Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°4 (2008) 545 – 556
DOI: https://doi.org/10.54966/jreen.v11i4.104

Modèle mathématique de prédiction de la sensation thermique et de la réponse physiologique chez l'être humain

Khaled Imessad[1] et Noureddine Aït Messaoudène[2]

[1] Division Thermique et Thermodynamique, Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie
[2] Laboratoire des Applications Energétiques de l'Hydrogène, 'LApEH' Université Saâd Dahlab, Route de Soumâa, Blida, Algérie

(reçu le 30 Novembre 2008 – accepté le 27 Décembre 2008)

Résumé - *Cette étude présente un modèle mathématique des sensations thermiques de l'être humain en régime transitoire et en milieu non homogène. Le corps humain est représenté par dix sept segments, chaque segment est modélisé par quatre couches de noyau central, muscle, graisse et peau. Le modèle intègre les différents mécanismes de transfert de chaleur entre le corps et l'environnement externe, ainsi que les réactions physiologiques. L'étude présente une application du modèle permettant d'évaluer l'influence de la tenue vestimentaire sur le confort thermique.*

Abstract - *This study presents mathematical model of human body thermal sensation in transient and non uniform conditions. The model has 17 body segments, each consisting of four layers for core, muscle, fat and skin. The model integrates the various mechanisms of heat exchange between the body and the external environment, as well as the physiological reactions. An application of the model evaluates the influence of clothing on the thermal comfort.*

Mot clés: Modèle mathématique - Réaction physiologique - Résistance vestimentaire - Confort thermique.

1. INTRODUCTION

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. L'homme étant un homéotherme, il s'adapte aux différentes conditions climatiques en actionnant des mécanismes physiologiques lui permettant de garder une température centrale autour de 37 °C.

Les modèles mathématiques, dont le but est de prédire la sensation thermique, sont basés sur le calcul du bilan thermique du corps humain. Ils font intervenir des paramètres physiques, et physiologiques. Les paramètres physiques font intervenir les échanges de chaleur entre le corps et l'environnement externe (conduction, convection, rayonnement, évaporation). Les paramètres physiologies, eux, font intervenir des réactions de protection (sudation, vasodilatation, vasoconstriction, frisson).

Le modèle de Stolwijk a été conçu initialement pour la NASA (Stolwijk, 1971) [1]. Il modélise le corps humain par 25 nœuds. Six segments représentant la tête, le tronc, les bras, les mains, les jambes et les pieds. Chaque segment est constitué de 4 couches (noyau, muscles, graisse, peau). Le 25ème nœud illustre le flux sanguin. Dans le modèle de Gagge (1986) [2], le corps humain est composé de deux compartiments cylindriques (la peau et le noyau central). Ce modèle, qui est l'un des plus simples, a été développé pour un individu se trouvant dans un milieu homogène.

Fiala (1999) [3] divise le corps en 15 parties sphériques ou cylindriques. Chaque partie est divisée en plusieurs nœuds. Fiala divise chaque segment, sauf le visage et l'épaule, en trois secteurs: antérieur, postérieur, inférieur. Le modèle de L'université de Berkeley (Huizenga *et al.*, 2001) [4] divise le corps en seize segments, chaque segment est composé de: noyau, muscles, graisses et peau. Ce modèle prédit la réponse physiologique en régime transitoire et pour des conditions extérieures non uniformes. Une interface graphique permet de visualiser les détails de la distribution de la température locale et du flux de chaleur sur un mannequin en trois dimensions.

2. PRESENTATION DU MODELE

2.1 Segmentation

Le modèle de notre étude est un modèle de confort thermique en régime transitoire. Il est basé sur un homme de corpulence moyenne, avec un poids d'environ 74,5 kg et une surface corporelle de 1.8 m^2. Le corps est divisé en 17 segments: la tête (demi sphère), le visage (cylindre), le torse (demi cylindre), le dos (demi cylindre), le bassin (cylindre), les bras gauche et droit (cylindres), les avants bras gauche et droit (cylindres), les mains gauche et droite (cylindres), les jambes gauche et droite (cylindres), les cuisses gauche et droite (cylindres), et les pieds gauche et droit (cylindres). Chaque segment est composé de quatre couches: le noyau central, les muscles, la graisse et la peau.

