle.

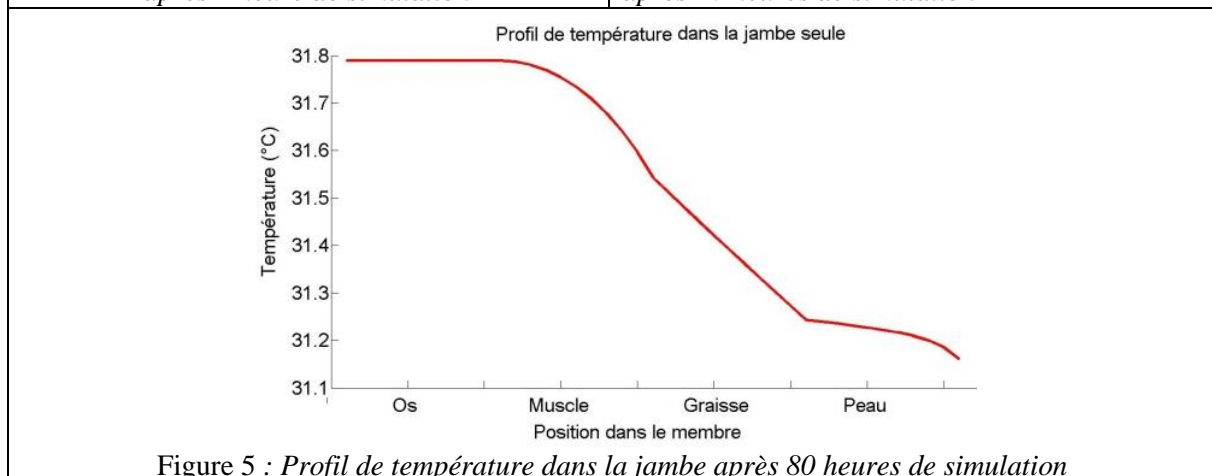
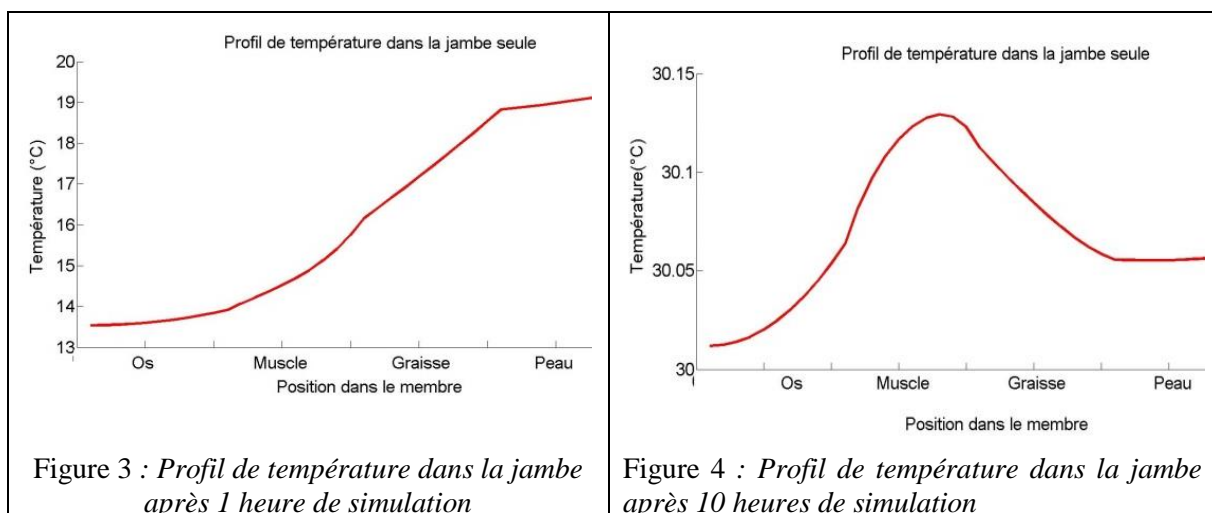
$$U_{cl}^* = \frac{1}{\sum_{j=1}^n (I_{cl}^*)_j + \frac{1}{f_{cl}^* (h_{c,mix} + h_R)}} \quad (19)$$

## 2.4. Résultats et validation du modèle

Pour la discrétisation, nous avons travaillé, pour chaque élément corporel considéré, en une dimension, avec un schéma d'intégration temporel mixte de Crank-Nicolson. La discrétisation spatiale des équations a été réalisée suivant une méthode aux volumes finis.

