

Flux solaires absorbés par l'occupant d'un local vitré. Prise en compte dans l'équation du confort thermique

Laurent Serres^{a,*}, Alain Trombe^b, Jacques Miriel^a

^a Laboratoire de Thermique des Bâtiments, Groupe de Recherche en Génie Civil Rennes, INSA, 20 av. des Buttes de Coësmes, 35043 Rennes cedex, France

^b Laboratoire d'Études Thermiques et Mécaniques, INSA, 135 av. de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 04, France

(Reçu le 9 septembre 1999, accepté le 27 juillet 2000)

Résumé — Les auteurs ont, par le passé, développé des outils numériques permettant de déterminer les flux solaires absorbés par chaque surface d'un local vitré. Dans cet article, ils exploitent ces outils pour calculer les flux solaires absorbés par un occupant. Les résultats montrent alors que, même pour un individu qui n'est pas directement ensoleillé, les flux absorbés peuvent être comparables aux autres termes du bilan thermique de l'homme. De plus, les flux solaires provoquent une asymétrie de rayonnement qui est quantifiée dans cet article. L'influence des coefficients d'absorption solaire des parois du local et des vêtements sur ces flux a ensuite été étudiée. Enfin, les auteurs ont évalué l'impact de ces flux sur l'ensemble des échanges thermiques entre l'occupant et son environnement, en adaptant la formule du PMV à la présence de rayonnement solaire. On montre alors que les échanges entre l'être humain et son environnement sont fortement perturbés, et que la charge thermique est augmentée dans des proportions importantes. © 2001 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

confort thermique / rayonnement solaire / asymétrie de rayonnement / bilan thermique de l'occupant / vote moyen prévisible (PMV)

Abstract — Solar fluxes absorbed by the dweller of glazed premises. Influence upon the thermal comfort equation. The authors have developed numerical tools to compute solar fluxes absorbed by each surface of premises with windows. In this article, they use these tools to calculate solar fluxes absorbed by an occupant. Results show that, even if the beam radiation does not strike the occupant, absorbed solar fluxes can be as important as other terms in human heat balance. Furthermore, solar fluxes involve a radiant asymmetry that is quantified in this article. The influence of solar absorbance of walls and clothing on these fluxes was then studied. Finally, the authors quantified this radiation impact on all thermal exchanges between the occupant and his environment, by adapting PMV formulation to take into account solar loads in it. It can, therefore, be shown that thermal exchanges between the occupant and ambience are modified, and that the thermal load increases substantially. © 2001 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

thermal comfort / solar radiation / radiant asymmetry / human heat balance / Predicted Mean Vote (PMV)

Nomenclature

CLO	courtes longueurs d'ondes	I_{cl}	résistance thermique des vêtements . . .	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
C	échanges convectifs entre l'occupant et son environnement	M	métabolisme total	$W \cdot m^{-2}$
$Evap$	terme d'évaporation	P_a	pression partielle de vapeur d'eau	Pa
f_{cl}	rapport de surface du corps habillé à la surface du corps nu	PMV	vote moyen prévisible	
GLO	grandes longueurs d'ondes	PPD	pourcentage prévisible d'insatisfaits . . .	%
h_c	coefficient d'échanges par convection naturelle	R	échanges par rayonnement GLO entre l'occupant et son environnement	$W \cdot m^{-2}$
		$Resp$	échanges respiratoires	$W \cdot m^{-2}$
		S	charge thermique du corps humain	$W \cdot m^{-2}$
		T_a	température de l'air	$^{\circ}C$
		T_{cl}	température des vêtements	$^{\circ}C$

* Correspondance et tirés à part.

E-mail address: laurent.serres@univ-rennes1.fr (L. Serres).

\bar{T}_r	température moyenne de rayonnement (température d'une enceinte isotherme fictive qui provoquerait les mêmes échanges radiatifs que ceux que l'on a avec les températures réelles de l'enceinte non-isotherme)	°C
Var	vitesse d'air relative au corps humain	$m \cdot s^{-1}$
W	travail extérieur	$W \cdot m^{-2}$
ϕ	flux solaire surfacique absorbé par l'individu	$W \cdot m^{-2}$
$\alpha_{\text{sun paroi}}$	coefficient d'absorption au rayonnement solaire des parois du local	
$\alpha_{\text{sun vêt}}$	coefficient d'absorption au rayonnement solaire des vêtements	

0. INTRODUCTION

Les exigences de confort dans les bâtiments ont fortement évoluées durant ces dernières années. Le confort thermique n'échappe pas à cette évolution : le simple respect d'une température d'air intérieur n'est plus suffisant, et même la notion de température résultante sèche est limitée en cas d'ensoleillement.

Parallèlement à ces évolutions, depuis les années soixante-dix, sont apparus des modèles de thermorégulation humaine [1], qui ont été ensuite couplés avec des modèles de thermique de l'enveloppe [2]. Ces modèles permettent d'évaluer une ambiance en terme de confort thermique en prenant en compte tous les échanges entre l'individu et son environnement. Toutefois, ils ne sont pas prévus pour une application dans un local comprenant des baies vitrées par lesquelles le soleil peut entrer. Il semblerait en effet que seul Yilmaz [3] prenne en compte les flux solaires dans son modèle, mais en négligeant les flux réfléchis par les parois.

Dans des travaux récents [4] nous avons mis au point des outils permettant de déterminer les flux solaires à prendre en compte dans le bilan thermique d'une surface quelconque d'un local. En considérant l'occupant du local comme un obstacle au rayonnement solaire, on peut déterminer les flux qu'il absorbe. Nous présentons dans ce qui suit ces résultats pour différents cas d'étude. Puis, nous évaluons l'importance des flux solaires absorbés face aux autres termes du bilan thermique de l'homme.

