

## **CALCUL D'UN INDICE THERMIQUE DU CORPS HUMAIN**

Subvention ANR  
N° ANR-08-VULN-013-0x/VURCA

<b>Objectif du document</b>	Définir la méthode de calcul de l'indice thermique du corps humain pour le projet
<b>Type de document</b>	Méthodologie
<b>Référence au projet</b>	Tâche 1c
<b>Auteur</b>	Grégoire Pigeon
<b>Date</b>	23 juillet 2009
<b>Version</b>	0

## Sommaire

<b>OBJECTIFS.....</b>	<b>2</b>
<b>ETAT DES CONNAISSANCES.....</b>	<b>2</b>
Les indices empiriques.....	3
Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain à l'équilibre.....	3
Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain en régime instationnaire.....	6
<b>MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE DANS LE CADRE DU PROJET VURCA.....</b>	<b>7</b>
Le bilan d'énergie de l'individu.....	7
Le métabolisme M.....	8
Les échanges par convection C.....	9
Les échanges par rayonnement R.....	10
<b>LES ÉCHANGES PAR ÉVAPORATION DE LA SUDATION ESW.....</b>	<b>11</b>
Les échanges par la perspiration insensible ED.....	12
Les échanges par la respiration ERES et CRES.....	12
Détermination des températures de corps, de peau et des vêtements.....	13
Calcul de l'indice P.E.T. et critères d'évaluation.....	13
<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>14</b>

### **OBJECTIFS**

Un des objectifs du projet VURCA est d'évaluer les impacts d'épisodes caniculaires sur les populations urbaines. Pour cela, nous proposons d'établir un diagnostic plus fin sur le ressenti des conditions climatiques par le corps humain que la seule température de l'air à la fois dans les bâtiments mais aussi dans les rues. Il s'agira d'établir un bilan thermique du corps humain prenant en compte notamment les effets du vent, de l'humidité ou du rayonnement solaire et infrarouge.

### **ETAT DES CONNAISSANCES**

La température de l'air n'est pas le seul paramètre affectant le confort thermique des individus et de nombreux travaux scientifiques ont porté sur l'influence d'autres paramètres de l'environnement sur le confort thermique (Monteiro, 2005). Les premières études relatives au milieu extérieur ont adopté une démarche empirique pour analyser l'influence des paramètres pris un à un : le vent, le rayonnement solaire ou l'humidité. Dans un deuxième temps, la prise en compte de l'environnement (par exemple la proximité de sources chaudes ou froides) dans les conditions de travail et le développement des systèmes de climatisation ont contribué à établir les bases du bilan thermique du corps humain. Sur ce point, les travaux de Fanger (1970), autour du développement de l'indice PMV (Predicted Mean Vote) ou de Yaglou et Minard (1957) sur l'indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) ont été largement diffusés et font l'objet de normes (par exemple les normes ISO 7243, ISO 7933 pour les ambiances chaudes) utilisées pour appliquer la réglementation (articles L-230-2 et R-230-1 du code du travail). Enfin, des études ont porté sur le confort thermique dans des environnements urbains (Burt et al., 1982a, 1982b) et s'intéressent à la capacité des zones urbaines à générer des environnements thermiquement confortables ou non.

Depuis 2000, la Société Internationale de Biométéorologie (ISB, [www.biometeorology.org](http://www.biometeorology.org)) a mis en place une commission chargée de la définition d'un indice thermique et climatique universel (UTCI, Universal Thermal Climate Index, [www.utci.org](http://www.utci.org)). Cette commission est maintenant complétée par

l'action COST 730 (Cooperation in Science and Technical Development). L'objectif combiné de ces deux actions est de proposer une harmonisation des procédures d'évaluation du confort thermique qui sont estimées à plus d'une centaine.

Les différentes approches et indices de confort thermique relevés dans la littérature peuvent être divisés en trois catégories qui sont présentées plus en détail par la suite:

- les indices empiriques,
- les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain à l'équilibre,
- les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain en régime instationnaire.