Nous observons (fig. 3, 4 et 5) l'évolution du profil de température dans l'ensemble des couches de la jambe au cours du temps, en démarrant d'une situation initiale (humainement utopique) à 10 degrés dans toute l'épaisseur du membre. La température de l'environnement est fixée à 30 °C.

Sur la figure 3, après avoir simulé une heure, on observe que la température au niveau des différentes couches croît assez régulièrement de l'intérieur de l'os vers la surface de la peau. A ce stade-ci, bien qu'il y ait une génération interne assez conséquente au niveau du muscle, la jambe se réchauffe principalement grâce aux échanges de chaleur avec l'extérieur. Après 10 heures, la température moyenne de la jambe a atteint la température extérieure qui était fixée à 30 °C. Nous voyons maintenant que c'est la génération interne au niveau du muscle qui réchauffe le membre. Lorsque la température de l'os est constante et qu'elle a atteint la température des premières cellules du muscle nous arrivons à l'état stationnaire. Nous pouvons encore remarquer sur la figure 5 que seul le muscle et la peau permettent de réchauffer ou de refroidir significativement un membre. Ces évaluations sont réalisées pour tous les membres qui sont en réalité couplés entre eux.



Nous avons comparé notre modèle avec celui de l'auteur, dans les conditions de thermoneutralité. Ces résultats sont repris dans le tableau 1. Sur les températures de l'hypothalamus (ht), du rectum (rt) et des muscles (mus), l'erreur est inférieure à 0,2°C. Nous observons une différence de température de 0,4 °C au niveau de la peau. La puissance évacuée par la peau est identique tandis qu'on observe une différence sensible dans la puissance évacuée par respiration( $P_R$ ). Cette différence peut avoir plusieurs origines, notamment au niveau des simplifications réalisées sur le modèle.

	$T_{sf}$ °C	$T_{mus}$ °C	$T_{ht}$ °C	$T_{rectum}$ °C	$P_{sk}$ W	$P_R$ W
Résultats obtenus	34,8	36,92	37,12	37,05	78,5	8,5
Résultats de l'auteur [1]	34,4	36,88	37,00	36,88	78,5	5,5

Tableau 1 : Comparaison entre les résultats de Fiala et al. [1] et nos résultats

### 3. Modélisation du local et couplage avec le modèle humain

Le bâtiment considéré est parallélépipédique ( $H=3m$ ,  $l=5m$ ,  $L=10m$ ). Les murs et la toiture sont soumis au rayonnement solaire et sont en contact avec un environnement à la température  $T_e$ . Le plancher est en contact avec le sol qui est supposé être à 10°C. Le flux solaire et la température extérieure sont fournis pour une année, heure par heure, par un fichier météo (Uccle, Belgique) issu de TRNSYS. Le coefficient de transmission thermique des murs vaut 0,31, celui du plancher 0,35 et celui de la toiture 0,27 W/m<sup>2</sup>K. Ces coefficients sont conformes aux valeurs  $U_{max}$  en vigueur en Wallonie en 2012 [5]. La dalle de sol et les murs présentent une inertie importante. Le bâtiment possède une fenêtre par mur. Leur surface vaut 20% de celle du mur et leur coefficient de transmission est de 1,53 W/m<sup>2</sup>K. Une consigne de 20°C est imposée pour le chauffage et 25°C pour le refroidissement. Le débit d'air est constant dans le bâtiment (30m<sup>3</sup>/h).