1. QUANTIFICATION DES FLUX SOLAIRES ABSORBÉS PAR UN OCCUPANT

1.1. Nature de ces flux

Un homme immobile dans un local vitré peut recevoir trois types de rayonnement solaire :

- le flux solaire direct entrant par la baie vitrée vient frapper directement l'individu, on dit alors qu'il est « au soleil » (flux direct incident) ;
- le flux solaire direct entrant par la baie vitrée vient frapper l'individu après avoir été réfléchi par une ou plusieurs parois (flux direct réfléchi) ;
- le flux solaire diffus entrant par la baie vitrée est en partie reçu par l'individu, éventuellement après une ou plusieurs réflexions (flux diffus).

1.2. Méthodes de détermination

1.2.1. Flux direct incident

Ce flux est relativement facile à évaluer, puisqu'il suffit de connaître le flux solaire incident à la fenêtre et la transmittivité du vitrage en fonction de l'angle d'incidence. Il faut alors déterminer si l'occupant est touché par le rayonnement solaire direct, ce que l'on peut faire avec un outil de localisation de tache solaire. Par contre, il semble que les effets de ce type de rayonnement sur les sensations de confort soient encore mal connus [3, 5, 6].

1.2.2. Flux direct réfléchi

Le flux direct entrant par la baie vitrée atteint une ou plusieurs parois. Une partie de ce flux est alors réfléchi vers les autres surfaces, et vers l'individu occupant les lieux. Selon sa position, celui-ci va recevoir des flux différents sur les différentes parties de son corps.

La méthode de calcul de ces flux consiste à déterminer, à partir des données météorologiques et des propriétés optiques du vitrage, le flux solaire entrant dans le local. Le modèle de tache solaire, développé au Laboratoire d'Études Thermiques et Mécaniques de l'INSA Toulouse [4, 7], permet de définir précisément la géométrie de la (ou des) zone(s) touchée(s), qui devien(nen)t ainsi une (ou des) nouvelle(s) surface(s) à part entière. On calcule alors un jeu de facteurs de forme prenant en compte à la fois ces nouvelles surfaces et l'individu qui constitue un obstacle au rayonnement. Un modèle

mathématique de détermination des facteurs de forme en présence d'obstacle(s), développé par Mavroulakis et al. [8], permet ce calcul. La réflexion du flux direct étant alors considérée comme purement diffuse, les facteurs d'échanges globaux [9, 10], entre les différentes taches et une paroi « donnent la part du flux solaire réfléchi par les taches qui est absorbée par la surface ».

Notons que l'hypothèse de la réflexion diffuse est loin d'être validée : on sait que certains revêtements de sol peuvent donner une composante de réflexion spéculaire non négligeable, tout au moins pour les courtes longueurs d'onde. Dans ce cas, l'individu pourra, dans certaines positions, recevoir un flux plus important que celui prédit en considérant la réflexion comme purement diffuse. Pour d'autres positions ce flux sera au contraire plus faible.

1.2.3. Flux diffus

On suppose que la fenêtre peut être assimilée à un émetteur de chaleur, et rayonne de manière diffuse vers les autres parois du local. On peut donc utiliser la méthode des facteurs d'échange globaux [9, 10], puisque la situation est tout à fait comparable à celle du rayonnement infrarouge entre parois, la seule différence étant la valeur du coefficient de réflexion. Connaissant le flux diffus entrant par la fenêtre, les facteurs d'échanges globaux entre la fenêtre et les autres surfaces donnent la répartition de ce flux sur l'ensemble des parois, y compris sur l'occupant.

1.3. Définition d'un cas d'étude

Il est caractérisé essentiellement par la géométrie du local, son orientation, et la géométrie approchée de l'homme.

1.3.1. Géométrie du local

Nous étudions ici un local de type bureau ou séjour d'habitation, dont les dimensions sont données sur la figure 1. La baie vitrée est orientée plein Sud.

1.3.2. Géométrie du mannequin

La géométrie du corps humain est ramenée à un ensemble de surfaces planes (figure 2). Les dimensions sont inspirées de celles adoptées par Belmasjor [5], qui a transformé la géométrie de l'homme standard selon Stolwijk [1] (constituée de cylindres et de sphères), en une géométrie équivalente constituée de parallélépipèdes.

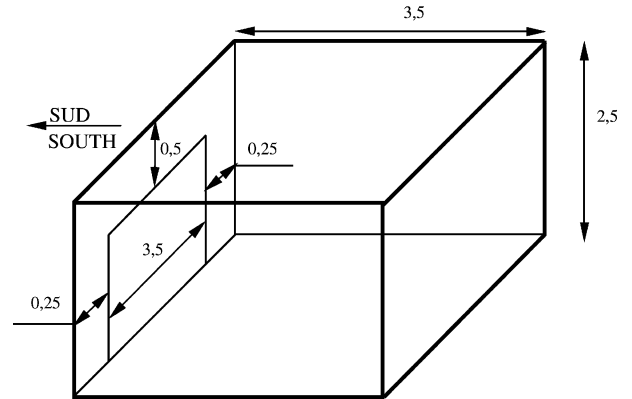


Figure 1. Géométrie du local étudié.

Figure 1. Studied premises geometry.

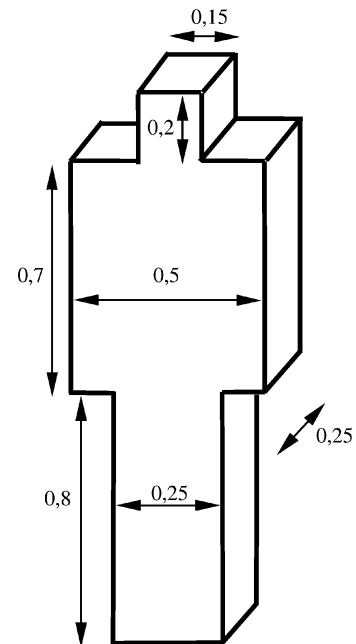


Figure 2. Géométrie approchée du corps humain.

Figure 2. Approached human body geometry.