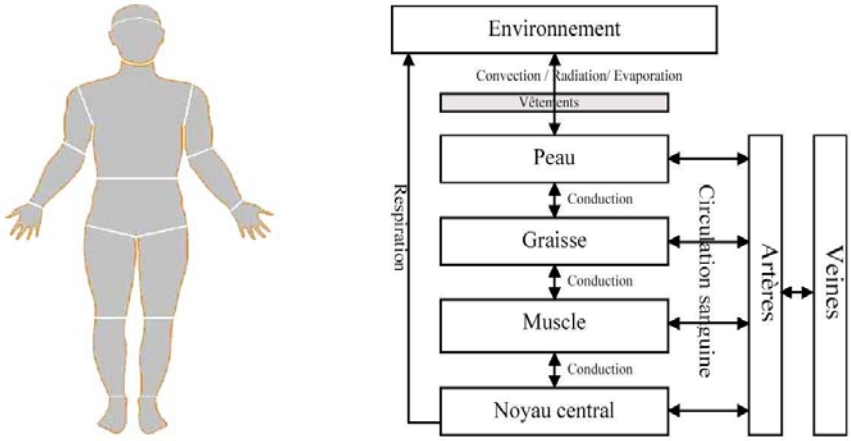


Fig. 1: Segmentation utilisée par le modèle

Les avantages du présent modèle sont:

1. La considération d'un nombre suffisant de segments afin de prendre en compte la non homogénéité des conditions extérieures, ainsi que l'asymétrie de distribution de la chaleur sur le corps, éventuellement causée par l'irradiation solaire, les surfaces froides, la non uniformité des vêtements, etc.
2. L'intégration de la non uniformité de la température artérielle. En effet, le sang circulant dans des artères irrigue les parties du corps d'une manière différente. De plus, un échange par contre courants se fait entre les artères et les veines.

3. La prise en compte des différentes réponses physiologiques intervenant dans la régulation thermique.
4. La proposition de coefficients d'échange par convection et rayonnement calculés pour chaque segment.

2.2 Bilan énergétique du modèle

Le corps humain est équipé d'un système de régulation thermique vital, composé d'un système actif qui détermine les réactions physiologiques du corps (débit sanguin cutané, sudation, frissons) et d'un système passif associé aux mécanismes de transferts de chaleur au niveau du corps et aux caractéristiques géométriques et thermique de ce dernier.

Le corps humain doit maintenir un équilibre thermique entre l'énergie produite par le métabolisme et l'énergie échangée avec l'environnement extérieur. Le bilan énergétique qui en résulte pour chaque segment considéré dans le modèle est donné par les équations suivantes:

Noyau central

$$C(i,1).\frac{dT(i,1)}{dt} = Q(i,1) - BF(i,1) - CD(i,1) - Res(i,1)$$

Muscle

$$C(i,2).\frac{dT(i,2)}{dt} = Q(i,2) - BF(i,2) + CD(i,1) - CD(i,2) \qquad (1)$$

Graisse

$$C(i,3).\frac{dT(i,3)}{dt} = Q(i,3) - BF(i,3) + CD(i,2) - CD(i,3)$$

Peau

$$C(i,4).\frac{dT(i,4)}{dt} = Q(i,4) - BF(i,4) + CD(i,3) - Q_c(i) - Q_r(i) - E(i)$$

Le terme i représente le numéro du segment et varie de 1 à 17.

2.3 Métabolisme

Dans le modèle, le métabolisme est considéré comme la somme d'une valeur de base produite dans les conditions de neutralité thermique et d'une chaleur additionnelle produite lors d'un effort physique ou lors de frissonnement. Le surplus de chaleur occasionné se produit seulement au niveau des muscles.

$$\begin{aligned} Q(i,j) &= Q_b(i,j) && \text{pour} \quad j=1,3,4 \\ Q(i,j) &= Q_b(i,j) + W(i,j) + C(i,j) && \text{pour} \quad j=2 \end{aligned} \qquad (2)$$