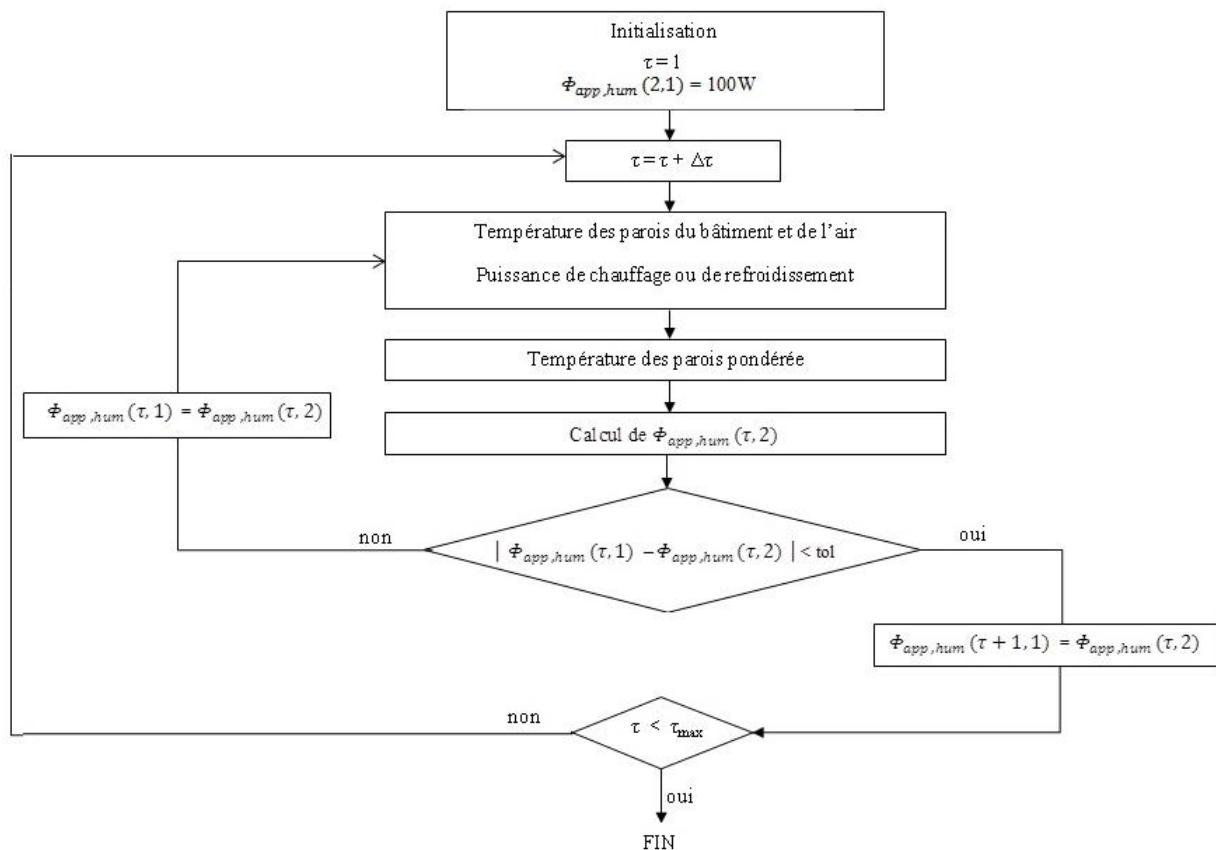


Figure 7 : *Algorithme de résolution*

La résolution des transferts de chaleur dans le local a été effectuée en utilisant la méthode aux volumes finis (profil de température dans les parois) et un schéma d'intégration temporel de Crank-Nicolson. Le couplage du bâtiment au modèle humain implique un calcul itératif. La puissance thermique émise par le corps a un impact sur la température des parois, de l'air, et également sur la puissance du chauffage et de refroidissement, tandis que la puissance développée par le corps dépend de son environnement. La méthode de résolution est reprise à la figure 7.