Cette équivalence réside en la conservation des surfaces et des volumes entre les deux géométries. Cette démarche se justifie tout à fait pour Belmasjor, qui étudie l'ensemble des échanges entre le corps humain et son environnement, mais elle tend à réduire les dimensions du sujet. Par exemple, l'individu de Belmasjor ne mesure que 1,65 m contre 1,72 m pour celui de Stolwijk. Or, l'occupant n'étant pour nous qu'un simple obstacle, nous avons préféré considérer des dimensions légèrement supérieures à celles de Belmasjor, de façon à respecter le

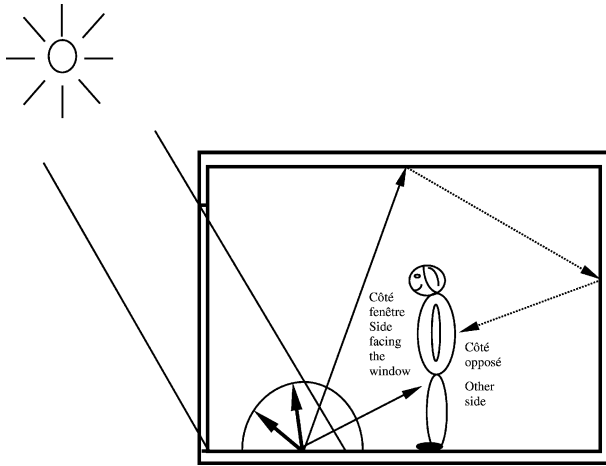


Figure 3. Occupant soumis au flux direct réfléchi par la tache et au flux diffus entrant par la baie vitrée.

Figure 3. Occupant who receives beam radiation reflected by the sun spot and diffuse radiation entering by the window.

« masque » que constitue l'individu (c'est à dire les dimensions de l'obstacle).

Nous avons placé l'occupant à 0,8 m de la paroi vitrée lui faisant face, et nous avons étudié la journée du 24 juin 1994 à Toulouse (Sud de la France). Le corps humain n'est, ce jour là, et dans cette position, jamais touché par le flux solaire direct. Par contre, le flux direct réfléchi par la tache, et le flux diffus entrant par la baie vitrée, l'atteignent (figure 3).

1.4. Résultats

1.4.1. Flux absorbés par le corps humain

A partir des flux solaires relevés durant la journée étudiée, nous avons déterminé les flux absorbés par l'occupant faisant face à la baie vitrée.

Partant d'un cas de référence pour lequel toutes les surfaces sont caractérisées par un coefficient d'absorption solaire de 0,5, nous avons successivement fait varier les coefficients d'absorption solaire de l'occupant et des parois du local entre 0,3 et 0,9.

Remarques :

- Concernant le « coefficient d'absorption des vêtements », il s'agit plutôt d'un coefficient global, caractérisant le comportement des différentes parties habillées (transmission directe et absorption) et de la peau (absorption).
- Les courbes commentées ci-après sont uniquement tracées sur la période pendant laquelle l'ensoleillement direct pénètre dans le local. Pour la journée et le local

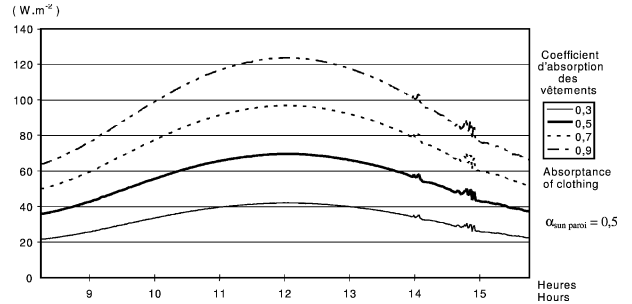


Figure 4. Flux globaux absorbés par les parties du corps humain faisant face à fenêtre pour différents coefficients d'absorption solaire des vêtements.

Figure 4. Global fluxes absorbed by the human body parts facing the window for different solar absorbances of clothing.

étudiés, cette période commence à 8h14 et finit à 15h46 (heures solaires).

La figure 4 présente les flux solaires absorbés par les surfaces du corps humain orientées face à la fenêtre pour différentes valeurs du coefficient d'absorption des vêtements. Dans le cas de référence, ce flux atteint environ $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (ce qui correspond au métabolisme d'un homme debout au repos). Dans le cas extrême, on atteint une valeur supérieure à $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Les flux évoluent de manière quasi proportionnelle au coefficient d'absorption solaire des vêtements. On peut donc affirmer que, même si l'occupant n'est pas touché par le rayonnement solaire direct, les flux solaires qu'il peut recevoir dans un local vitré peuvent être du même ordre de grandeur que les autres échanges thermiques mis en jeu. Notons également, qu'en début de période considérée, alors que le flux solaire direct n'entre pas encore dans le local, le flux solaire absorbé par l'individu est déjà conséquent (entre 21 et $63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ selon le coefficient d'absorption des vêtements). Le flux solaire diffus entrant par les baies vitrées peut donc, à lui seul, constituer un apport thermique non négligeable pour le corps humain.

Sur la figure 5, nous avons également reporté les flux solaires absorbés par le côté du corps de l'occupant faisant face à la fenêtre. Le coefficient d'absorption solaire des vêtements est cette fois-ci constant et égal à 0,5 tandis que nous avons fait varier le coefficient d'absorption solaire des parois du local. L'augmentation de ce coefficient provoque bien évidemment une baisse des flux réfléchis vers l'individu, et donc des flux qu'il absorbe. Toutefois en comparant les figures 4 et 5, on s'aperçoit que le coefficient des parois a moins d'influence que celui des vêtements.

Nous avons reporté, sur la figure 6, les flux maxima obtenus durant la journée de simulation, en faisant varier à la fois les coefficients d'absorption des parois, et ceux

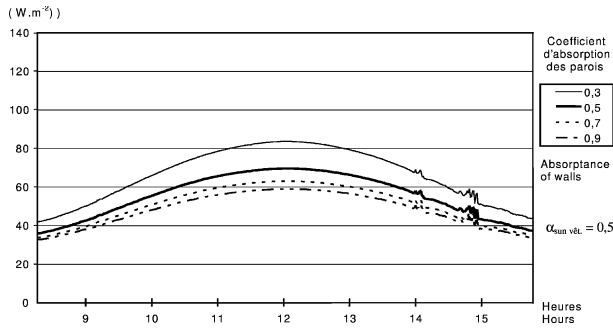


Figure 5. Flux globaux absorbés par les parties du corps humain faisant face à la fenêtre pour différents coefficients d'absorption solaire des parois du local.