2.4 Circulation sanguine

Les différentes parties du corps humain sont irriguées par le sang chaud à travers les artères principales. Cependant, avant que les extrémités ne soient perfusées, le sang est refroidit lors d'un échange par contre-courant entre les artères et les veines adjacentes. Les artères vont alimenter les lits capillaires, puis retourner dans les veines et se

réchauffer à nouveau par contre-courant. L'échange de chaleur par contre-courant entre artères et veines adjacentes est donné par [3]:

$$Q_x = h_x.(T_{bla} - T_{blv}) \tag{3}$$

En conditions de neutralité thermique, les tissus sont alimentés par un débit sanguin de base. Dans les conditions de non-neutralité, le débit sanguin varie en fonction des conditions extérieures, selon qu'on soit en situation de vasodilatation ou de vasoconstriction.

2.5 Echange de chaleur par évaporation

Le transfert de chaleur par évaporation correspond à une chaleur latente de changement d'état qui se manifeste au niveau de la peau lors de la transpiration. L'eau évaporée à la surface de la peau est produite par deux mécanismes distincts, soit elle est diffusée à travers les cellules cutanées (E_b), soit elle est secrétée par les glandes sudoripares (E_{sweat}), ce qui donne l'expression suivante [5]:

$$\begin{aligned} E(i,4) &= E_b(i,4) + E_{sweat}(i,4) \\ E_b(i,4) &= 0.06.\left(1 - \frac{E_{sweat}(i,4)}{\max(i)}\right).E_{max}(i) \\ E_{sweat}(i,4) &= (31.2\times \mathrm{Error}(1,1) + 33.6\times(\mathrm{wrms} - \mathrm{clds}))\times \mathrm{Skins}(i)\times \mathrm{km}(i) \end{aligned} \tag{4}$$

2.6 Perte de chaleur par respiration

Durant la respiration, le corps évacue de la chaleur sensible par convection et de la chaleur latente par évaporation. Cette perte de chaleur est supposée se produire au niveau du noyau central du torse. Elle est donnée par:

$$Res = \left(0.0014\times(34 - T_{ext}) + 0.017\times(5.867 - P_a)\right)\times \sum_{i=1}^{17}\sum_{j=1}^{4} Q(i,j) \tag{5}$$

2.7 Echange de chaleur par convection et rayonnement

L'échange de chaleur par convection est calculé pour chaque segment de peau. Il est donné par:

$$Q_c = F_{cl}.h_c.(T_{sk} - T_{ext}) \tag{6}$$

F_{cl} est un facteur de prise en compte de l'effet liée à l'isolement vestimentaire.

$$F_{cl} = \frac{1}{I_{cl}.(h_c + h_r) + \frac{1}{f_{cl}}} \tag{7}$$

Le coefficient d'échange par convection (h_c) peut être approché dans le cas ou l'air autour du corps est calme ou en mouvement [6].

$$\begin{aligned} &\text{Air calme} && h_c = 1.21\times(\mathrm{abs}(T_{sk} - T_{ext}))^{0.43} \\ &\text{Air en mouvement} && h_c = 9.41\times v^{0.61} \end{aligned} \tag{8}$$

L'échange de chaleur par rayonnement entre les différentes parties du corps et l'environnement est calculé après linéarisation des équations et en utilisant la loi de stefan-Boltzman.

3. RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS

Le processus de transfert de chaleur à travers les vêtements est assez complexe, car faisant intervenir plusieurs phénomènes: le transfert à travers l'espace d'air emprisonné entre le corps et les vêtements, la conduction à travers le tissu, l'évaporation, etc. La plupart des modèles développés comparent la présence de vêtements à une résistance thermique (I_{cl}). L'unité de la résistance thermique des vêtements est le 'Clo', avec un Clo = 0.155 m^2/°C.W. Cette valeur représente la résistance thermique des vêtements qui maintiendrait un corps, en état de repos et se trouvant dans une ambiance neutre, en équilibre thermique. La résistance total (I_T) fait intervenir toutes les couches, de la peau jusqu'à l'environnement extérieur [7].

$$I_T = I_{cl} + \frac{I_a}{f_{cl}} \tag{9}$$

f_{cl} représente le rapport entre la surface extérieure du corps vêtu et la surface du corps nu. I_a représente l'isolement de la couche limite d'air englobant le corps.