### Les indices empiriques

Cette famille d'indice a le plus souvent été développée pour répondre à un besoin et un environnement très spécifique. Par exemple, l'indice Wind Chill Temperature (WCT, Siple et Passel, 1945) est utilisé pour décrire l'influence du vent sur le confort thermique à l'extérieur en conditions froides. Il est encore régulièrement utilisé en Amérique du Nord dans les bulletins d'informations météorologiques. Le calcul de cet indice est basé sur une équation très simple établie par une régression linéaire multiple sur le jeu de données acquis par les chercheurs :

$$WCT = (12,15 + 11,6 \frac{v_{10}}{2} - v_{10})(33 - T_a)$$

où  $v_{10}$  est la vitesse du vent à 10 m en  $\text{ms}^{-1}$ ,  $T_a$  est la température de l'air en  $^{\circ}\text{C}$ . Cette équation est applicable pour des températures comprises entre  $-9^{\circ}\text{C}$  et  $10^{\circ}\text{C}$  et un vent inférieur à  $22,3 \text{ ms}^{-1}$ . De manière similaire l'indice Humidex (Masterton et Richardson, 1979) a été développé pour évaluer la gêne en conditions de fortes température et humidité. D'autres indices comme WGBT visent plus spécifiquement les conditions de travail (Tableau 1).

Indices	Références bibliographiques	Description
Wind Chill Temperature (WCT)	Siple et Passel (1945) ; Williamson (2003)	Influence du vent en conditions froides
Heat Stress Index (HSI)	Belding et Hatch (1955) ; Givoni (1969)	Influence du rayonnement et du vent en conditions chaudes
Wet Bulb Globe Temperature (WGBT)	Yaglou et Minard (1957)	Influence de l'humidité et éventuellement du rayonnement principalement pour un environnement de travail
Equatorial Comfort Index (EC)	Webb (1960) ; Santamouris et Asimakopoulou (1996)	Influence du vent et de l'humidité en conditions chaudes et humides
Humidex	Masterton et Richardson (1979)	Influence de la température de l'air et de l'humidité en conditions chaudes et humides

L'avantage de ces indices est la facilité de leur manipulation, leur rapidité de calcul et le faible nombre de paramètres dont ils ont besoin. En revanche, ces indices ne sont applicables que dans la gamme de valeurs dans laquelle ils ont été établis et uniquement pour un environnement souvent restrictif.

*Tableau 1: Une sélection d'indices empiriques de confort thermique.*

### Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain à l'équilibre

Une autre famille d'indice (Tableau 2) est basée sur une approche plus théorique décrivant les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement extérieur. Dans ce cadre, la température

du corps humain est la résultante du bilan d'énergie, B (ISO 7933, 1989), entre le métabolisme (M) général de l'organisme toujours positif, les échanges de chaleur liées à la respiration (réchauffement  $C_{RES}$  et humidification  $E_{RES}$  de l'air) les échanges de chaleur par convection (C, positifs ou négatifs selon les conditions), les échanges de chaleur par rayonnement (R) provenant du soleil ou des échanges infrarouges avec les surfaces environnantes (positifs ou négatifs selon les températures des surfaces) et l'évaporation (E) associée à la sudation. Ainsi on peut écrire le bilan sous la forme de l'équation suivante :

$$B = M + C_{RES} + E_{RES} + C + R + E.$$

Le bilan thermique peut être appliqué à l'ensemble du corps humain (Givoni, 1969 ou Fanger, 1970). Dans ce cas, en faisant l'hypothèse que le bilan d'énergie B est nul ou que la température du corps utilisée pour les calculs des termes C, R et E est fixe, on peut établir soit une température moyenne du corps, soit une charge thermique pour l'ensemble du corps humain. Par exemple Fanger (1970) a établi une correspondance entre le bilan thermique B d'une personne et son ressenti thermique (Tableau 3). D'autres modèles représentent les échanges entre différentes parties du corps et l'environnement extérieur. Ce sont les modèles à plusieurs noeuds, et les plus courants, à deux noeuds, considèrent l'intérieur du corps, la peau, les vêtements et l'extérieur (Gagge, 1967 ou Höppe 1993). A partir de ces modèles, il est possible de prévoir par exemple la sudation, ou l'habillement optimal. Enfin, en calculant, pour un environnement de référence, la température de l'air qui conduit aux mêmes valeurs pour les variables du corps humain (par exemple la température de la peau et interne) que l'environnement réel, il est possible d'obtenir un indice dont l'interprétation est plus aisée. C'est le cas par exemple de l'indice PET (Physiological Equivalent Temperature) développé par Höppe (1999).