Figure 5. Global fluxes absorbed by the human body parts facing the window for different solar absorbances of walls.

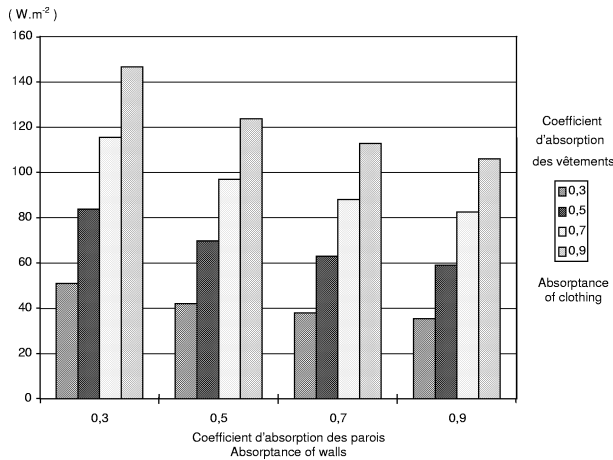


Figure 6. Flux absorbés maxima pour différents coefficients d'absorption solaire des parois et des vêtements.

Figure 6. Most important absorbed fluxes for different solar absorbances of walls and clothing.

des vêtements. Il existe alors un rapport de 4 entre les cas extrêmes envisagés.

Nous avons procédé aux mêmes calculs pour les parties arrières du corps humain opposées à la fenêtre (figures 7 et 8). Les flux sont évidemment plus faibles que pour les surfaces du corps côté fenêtre. Pourtant, on constate dans certains cas, des flux de plus de $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, ce qui n'est pas négligeable par rapport aux autres échanges thermiques auxquels est soumis le corps.

On remarque également sur la figure 7 que les flux absorbés varient, comme pour l'autre face, de manière quasi proportionnelle avec le coefficient d'absorption des vêtements.

Par contre, figure 8, il est clair que le coefficient d'absorption des parois joue fortement sur les flux absorbés

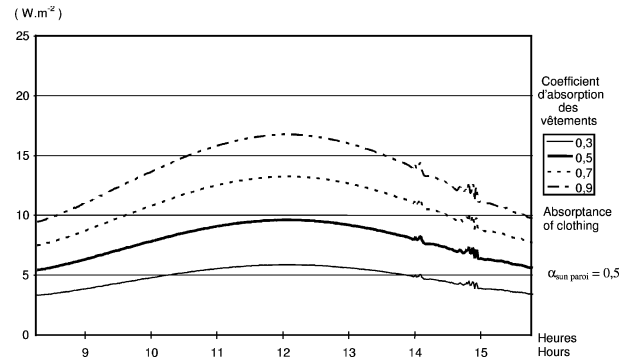


Figure 7. Flux globaux absorbés par les parties arrières du corps pour différents coefficients d'absorption solaire des vêtements.

Figure 7. Global fluxes absorbed by the back side of the body for different solar absorbances of clothing.

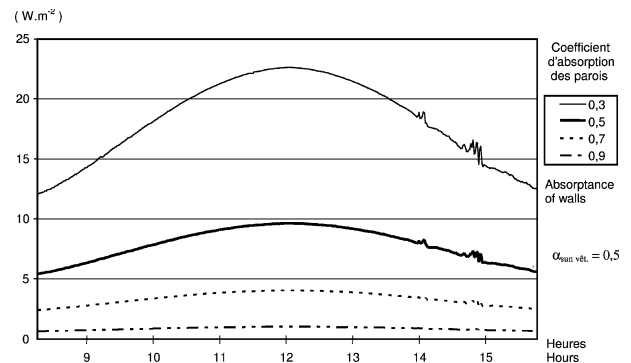


Figure 8. Flux globaux absorbés par les parties arrières du corps pour différents coefficients d'absorption solaire des parois.

Figure 8. Global fluxes absorbed by the back side of the body for different solar absorbances of walls.

par les parties arrières du corps humain (ils sont environ multipliés par 20, lorsque la valeur de ce coefficient passe de 0,9 à 0,3). Cela tient au fait que le flux est absorbé après une ou plusieurs réflexions, alors que le flux diffus entrant par la fenêtre peut frapper directement l'autre face.

1.5. Asymétrie de rayonnement solaire

On sait que, même pour des conditions thermiques globalement satisfaisantes, une forte asymétrie de rayonnement peut être source d'inconfort. Aussi, avons nous porté sur la figure 9, pour un coefficient d'absorption des vêtements égal à 0,5, l'asymétrie de rayonnement (différence entre les flux absorbés par deux faces de l'occupant verticales et opposées) pour différentes valeurs de

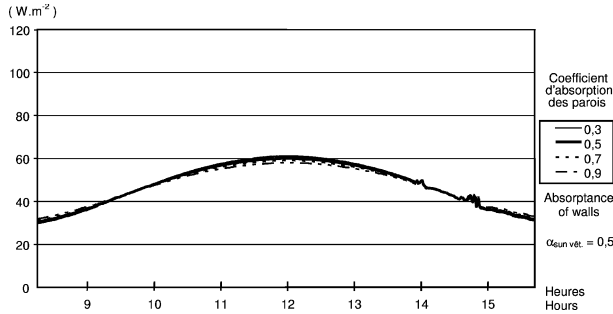


Figure 9. Asymétrie de rayonnement pour différents coefficients d'absorption solaire des parois.

Figure 9. Radiant asymmetry for different solar absorptances of walls.