4. SYSTEME D'INFORMATION ET DE CONTROLE

Les réponses physiologiques du corps humain sont activées par l'intermédiaire de thermorécepteurs qui décèlent l'état thermique du système. Les thermorécepteurs comparent la température de chaque compartiment à une température de consigne (T_{set}). Il en résulte un signal d'erreur $Error(i, j)$. Si ce signal est positif, nous pouvons assumer que les thermorécepteurs spécifiques à la sensation de 'chaud' sont activés. Dans ce cas, $Warm(i, j) = Error(i, j)$. Si par contre, ce signal est négatif, alors les thermorécepteurs de la sensation 'froid' sont activés, $Cold(i, j) = Error(i, j)$. Un paramètre englobant les différents signaux d'erreur est utilisé pour tenir compte des différentes parties du corps qui peuvent être à des températures différentes [1].

$Warms = \sum_{1}^{17} Skinr(i) \times Error(i, 4)$. Il est fait de même pour le ' Colds '.

Le signal émis par le cerveau permet de déclencher l'action à entreprendre par le corps humain pour maintenir une température optimale. Ce signal fait intervenir la température interne de la tête, correspondant à l'hypothalamus, et une moyenne pondérée des températures cutanées de chaque segment. Si la température du corps augmente, le cerveau actionne la vasodilatation. C'est une réaction physiologique se traduisant par une augmentation du débit sanguin cutanée. La chaleur supplémentaire est véhiculée par le sang jusqu'à la peau et évacuée vers l'extérieur. Inversement, lorsqu'un individu est soumis au froid, le cerveau actionne la vasoconstriction. Ce mécanisme permet une réduction du débit sanguin cutanée et donc une réduction des pertes de chaleur vers l'extérieur.

$$BF(i,4) = \frac{BF_b(i,4) + Skinv(i) \times Dilat}{1 + Skinc(i) \times Stric} \times km(i,4) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Dilat &= 117 \times Error(1,1) + 7.5 \times (Warms - Colds) + P_{dl} \times Warm(1,1).Warms \\ Stric &= -11.5 \times Error(1,1) - 11.5 \times (Warms - Colds) + P_{st} \times Cold(1,1).Colds \end{aligned} \quad (11)$$

Si la vasoconstriction s'avère insuffisante pour maintenir un équilibre thermique, le corps va commencer à frissonner. Les frissons sont une production supplémentaire de chaleur qui se manifeste au niveau des muscles.

$$BF(i,2) = BF_b(i,2) + \frac{W(i) + Ch(i)}{1.16} \quad (13)$$

$$Ch(i,2) = \left(-C_{ch} \times Error(1,1) - S_{ch} \times (Warms - Colds) + 24.4 \times Cld(1,1) \times Colds\right) \times Chilf \quad (14)$$

P_{dl} , C_{ch} , S_{ch} et P_{st} sont des coefficients de contrôle et sont pris égale à 0.

5. VALIDATION DU MODELE

Les résultats du présent modèle sont confrontés aux résultas d'expériences menées par des chercheurs dans le cadre de leurs travaux sur le phénomène des réactions physiologiques. La comparaison est faite en régime établi, ainsi qu'en régime transitoire.

5.1 Régime établi

Le **tableau 1** illustre les données provenant des travaux d'une équipe de recherche de l'Université de Berkeley, Californie, et celles fournies par Olsen et Fanger. Ces données concernent la température de la peau de sujets portant un habit de travail et se trouvant dans une ambiance qu'ils considèrent neutre [6]. Il est à noter que pour des conditions similaires, la différence entre les deux données expérimentales dépasse des fois 1,5 °C. Cela démontre la complexité de prévoir le comportement humain face à un environnement donné.