Modèle	Indices dérivés	Références bibliographiques	Description
<b>Gagge</b>	New Standard Effective Temperature (SET*)	Gagge et al. (1967), Gagge et al. (1986)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds.</li> <li>● Température de l'air d'un environnement de référence pour lequel un individu aurait la même température et humidité de peau.</li> </ul>
<b>Givoni</b>	Index of Thermal Stress (ITS)	Givoni (1969)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle à un seul noeud</li> <li>● Prise en compte des vêtements pour tous les processus.</li> </ul>
<b>Fanger</b>	Predictive Mean Vote (PMV)	Fanger (1970)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle à un seul noeud</li> <li>● Initialement pour l'intérieur, donc ne prend pas en compte le rayonnement solaire ou le vent.</li> <li>● Prise en compte des vêtements pour tous les processus.</li> <li>● Calibration des coefficients avec des essais en chambres climatisées.</li> </ul>
<b>Klima Michel Model (KMM)</b>	Perceived Temperature (PT) et New Perceived Temperature (PT*), PMV	Jendritzky et Nübler (1981)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Adaptation du modèle de Fanger pour un environnement extérieur</li> <li>● Application à partir de données météorologique de base (par exemple, nébulosité et turbidité pour le rayonnement)</li> </ul>
<b>Munich Energy-Balance Model for Individuals (MEMI)</b>	Physiological Equivalent Temperature (PET), PMV	Höppe (1993) , Höppe (1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds.</li> <li>● Calcul séparé pour les températures des parties habillées ou non du corps</li> <li>● Calcul de la sudation</li> <li>● Température de l'air d'un environnement de référence pour lequel un individu aurait la même température de peau et interne.</li> </ul>

*Tableau 2: Sélection de modèles du bilan énergétique du corps humain et des indices de confort associés qu'ils permettent de calculer.*

Ces indices fournissent une valeur instantanée du ressenti thermique d'un individu en fonction des conditions environnantes, il peut ensuite être intégré dans la durée pour déterminer la durée potentielle de confort d'un espace urbain par exemple (Echave, 2007).

En comparaison avec les indices empiriques, cette approche permet une gamme d'application et de conditions d'environnement plus large. Le bilan thermique peut être réalisé en intérieur ou extérieur pourvu qu'on évalue les différents termes qui y contribuent. Même si ces modèles sont plus complexes que les premiers indices, leur résolution numérique à l'équilibre reste très rapide.

Bilan thermique $B(W\ m^{-2})$	Predictar y Mean Vote	Ressenti thermique
> 150	> 3,5	Trop chaud
50 à 150	1,5 à 3,5	Préférait plus frais
-50 à 50	-1,5 à 1,5	Confortable
-150 à - 50	-3,5 à -1,5	Préférait plus chaud
< - 150	< -3,5	Trop froid

Tableau 3: Correspondance entre le bilan thermique  $B$  d'un individu, le PMV et son ressenti thermique.

### Les indices basés sur le bilan d'énergie du corps humain en régime instationnaire

Les travaux les plus aboutis reprennent le cadre théorique du bilan d'énergie pour plusieurs parties du corps humain et considèrent en plus l'évolution temporelle des variables du modèle (température interne, température de la peau, sudation etc...) en fonction du parcours de l'individu. En effet, la régulation de la température du corps humain n'est pas instantanée et des durées de mise à l'équilibre de l'ordre de l'heure sont fréquentes lors d'une transition entre un espace chauffé et des conditions extérieures froides. Il est même fréquent que le temps de séjour dans ces environnements inconfortables soit inférieur à la durée de mise à l'équilibre (Höppe, 2002). Dans ces conditions, la validité de l'utilisation des modèles précédents peut être questionnée et il est constatée que les indices basés sur un bilan thermique à l'équilibre conduisent à surestimation des conditions d'inconfort pour une personne ou de la surface d'espace inconfortable lorsqu'on l'intègre ces indices dans l'espace et le temps (Bruse, 2009).

Modèle	Références bibliographiques	Description
Instationary Munich Energy-Balance Model (IMEM)	Höppe (2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds.</li> <li>● Calcul des variables d'état (Température interne et peau) en fonction d'un trajet dans des conditions environnementales changeantes.</li> </ul>
Fiala	Fiala et al. (1999), Fiala et al. (2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle de régulation thermique multi-noeuds du corps humain (tête, visage, cou, abdomen, mains, pieds etc...).</li> <li>● Calcul des variables d'état en fonction d'un trajet dans des conditions environnementales changeantes.</li> </ul>
Individual Thermal Comfort Model (ITCM)	Bruse (2005a, 2005b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Modèle de régulation thermique du corps humain à 2 noeuds basé sur Gagge et al. (1971), Parsons et al. (1999) et Havenith (2001).</li> <li>● Simulation d'un échantillon représentatif de personnes se déplaçant dans l'environnement pour lesquels le bilan thermique est calculé (simulation multi-agents avec BOTworld, <a href="http://www.botworld.info">www.botworld.info</a>).</li> </ul>

Tableau 4: Sélection de modèle instationnaire du bilan d'énergie du corps humain.