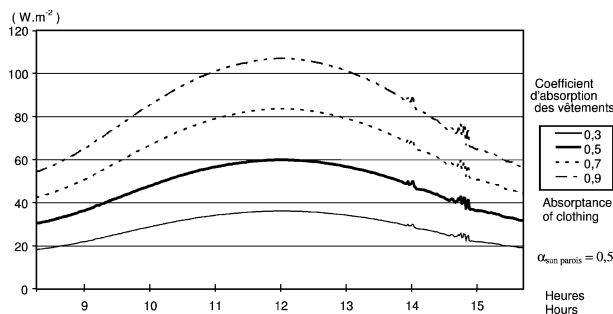


Figure 10. Asymétrie de rayonnement pour différents coefficients d'absorption solaire des vêtements.

Figure 10. Radiant asymmetry for different solar absorptances of clothing.

coefficients d'absorption solaire des parois du local. On constate que les variations des flux absorbés, en fonction de ces mêmes coefficients, observées pour les deux faces de l'individu (voir figures 5 et 8) s'annihilent presque parfaitement. Aussi, l'asymétrie de rayonnement ne varie quasiment pas avec le coefficient d'absorption solaire des parois.

Par contre les variations sont conséquentes si on considère différentes valeurs de coefficients d'absorption des vêtements (voir figure 10). L'asymétrie est en effet pratiquement proportionnelle à ce coefficient, et varie d'environ 20 à 105 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Par conséquent, on peut dire que l'asymétrie de rayonnement est importante, même s'il n'y a pas de tache solaire dans la pièce, et à plus forte raison si cette tache apparaît. Les valeurs obtenues sont en effet plus élevées que celles trouvées par Thellier [2] et Gouet [11] en présence de parois froides et chaudes.

Il est cependant difficile de conclure sur un inconfort car :

- les rayonnements ne sont pas de même nature (CLO et GLO) ;

- le facteur psychologique joue ici certainement un rôle important : on accepte peut être mieux un fort rayonnement lorsqu'on sait qu'il est d'origine solaire.

Les chercheurs anglo-saxons ou nordiques, eux, ne donnent pas leurs résultats en fonction des flux, mais par rapport à différents indices de confort, a priori inadaptés à la présence de rayonnement solaire [12–14].

2. PREMIÈRE ÉVALUATION DE L'IMPACT DU RAYONNEMENT SOLAIRE SUR LE CONFORT THERMIQUE GLOBAL

Deux démarches peuvent être envisagées pour prédire le confort thermique.

D'une part, on peut établir des modèles capables de simuler le fonctionnement de l'ensemble humain/habitat. C'est ce qui a été réalisé [2, 5] en couplant un programme basé sur le modèle de Stolwijk, et un modèle de calculs thermiques du bâtiment (TRNSYS). On a vu que nos outils (localisation de taches solaires, et répartition des flux solaires dans les locaux avec obstacles) apportent des données supplémentaires à l'étude de ce couplage. L'avantage de tels modèles réside dans le fait qu'ils affinent l'approche des phénomènes réels, et qu'ils peuvent rendre compte d'inconforts locaux.

D'autre part, on peut se servir de méthodes qui, à partir de conditions plus ou moins complexes d'ambiances extérieures au corps humain, aboutissent à un indice unique censé évaluer le niveau de confort (PMV [15], UCRES [16], ETPS [17], PMV* [18]. . .). L'avantage de ces indices est leur simplicité et le fait qu'ils ont, pour certains, été validés expérimentalement. Par contre, ils ne peuvent pas prédire les inconforts locaux (ou alors de manière très simplifiée). De plus, leur formulation ne prévoit pas la présence de rayonnement solaire ; ils n'ont donc évidemment pas été validés dans ce cas là.

Toutefois, le plus utilisé de ces indices (le vote moyen prévisible ou PMV) étant basé sur un bilan thermique du corps humain, il nous a semblé intéressant d'adapter sa formulation à la présence de rayonnement solaire, et de voir si sa valeur est alors modifiée de manière notable.

2.1. Le PMV (Predicted Mean Vote)

La notion de PMV s'appuie donc sur l'équation du bilan thermique simplifié d'un corps humain supposé à l'équilibre thermique (sans mettre en jeu d'importants

phénomènes de thermorégulation), et placé dans l'ambiance à analyser :

$$S = \underbrace{(M - W)}_{\text{Production interne de chaleur}} - \underbrace{(Evap + R + C + Resp)}_{\text{Echanges avec le milieu}}$$

S étant la charge thermique.

La définition du PMV selon la norme ISO 7730 [19] revient à écrire de manière plus synthétique :

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)S$$

Selon sa valeur il indique « l'avis moyen d'un groupe important de personnes exprimant un vote de sensation thermique » suivant une échelle allant de 3, correspondant à chaud, à -3, correspondant à froid (0 = neutralité thermique). Les différents termes entrant dans sa formulation s'écrivent comme suit :

$$Evap = 3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6,99(M - W) - P_a) + 0,42(M - W - 58,15)$$

$$Resp = 0,0014M(34 - T_a) + 1,7 \cdot 10^{-5}M(5867 - P_a)$$

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4)$$

$$C = h_c f_{cl} (T_{cl} - T_a)$$

avec :

$$h_c = \text{MAX}\{2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25}; 12,1\sqrt{Var}\}$$

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}(R + C)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{si } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \\ 1,05 + 0,645I_{cl} & \text{si } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \end{cases}$$

2.2. Adaptation de la notion de PMV à la présence de rayonnement solaire

Précisons tout d'abord que dans ce qui suit les grandeurs qui prennent en compte le flux solaire absorbé seront annotées d'un prime ('), et que Δ variable sera égal à (variable' - variable). Le flux solaire ϕ , absorbé par les vêtements, intervient au même niveau que le rayonnement infrarouge, c'est à dire dans les expressions de R , T_{cl} , et donc indirectement dans le terme convectif C . La température des vêtements en présence de rayonnement solaire s'écrit alors :

$$\begin{aligned} T'_{cl} &= 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl}(R' + C' - \phi) \\ &= 35,7 - 0,028(M - W) \\ &\quad - I_{cl}(R + \Delta R + C + \Delta C - \phi) \end{aligned}$$

ce qui donne :

$$\Delta T_{cl} = I_{cl}(\phi - \Delta C - \Delta R)$$

Dans l'expression du PMV, le terme de convection se calcule de deux manières différentes, selon que la convection forcée est négligeable ou pas. Dans le cas de la convection naturelle, le terme convectif en présence de rayonnement solaire s'écrit :

$$C' = 2,38 f_{cl} (T'_{cl} - T_a)^{1,25}$$

d'où

$$\begin{aligned} \Delta C &= C' - C \\ &= 2,38 f_{cl} [(T'_{cl} - T_a)^{1,25} - (T_{cl} - T_a)^{1,25}] \end{aligned}$$