Tableau 1: Température de la peau en ambiance neutre

Segment	Température de la peau (°C)		
	Fanger et Olson	Berkeley UC	Modèle développé
Front	34.2	35.8	34.5
Torse	34.5	35.1	34.8
Dos	34.3	35.3	34.4
Abdomen	34.9	35.3	34
Bras	33.5	34.2	33
Avant bras	32.7	34.6	32
Mains	33.5	34.4	33.3
Cuisses	33.7	34.3	34.2
Jambes	32.2	32.7	31.2
Pieds	32.2	33.3	31.3
Moyenne	33.38	34.45	34.3

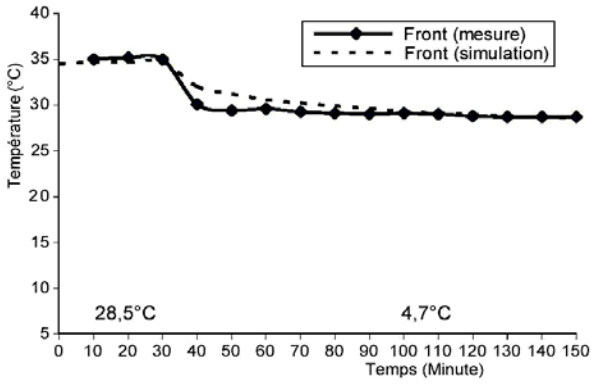
Le **tableau 1** montre que la différence entre les résultats du modèle et ceux résultant de l'expérience de Fanger et Olsen ne dépasse pas 1 °C. Nous pouvons ainsi prétendre que le modèle reproduit assez bien le comportement du corps humain en régime établi.

5.2 Régime transitoire

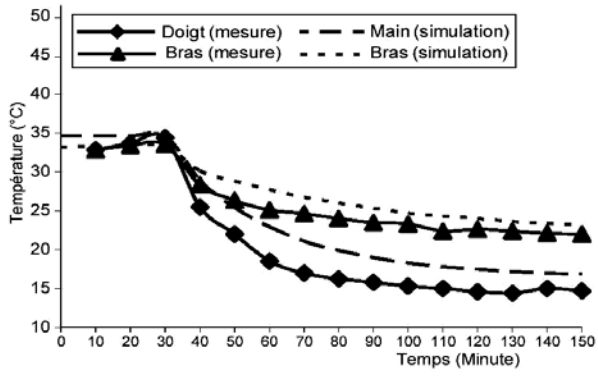
La figure 2 montre les résultats de l'expérience menée par Raven *et al.* [4] sur 11 personnes ayant transité d'une chambre se trouvant à 28,5 °C et une humidité de 45 % vers une autre chambre se trouvant à 4,5 °C et RH = 70 %. Ces personnes portaient un short et se trouvaient en état de repos. La température cutanée au niveau du front, du bras, du doigt, de la cuisse et de l'orteil a été relevée. D'après la figure 2-a, nous pouvons remarquer que la température mesurée au niveau du front et celle simulée par le modèle ont une parfaite concordance.

Sur les figures 2-b et 2-c, nous remarquons que même si l'allure des courbes est semblable, les températures mesurées chutent plus rapidement que ceux données par le modèle pour se rejoindre en fin de compte quand le régime se stabilise. Ceci peut être dû au fait que la température est mesurée en un seul point, alors que le modèle calcule la température moyenne du segment.

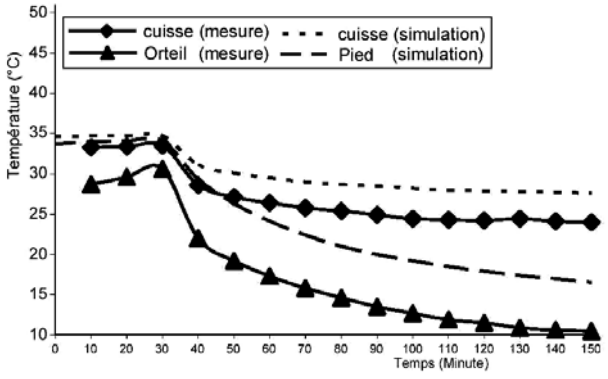
En ce qui concerne la main, comme le pied d'ailleurs, nous remarquons que la différence est plus prononcée avec des températures simulées plus grandes que les températures mesurées. Ceci est causé par le fait que les températures sont mesurées au niveau du doigt et de l'orteil, et que ces derniers ont tendance à réagir plus rapidement aux excitations extérieures, vu qu'ils sont les parties extrêmes de la main et du pied.