#### 4. Résultats

Les simulations ont été réalisées successivement avec 1, 5 et 10 personnes, durant une année climatique. L'isolation vestimentaire du modèle de corps humain est adaptée à la température intérieure. Pour une température extérieure située entre 20 et 22°C, le facteur d'isolation vestimentaire pour les pieds est de 0,04, pour le bas du corps de 0,3 et pour le haut du corps 0,33. Entre 22°C et 25°C, ce facteur vaut respectivement 0,02, 0,15 et 0,15. On considère des personnes assises, avec un niveau d'activité de 1 MET, dont la puissance thermique dégagée est constante (100W) et ensuite variable en fonction des conditions extérieures. Enfin, les interactions entre les personnes ne sont pas prises en compte. On constate que dans le cas du modèle détaillé, la puissance dissipée par le corps serait plus faible que 100 W lors des périodes plus froides et plus élevée que 100 W lors des périodes plus chaudes. La puissance thermique moyenne dissipée par le modèle serait de 92,5 W.

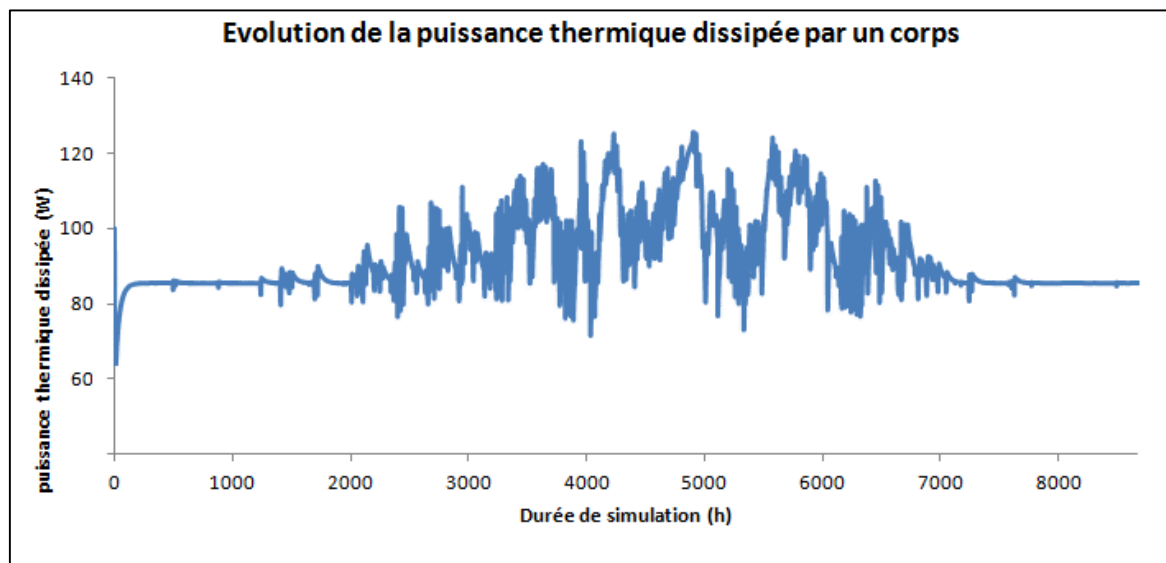


Figure 8 : *Evolution de la puissance thermique dissipée par un corps*

Il faudrait fournir plus d'énergie au bâtiment pour le chauffer et le refroidir en considérant une puissance thermique variable des occupants. Ces différences augmenteraient avec le nombre de personnes pour atteindre avec 10 personnes une augmentation d'environ 42% pour les besoins en chauffage et 37 % pour les besoins en froid.