En ce qui concerne le terme de rayonnement grande longueur d'onde en présence de flux solaire, on obtient :

$$R' = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T'_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4)$$

soit

$$\Delta R = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T'_{cl} + 273)^4 - (T_{cl} + 273)^4)$$

on peut aussi écrire ΔPMV :

$$\Delta PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)(\phi - \Delta R - \Delta C)$$

En remplaçant ΔR et ΔC par leurs expressions on obtient :

$$\begin{aligned} \Delta PMV &= (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \\ &\quad \cdot \left\{ \phi - \underbrace{3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T'_{cl} + 273)^4 - (T_{cl} + 273)^4]}_{\text{augmentation des pertes radiatives}} \right. \\ &\quad \left. - \underbrace{2,38 f_{cl} [(T'_{cl} - T_a)^{1,25} - (T_{cl} - T_a)^{1,25}]}_{\text{augmentation des pertes convectives}} \right\} \end{aligned}$$

Cette formulation montre que l'augmentation du PMV provoquée par l'absorption du flux solaire ϕ , est en partie compensée par une activation des pertes (convection et rayonnement infrarouge), qui résulte elle même d'une élévation de la température des vêtements. Toutefois cette écriture ne permet pas de déterminer directement ΔPMV car la température des vêtements en présence de rayonnement solaire T'_{cl} est inconnue.

Si nous remplaçons T'_{cl} par $T_{cl} + \Delta T_{cl}$ dans les expressions de ΔC et ΔR , nous obtenons :

$$\Delta R = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273 + I_{cl}(\phi - \Delta C - \Delta R))^4 - (T_{cl} + 273)^4]$$

$$\Delta C = 2,38 f_{cl} [(T_{cl} + I_{cl}(\phi - \Delta C - \Delta R) - T_a)^{1,25} - (T_{cl} - T_a)^{1,25}]$$

avec :

$$T_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} [3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4) + 2,38 f_{cl} (T_{cl} - T_a)^{1,25}]$$

On dispose alors d'un système de trois équations non linéaires à trois inconnues (T_{cl} , ΔR et ΔC). La résolution de ce système permettra de déterminer ΔPMV par la relation :

$$\Delta PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)(\phi - \Delta R - \Delta C).$$

2.3. Résultats

Nous avons réalisé le calcul en faisant varier les paramètres M , ϕ , I_{cl} , et T_a comme indiqué dans le *tableau I*.

Nous avons considéré pour ces calculs que $\bar{T}_r = T_a$ et que $W = 0$ (approximation couramment admise). Pour ces différentes combinaisons l'augmentation du PMV due au rayonnement solaire est présentée *figure 11*.

L'augmentation minimale (+0,15) correspond à un flux solaire absorbé de $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, un métabolisme

de $117 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, et une résistance thermique des vêtements de $0,1085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ (soit 0,7 clo). Dans cette configuration, on obtient approximativement la même valeur de ΔPMV quelque soit T_a .

L'augmentation maximale (+4,2) correspond à un flux solaire absorbé de $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, un métabolisme de $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, et une résistance thermique des vêtements nulle (homme nu). Dans cette configuration, on obtient exactement la même valeur de ΔPMV quelque soit T_a . Pour un homme habillé ($0,0155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ou 0,1 clo), l'augmentation maximale (entre +3,6 et +3,7 selon T_a) correspond à un flux solaire absorbé de $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, et un métabolisme de $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Dans le cas de base que nous avons étudié dans la première partie de cet article ($\alpha_{\text{sun vêt}} = 0,5$ et $\alpha_{\text{sun paroi}} = 0,5$), l'individu absorbait au maximum $70 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ sur une face du corps et $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ sur l'autre. Or, le PMV étant un indice de confort global, la valeur à prendre en compte est une valeur moyenne sur l'ensemble du corps. On peut ici l'estimer à la moyenne des flux reçus par chaque face, soit $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Dans ce cas l'augmentation du PMV varie de 0,6 à 2,1 selon les configurations.

2.4. Expression simplifiée de ΔPMV

Etant donnés les résultats obtenus, la variation du PMV peut être approchée (pour la plage de données que nous avons envisagée), par l'expression :

$$\Delta PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028)\phi(1 - 5I_{cl})$$

On a alors moins de 15 % de différence entre la valeur obtenue par cette formule simplifiée, et celle calculée avec le modèle général.

TABLEAU I / TABLE I
Plages de variation des paramètres.
Parameters ranges.

Notations	Désignation	Valeurs	Commentaires
M	Métabolisme	70, 93, et $117 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	Debout au repos. Debout activité légère. Debout activité moyenne.
ϕ	Flux solaire absorbé	10 à $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$	Il s'agit du flux moyen surfacique absorbé par l'individu.
I_{cl}	Résistance thermique globale des vêtements	0 à $0,1085 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 0 à 0,7 clo	De « nu » à « tenue de travail légère ».
T_a	Température d'ambiance	15, 18, 21, 24, 27 et 30°C	

2.5. Pourcentage d'insatisfaits

Etant donnée l'échelle sur laquelle est basée le PMV (de 3 à -3), les variations de PMV que l'on note sur la *figure 11* sont, dans un grand nombre de cas, très importantes. Pour mieux s'en rendre compte, on peut se baser sur l'équation du PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied [16, 19]), donnant le pourcentage de personnes insatisfaites en fonction du PMV :

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2199PMV^2)}$$

On voit alors qu'un PMV nul correspond à une valeur incompressible de 5 % d'insatisfaits, et qu'un PMV , par exemple, de 1,5 entraîne quant à lui environ 50 % d'insatisfaits. Or, une augmentation du PMV de 1,5 due au rayonnement solaire est possible dans de nombreux cas (*figure 11*). Il est même probable que l'inconfort serait dans ce cas supérieur. En effet, le PPD semble avoir tendance à sous estimer le nombre d'insatisfaits dans des conditions chaudes [18]. De plus, le nombre d'insatisfaits, toujours dans des ambiances chaudes, semble être plus important dans des conditions « réelles » de bureau que lors d'expériences en laboratoire [20].