(a)

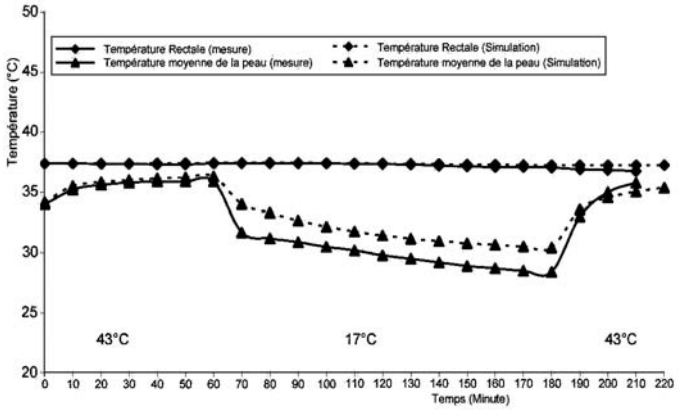


(b)

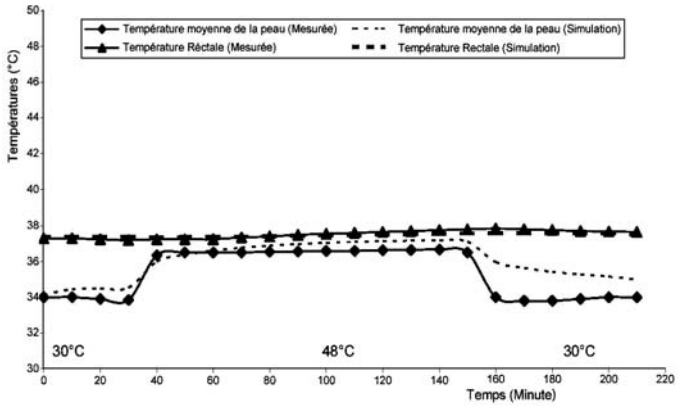


(c)

Fig. 2: Comparaison entre les températures mesurées et simulées pour un changement d'état de 28,5°C à 4.7°C



(a) Changement d'état de 43 °C vers 17 °C, puis 43°C



(b) Changement d'état de 30 °C vers 48 °C puis 30 °C

Fig. 3: Comparaison entre températures simulées et mesurées (avec changement d'état)

La figure 3 montre les résultats d'une expérience menée par Hardy et Stolwijk sur trois personnes, qui sont passé d'une chambre A où l'ambiance était à 43 °C et RH = 30 % vers une chambre B à 17 °C et RH = 40 %, puis sont retourné vers la chambre A.

La température rectale et la moyenne de la température de la peau relevée sur 10 endroits sont présentées. La même expérience a été menée pour un passage d'une ambiance de 30 °C avec RH = 40 % vers une ambiance à 48 °C et RH = 30 %, puis retour à nouveau à l'ambiance précédente, à 30 °C [4].

La figure 3 montre une très bonne concordance entre les valeurs mesurées de la température rectale et ceux simulés avec des valeurs oscillant autour de 37 °C. En ce qui concerne la température moyenne de la peau, nous remarquons que l'allure des courbe est la même. La moyenne des températures mesurées est légèrement inférieure à celle simulée par le modèle. Cette légère différence peut s'expliquer par le fait que l'expérience est menée sur un groupe de personnes qui ont des corpulences et des comportements différents, alors que le modèle considère une personne de taille standard.

6. APPLICATION

En conditions d'hiver ou d'été, les standards usuels de confort sont souvent limités par une température d'ambiance et une gamme d'humidité relative. Ces normes sont souvent issues de tests de laboratoires et négligent les effets de l'acclimatation de l'individu qui sont essentiellement dus aux ajustements des comportements comme celui lié à l'habillement.

A titre d'application, nous avons évalué l'influence de trois tenues vestimentaires sur la température cutanée d'une personne se trouvant dans un logement de construction standard de l'habitat du nord algérien.