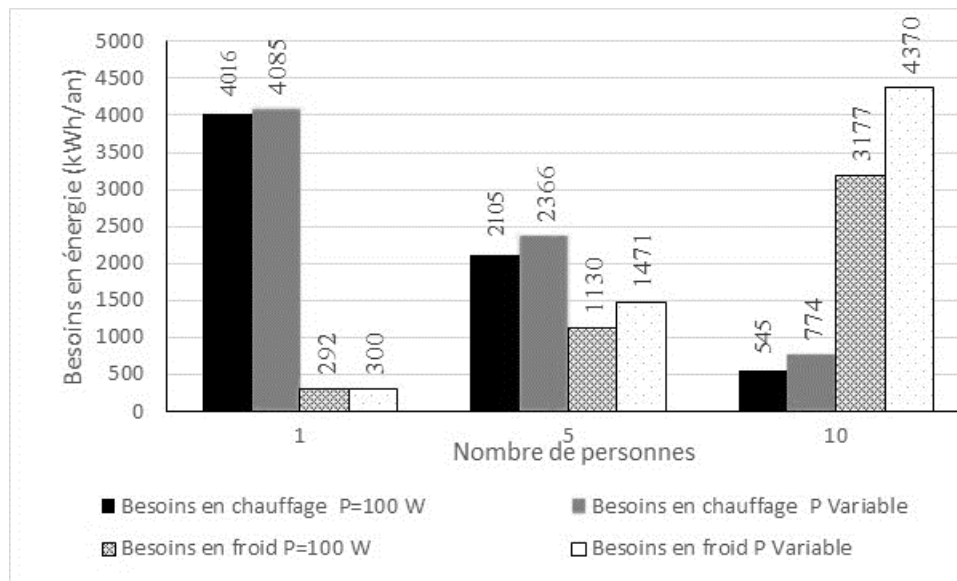


Tableau 2 : Comparaison des énergies à fournir au bâtiment suivant le modèle humain simple et le modèle détaillé

## 5. Conclusions et perspectives

Afin d'évaluer plus finement le confort thermique des occupants à travers les simulations thermiques dynamiques, nous avons analysé le comportement thermique de l'humain et ses interactions avec son environnement. Nous avons ensuite couplé ce modèle au bâtiment et évalué les besoins en énergie pour garantir le confort des occupants. Nous avons comparé ces résultats au cas du modèle simplifié de l'humain, qui émet une puissance constante. Cette comparaison nous montre que des différences sensibles pourraient apparaître, qui augmenteraient rapidement en cas de forte occupation. Le modèle humain actuellement considéré n'intègre pas la régulation active de l'individu ni les interactions entre personnes. Les échanges de chaleur sous forme latente avec l'environnement (transpiration) n'ont pas été pris en compte. En ce sens, les résultats présentés ici restent préliminaires, mais montrent la possibilité et l'intérêt de développer des outils d'évaluation permettant de prendre en compte la thermorégulation humaine.

## Références

- [1] Fiala D., J. Lomas. A computer model of thermoregulation for a wide range of environmental conditions : the passive system. *Journal of applied physiology*, (87) :1957–1972, 1999.
- [2] Stohrer M., Fiala D., Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, (45) :143–159, 2001.
- [3] Antoine Nuttin, Evaluation du comportement thermique du corps humain : mise au point d'un logiciel, *Travail de fin d'études*, Faculté polytechnique de Mons, 2011.
- [4] Giuliana S., Intégration d'un modèle thermique simplifié du corps humain dans la modélisation d'une habitation unifamiliale, *Travail de fin d'études*, Faculté polytechnique de Mons, 2013.
- [5] Arrêté royal du 10 octobre 2012 fixant les exigences de base générales auxquelles les lieux de travail doivent répondre, Section IV, Art. 36.
- [6] Thellier, F., Cordier, A., Monchoux, M. Bonnis-Sassi, B. Lartigue. Modeling additional solar constraints on a human being inside a room. *Solar Energy* 82, 290–301, 2008
- [7] Kubaha K. , D.Fiala, J. Toftum, and A.H.Taki, Human projected area factors for detailed direct and diffuse solar radiation analysis. *International Journal of Biometeorology*. 49 (2), 113-129, 2004
- [8] Stolwijk, J.A.J., Mathematical model of thermoregulation. In: *Physical & Behavioral Temperature Regulation*. Thomas Publisher Springfield, Chapter 48, pp. 703–721, 1970