3. CONCLUSIONS

Nous avons donc montré que, dans le cas choisi comme exemple, l'individu reçoit des flux solaires suffisants pour perturber fortement son bilan thermique global, et ceci même s'il n'est pas touché par le rayonnement direct. Tout d'abord, les pertes par convection et par rayonnement infrarouge sont augmentées, sans adaptation physiologique, mais simplement par augmentation de la température des vêtements. Pourtant cela ne suffit pas à évacuer l'ensemble du flux solaire absorbé par les vêtements, ce qui se traduit par une augmentation non négligeable de sa charge thermique théorique S . On s'en convainc totalement en ramenant cette augmentation à l'échelle d'un indice connu (PMV ou PPD). Ceci se traduit alors par une adaptation physiologique (sudation, vasodilatation...) accompagnant l'inconfort.

Ces résultats ont été obtenus en considérant la réflexion du rayonnement solaire par les parois comme purement diffuse. En présence de revêtements de parois réfléchissant le rayonnement solaire de manière partiellement diffuse, on observerait, pour certaines positions de l'individu, des inconforts encore plus importants.

Par ailleurs, le rayonnement solaire, de par ses hétérogénéités, et les asymétries de rayonnement qu'il peut

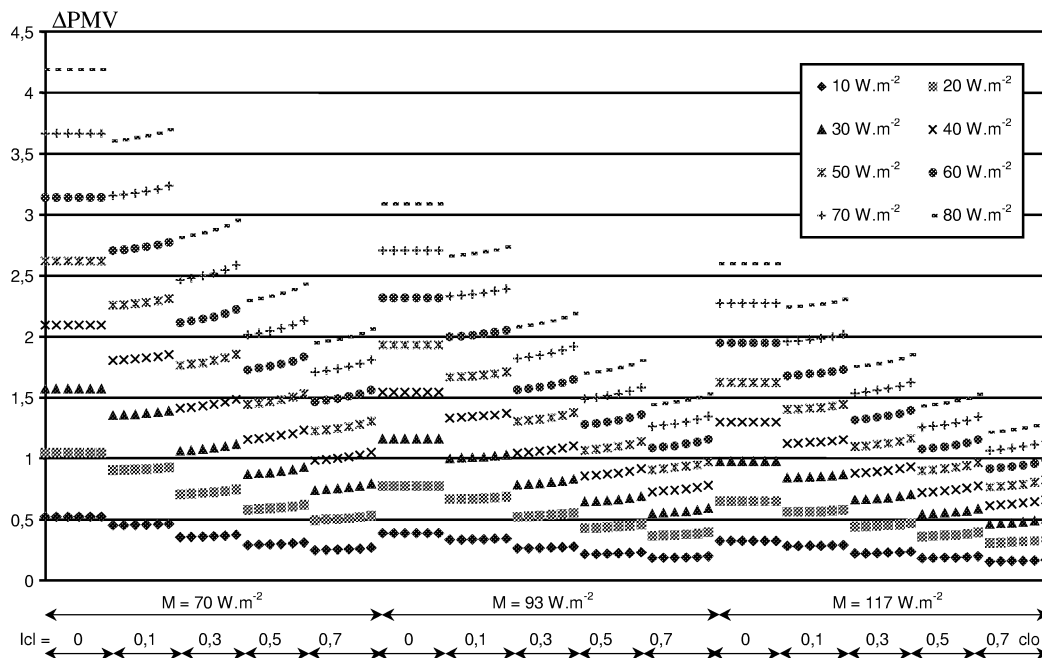


Figure 11. Augmentation du PMV pour différentes combinaisons de paramètres.

Figure 11. Increase in PMV for different data.

provoquer, peut être une source d'inconfort local. Or le *PMV*, indice de confort global, ne nous donne aucune information sur ce sujet. Nous avons vu que ces asymétries peuvent être importantes comparées à celle provoquées par des parois chaudes ou froides. De plus, dans notre cas, l'inconfort peut être accentué par les surchauffes de surface causées par la tache solaire et qui modifient l'environnement radiatif au niveau de son intensité et des asymétries provoquées. Les outils numériques que nous avons développés peuvent permettre de prendre en compte ces deux aspects [7]. Aussi serait-il intéressant, dans l'avenir, de coupler ces outils à un programme de modélisation du comportement thermique du corps humain.