Les trois tenues vestimentaires correspondent à un habillement léger (I_{cl} = 0.1 clo), un habillement moyen (I_{cl} = 0.43 clo), et un habillement relativement chaud (I_{cl} = 0.95 clo). La simulation est faite pendant une journée moyenne du mois de mars tout en supposant que l'habitation n'est pas chauffée. Le choix s'est posé sur le mois de mars, car il peut être considéré comme le dernier mois de la saison de chauffe et pendant lequel les besoins de chauffage sont réduits par rapport aux autres mois de l'hiver.

La représentation mathématique du bâtiment est effectuée sous le logiciel Trnsys [7]. La température intérieure ainsi obtenue est intégrée dans le code de calcul développé dans la présente étude.

Chez l'homme, la température cutanée doit se maintenir entre 33 °C et 35 °C pour être en état de neutralité thermique. En dehors de cette zone, la sensation d'inconfort se fait ressentir, d'où la nécessité de chauffer ou de refroidir l'environnement dans lequel nous vivons.

La figure 4 montre qu'avec une tenue vestimentaire légère (0.1 clo) la température cutanée moyenne du corps avoisine 30 °C. En passant à une résistance vestimentaire de 0.43 clo la température du corps augmente d'environ 2 °C, et en passant à une résistance de 0.95 clo, la température augmente de 3 °C pour atteindre la température limite de la zone de confort. Il est à noter qu'une température du corps en dessous de la limite inférieure de la zone de confort est synonyme de besoins en chauffage et qu'un rapprochement de cette zone équivaut à une réduction de la consommation énergétique.

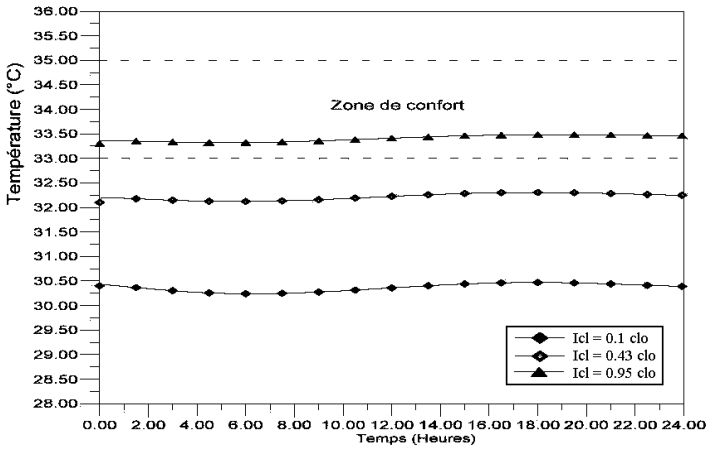


Fig. 4: Température cutanée en fonction de la résistance vestimentaire

7. CONCLUSION

Cette étude est une première étape d'un travail qui a pour objectif l'élaboration d'un modèle de confort thermique et de participer au développement des indices de confort thermique dans le domaine de l'habitat.

Ce modèle servira à étudier l'impact des systèmes de chauffage, de ventilation et de refroidissement sur les sensations ressentis par l'être humain. Un modèle de sensation thermique en régime transitoire et en milieu non homogène a été développé.

Les résultats simulés des températures en différents points du corps ont été comparés à des résultats d'études expérimentales. Les résultats du modèle présente une assez bonne concordance avec la réalité.

Durant la période d'hiver, l'homme peut atteindre son confort thermique en intervenant sur deux plans, soit sur son environnement en chauffant, soit en acclimatant son comportement par le port de vêtements adéquats. L'étude nous montre qu'en mettant une tenue d'intérieur adéquate pour la période d'hiver, nous pouvant raccourcir la période de chauffage et ainsi réduire nos besoins énergétiques.

NOMENCLATURE

BF : Débit sanguin (l/h)

C : Chaleur spécifique (Wh/°C)

CD : Energie échangée par conductivité (W)

E : Energie évacuée par évaporation (W)

h_x : Coefficient d'échange par contre-courant

Q : Métabolisme (W)

Q_b : Métabolisme de base (W)

Q_x : Energie échangée par contre-courant (W)

BF_b : Débit sanguin de base (l/h)

Dilat : Signal de vasodilatation

Ch : Chaleur dégagée lors des frissons (W)

E_{max} : Evaporation maximale (W)

P_a : Pression de vapeur d'eau de l'air extérieur (kPa)