Enfin, l'utilisation combinée d'un modèle de bilan énergétique instationnaire du corps humain et d'un système multi-agents représentant un échantillon représentatif d'individus permet de représenter avec plus de réalisme l'occupation d'un espace urbain en fonction des préférences thermiques (Bruse, 2009). Évidemment, ce type de modèle est plus complexe à mettre en œuvre parce qu'il nécessite de prévoir un parcours type des individus dans l'environnement ou de mettre en place un système de simulation multi-agent.

## MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE DANS LE CADRE DU PROJET VURCA

Pour le projet VURCA, on propose d'établir le bilan d'énergie de l'individu à l'équilibre en suivant la démarche de Höppe (1993) adoptée dans le modèle MEMI et reprise dans le logiciel RayMan (Matzarakis, 2007) et qui permet de calculer notamment l'indice PET (physiological equivalent temperature) mais aussi d'autres indices comme PMV (Predictary Mean Vote) ou SET (Standard Effective Temperature). A l'extérieur, le modèle sera appliqué pour une personne située côté ombre et côté soleil plutôt qu'au milieu d'une rue canyon (Burt et al., 1982 ; Pearlmutter et al., 1999). Le bilan le plus favorable sera choisi. Dans le bâtiment, le bilan sera établi pour une personne au rez de chaussée et pour une personne au dernier étage et selon plusieurs catégorie d'activité.

### Le bilan d'énergie de l'individu

Le bilan d'énergie à l'équilibre appliqué au système thermodynamique « individu vêtu » s'écrit de la manière suivante en considérant les termes d'échanges d'énergie décrits dans le Tableau 5 :

$$M+C+R+E_{RES}+C_{RES}+E_D+E_{SW} = 0$$

	Symbole	Unité	Description
	Variables d'état		
$T_{co}$	°C		Température du corps
$T_{sk}$	°C		Température de la peau
$T_{cl}$	°C		Température des vêtements
Paramètres de l'environnement			
$T_a$	°C		Température de l'air
$e_a$	Pa		Pression de vapeur d'eau de l'air
$u$	$m.s^{-1}$		Vitesse du vent
Échanges de chaleur			
$M$	$W.m^{-2}$		Production de chaleur par le métabolisme
$C$	$W.m^{-2}$		Échange par convection
$R$	$W.m^{-2}$		Échange par rayonnement
$E_{RES}$	$W.m^{-2}$		Humidification de l'air respiré
$C_{RES}$	$W.m^{-2}$		Réchauffement de l'air respiré
$E_D$	$W.m^{-2}$		Perspiration insensible (diffusion de vapeur d'eau à travers la peau)
$E_{sw}$	$W.m^{-2}$		Evaporation de la sueur sur la peau
$F_{cs}$	$W.m^{-2}$		Flux depuis le corps vers la peau
$F_{sc}$	$W.m^{-2}$		Flux depuis la peau vers le corps

Figure 1: Les échanges de chaleur et de vapeur d'eau entre les différentes parties de l'individu.

Tableau 5: Les différentes variables et paramètres utilisés dans le bilan d'énergie de l'individu.

### Le métabolisme M

M dépend de l'activité du corps. Dans le cadre du projet, on considérera les activités décrites dans le tableau 1. A l'extérieur, on considérera une personne se déplaçant en marchant à  $4 kmh^{-1}$  (Jendritzky, UTCI, communication personnelle), alors qu'à l'intérieur, on pourra distinguer 3 types d'activités des personnes (Tableau 6).



Espace	Activité	Taux métaboliques (W m <sup>-2</sup> )		
		Oke (1987) ; Fanger (1970)	Echave (2007)	ISO 8996 (1990)
Extérieur	Marche (5 km h <sup>-1</sup> )	190	180 -250	200
	Marche (4 km h <sup>-1</sup> )			165
Intérieur	Repos allongé	40	45	45
	Sommeil allongé			40
	Repos assis	60		55
	Repos debout	70	60-90	70
	Travail de bureau	50-70		65-100
	Travail domestique	90-200		115
	Travail léger		95	95

Tableau 6: Sélection de taux métaboliques de production de chaleur pour un adulte et différentes activités.