RÉFÉRENCES

- [1] Stolwijk J.A.J., Mathematical Model of Thermoregulation, Physical and Behavioral Temperature Regulation, Thomas, 1970, chapter 48.
- [2] Monchoux F., Thellier F., Cordier A., Serin G., Galéou M., Des logiciels pour l'analyse et la gestion du confort thermique, Rev. Gén. Therm. 371 (31) (1992) 616-620.
- [3] Yilmaz Z., Evaluation of built environment from the thermal view point, ASHRAE Trans. 93 (1) (1987) 549-563.
- [4] Trombe A., Serres L., Begue M., Enclosure internal solar radiation distribution: Experimentation and simulation, in: Proceedings of Solar World Congress (CD-ROM), ISES, Taejon, Korea, 1997.
- [5] Belmasjor N., Influence du rayonnement solaire sur l'environnement thermique de l'occupant dans un bâtiment, Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [6] Breckenbridge J.R., Goldman R.F., Human solar heat load, ASHRAE Trans. 78 (1972) 110-119.
- [7] Serres L., Étude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique, Thèse, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 1997.
- [8] Mavroulakis A., Trombe A., A new semi analytical algorithm for calculating diffuse plane view factors, J. Heat Tran. 120 (1) (1998) 279-282.
- [9] Gebhart B., Energy exchange by thermal radiation, Heat Transfer, McGraw Hill, 1961, chapter 5.
- [10] Siegel R., Howell J.R., Thermal radiation heat transfer, 3rd edition, Hemisphere, 1992.
- [11] Gouet L., Fohr J.P., Sadat H., Echanges radiatifs de l'homme dans une enceinte, in: Penot F., Saulnier J.B. (Eds.), Actes de La thermique de l'Homme et de son proche environnement (Congrès SFT), Elsevier, Poitiers, France, 1995, pp. 573-578.
- [12] Fanger P.O., Ipsen B.M., Langkilde G., Olesen B.W., Christensen N.K., Tanabe S., Comfort limits for asymmetric thermal radiation, Energy and Building 8 (1985) 225-236.
- [13] Berglund L.G., Fobelets A.P.R., Subjective human response to low-level air currents and asymmetric radiation, ASHRAE Trans. 93 (1) (1987) 497-523.
- [14] McNall P.E., Biddison R.E., Thermal and comfort sensations of sedentary persons exposed to asymmetric radiant field, ASHRAE Trans. 76 (1) (1970) 123-134.
- [15] Fanger P.O., Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering, McGraw Hill, New York, 1972.
- [16] Dessagne J.M., Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique, le profil de confort UCRES, in: Actes de Clima 2000, Clima 2000 World Organisation Congress, Copenhagen, Danemark, Vol. 4, 1985, pp. 53-58.
- [17] Bothorel B., Herrmann C., Indice de confort optimal, in: Penot F., Saulnier J.B. (Eds.), Actes de La thermique de l'Homme et de son proche environnement (Congrès SFT), Elsevier, Poitiers, France, 1995, pp. 549-554.
- [18] Gagge A., Fobelets A.P., Berglund L.G., A standard predictive index of human response to the thermal environment, ASHRAE Trans. 92 (2B) (1986) 709-731.
- [19] ISO 7730: Moderate thermal environment. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort, International Standards Organization, Geneva, 1992.
- [20] Brager S.G., Using laboratory-based models to predict comfort in office buildings, ASHRAE J. 34 (4) (1992) 44-49.

Abridged English version

Solar fluxes absorbed by the dweller of glazed premises. Influence upon the thermal comfort equation

The authors here study the influence of solar radiation on thermal comfort of the premises using the numerical tools they developed [4].

First they geometrically project the angles of the windows on the room's surfaces in order to know the position of sun spot(s). Then they use global exchange factors [9, 10] to distribute the diffuse radiation entering

through the windows and the radiation reflected by the sun spot(s) (see studied premises in *figure 1*). These calculations are made at each time step. Given that their models are capable of taking obstacles into account, these calculations can be made with an occupant in the room (see approached occupant geometry in *figure 2*). So, considering the meteorological conditions in Toulouse

(South of France) on June 24, 1994, they achieve, for each side of the occupant, the solar fluxes absorbed by him.

The distance between the occupant and the window is 0.8 m. Even in this case, where beam radiation never strikes the occupant, fluxes absorbed by him are important enough not to be neglected in the occupant thermal balance. *Figures 4–8* show the important influence of solar absorbance of walls and clothing on the fluxes absorbed by the occupant. The radiant asymmetry, *figures 9 and 10*, is also important if we compare it with the infrared radiant asymmetry recorded by other authors [2, 11].

But even knowing these fluxes, it is not easy to conclude about thermal sensations. The *PMV* formulation being based on human thermal balance, it can help us to know the importance of these fluxes compared to metabolism, heat losses by radiation, convection, etc. So we adapted the *PMV* formulation [19] to take the solar radiation into account. We achieved a formulation for *PMV* difference between the cases with solar flux and without:

$$\begin{aligned} \Delta PMV &= (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \\ &\cdot \left\{ \phi - \underbrace{3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T'_{cl} + 273)^4 - (T_{cl} + 273)^4]}_{\text{increase in radiative losses}} \right. \\ &\quad \left. - \underbrace{2.38 f_{cl} [(T'_{cl} - T_a)^{1.25} - (T_{cl} - T_a)^{1.25}]}_{\text{increase in convective losses}} \right\} \end{aligned}$$

ϕ is global flux absorbed by the occupant ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). T_{cl} is clothing temperature without solar flux. T'_{cl} is clothing temperature with solar flux.

This formulation shows that the increase in *PMV* due to solar flux is partially compensated by the increase in thermal losses. But we cannot find ΔPMV because we do not know T'_{cl} . To achieve ΔPMV we have to solve three equations with three unknowns (T_{cl} , ΔR , ΔC):

$$\Delta R = 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273 + I_{cl}(\phi - \Delta C - \Delta R))^4 - (T_{cl} + 273)^4]$$

$$\Delta C = 2.38 f_{cl} [(T_{cl} + I_{cl}(\phi - \Delta C - \Delta R) - T_a)^{1.25} - (T_{cl} - T_a)^{1.25}]$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W)$$

$$\begin{aligned} &- I_{cl} [3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} ((T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4) \\ &\quad + 2.38 f_{cl} (T_{cl} - T_a)^{1.25}] \end{aligned}$$

ΔR is the difference between thermal losses by radiation with and without solar radiation. ΔC is the difference between thermal losses by convection with and without solar radiation.

Knowing T_{cl} , ΔR , and ΔC we can calculate ΔPMV :

$$\Delta PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)(\phi - \Delta R - \Delta C)$$

We have computed this system for different data (see *table I*). Results are given on *figure 11*. In many cases, the increase in *PMV* is important (between +0.15 and +4.2). It shows that even if beam radiation does not strike the occupant, absorbed solar flux can be important enough to modify substantially the human heat thermal balance. Other investigations have to be made to study the effect of radiant asymmetry on thermal comfort.