Q_c : Energie échangée par convection (W)

Q_r : Energie échangée par rayonnement (W)

Res : Chaleur évacuée par respiration (W)

Skric : Signal de vasoconstriction

Skins : Coefficient de distribution des thermorécepteurs sur la peau pour la sudation

Skinc : Coefficient de distribution des thermorécepteurs de vasoconstriction

T : Température (°C)

$T_{bl,a}$: Température dans l'artère (°C)

T_{sk} : Température cutanée (°C)

Skinv : Coefficient de distribution des thermorécepteurs de vasodilatation

Skinr : Coefficient de distribution des thermorécepteurs sur la peau

T_{ext} : Température extérieures (°C)

$T_{bl,v}$: Température dans la veine (°C)

W : Travail externe (W)

REFERENCES

[1] J.A.J. Stolwijk and J.D. Hardy, '*Control of Body Temperature, Handbook of Physiology*', Section 9, Chapter 4, American Physiology Society, Bethseda, Maryland, pp. 45 – 68, 1977.

[2] A.P. Gagge, A.P. Fobeletes and L.G. Berglund, '*A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment*', ASHRAE Transactions 92(2B), pp 709 – 731, 1986.

[3] D. Fiala, '*Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort*', PhD. Thesis, Institute of Energy and Sustainable Development, De Montfort University, Leicester, 1998.

[4] C. Huizenga, H. Zhang and E. Arens, '*A Model of Human Physiology and Comfort for Assessing Complex Thermal Environments*', Building and Environment, Vol. 36, pp. 691 – 699, 2001.

[5] S. Tanabe, K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki and M. Konishi, '*Evaluation of Thermal Comfort Using Combined Multi-Node Thermoregulation (65MN) and Radiation Models and Computational Fluid Dynamics (CFD)*', Energy and Building, Vol. 34, pp. 637 – 646, 2002.

[6] E. Arens and H. Zhang, '*Thermal Moisture Transport In Fibrous Materials, Part 16- The Skin's Role in Human Thermoregulation and Comfort*', Edited by N. Pan and P. Gibson, CRC Press; 2006.

[7] Trnsys 16. '*A Transient System Simulation Program*', Reference Manual, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.

[8] ISO 9920, '*Ergonomics of the Thermal Environment - Estimation of the Thermal Insulation and Evaporative Resistance of a Clothing Ensemble*', Geneva ISO; 2005.

[9] R.J. de Dear, E. Arens, Z. Hui and M. Oguro, '*Convective and Radiative Heat Transfer Coefficients for Individual Human Body Segments*', International Journal of Biometeorology, Vol. 40, pp. 141 – 156, 1997.

[10] M. Oguro, E. Arens and R.J. de Dear, '*Convective Heat Transfer Coefficients and Clothing Insulations for Parts of the Clothed Human Body Under Air Flow Conditions*', Journal of Architecture Plann. Environ. Eng., AIJ 61, pp. 21 – 29, 2002.

[11] D. Fiala, K. Lomas and M. Stoher, '*First Principles Modelling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions*', ASHRAE Transactions, Vol. 109, pp. 179 – 186, 2003.

[12] F. Thellier, F. Monchoux, M. Bonnis-Sassi and B. Lartigue, '*Modelling Additional Solar Constraints on a Human Being Inside a Room*', Solar Energy, Vol. 82, N°4, pp. 290 – 301, 2008.

[13] T. Umeno, S. Hokoi and S. Takada, '*Prediction of Skin and Clothing Temperature under Thermal Transient Considering Moisture Accumulation in Clothing*', ASHRAE Transactions, Vol. 107, pp. 71 – 92, 2001.

[14] B.A. Ying, Y.L. Kwork, Y. Li, C.Y. Yeung, F.Z. Li and S. Li, '*Mathematical Modelling of Thermal Physiological Responses of Clothed Infants*', Journal of Thermal Biology, Vol. 29, pp. 5596 – 5565, 2004.

[15] K.C. Parsons, '*Computer Models as Tools for Evaluating Clothing Risks and Controls*', Ann. Occup. Hyg., Vol. 39, N°6, pp. 827 – 839, 1995.