### Les échanges par convection C

Quelque soit l'habillement de l'individu, on considère qu'il est distribué sur l'ensemble du corps (Parsons et al., 1999). Ainsi, on considérera que la convection a uniquement lieu entre les vêtements et l'air extérieur et en utilisant les notations du Tableau 5, on écrira les échanges par convection selon l'équation suivante (ISO 7933):

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

où  $f_{cl}$  est le ratio entre la surface du sujet vêtu et sa surface dévêtu et  $f_{cl} = 1 + 0,305 I_{cl}$  avec  $I_{cl}$  la capacité d'isolation des vêtements exprimée en Clo. Le Clo est l'unité d'isolation thermique des vêtements et équivaut à 0,155 m<sup>2</sup>.°C.W<sup>-1</sup>. Un Clo correspond à l'isolation apportée par un habillement de confort normal pour l'intérieur, par exemple, un costume a une isolation d'environ 1,0 Clo. Le facteur  $h_{cdyn}$  est le coefficient de transfert thermique en W.m<sup>-2</sup>.C<sup>-1</sup> entre le vêtement et l'air. Selon la norme ISO 7933, le  $h_{cdyn}$  se calcule comme la plus grande valeur entre :

- $2,38 |T_{cl} - T_a|^{0,25}$
- $3,5 + 5,2 U_{ar}$

où  $U_{ar}$  est la vitesse relative entre le sujet et l'air et se calcule comme  $U_{ar} = \sqrt{U_a^2 + U_w^2}$  avec  $U_a$  la vitesse du vent en m.s<sup>-1</sup> et  $U_w = \max[0,7 ; 0,0052(M - 0,58)]$  est la vitesse de déplacement du sujet calculée en fonction du métabolisme exprimée en W.m<sup>-2</sup>. L'échange par convection dépend donc du type d'habillement, de l'activité du sujet et de deux grandeurs du micro-climat dans la rue : la vitesse du vent et la température de l'air.

Habillement	I <sub>cl</sub> (clo)
Sous-vêtements, chemise manches courtes, pantalon léger, chaussettes, chaussures	0,5
Sous-vêtements, chemise manches longues, pantalon léger, chaussettes, chaussures	0,6
Sous-vêtements, chemise manches longues, pantalon, veste, chaussettes, chaussures	1,0
Sous-vêtements, chemise manches longues, pantalon, veste, blouson, chaussettes, chaussures	1,1

Tableau 7: Sélection d'ensembles vestimentaires types et de leur isolation en clo (1 clo = 0.155 m<sup>2</sup>.°C.W<sup>-1</sup>).

### Les échanges par rayonnement R

Les échanges par rayonnement se décomposent entre les échanges dans la gamme de longueurs d'ondes solaires et la gamme de longueurs d'ondes infrarouges. De même que pour la convection, ils ont lieu à la surface des vêtements. Il faut intervenir la géométrie de la rue, du bâtiment, de la personne et du soleil. Dans la gamme solaire, le bilan R<sub>s</sub> se calcule de la manière suivante :

$$R_s = (K_D + K_R + K_S)(1 - \alpha)$$

où  $\alpha$  est l'albédo moyenne d'un individu. Kenny et al. (2008) proposent une gamme et testent une gamme d'albédo de 0,57, 0,37 et 0,21 pour des vêtements respectivement clairs, intermédiaires et sombres. Le terme K<sub>D</sub> est la contribution en rayonnement direct, K<sub>R</sub> est la contribution en rayonnement réfléchi par les murs et la route, et K<sub>S</sub> la contribution diffuse. Pour calculer ces termes, on va considérer un être humain situé au milieu du canyon, d'une taille h<sub>b</sub> de 1,75 m et d'une surface A<sub>b</sub> de 1,86 m<sup>2</sup> (Burt et al., 1982) selon la Figure 1. Pour K<sub>D</sub>, plusieurs situations peuvent se présenter selon l'angle solaire :

- cas 1 : le piéton ne reçoit pas d'éclairement direct (Figure 1.a)

On retrouve cette situation lorsque l'angle solaire  $\lambda$  est inférieur à la valeur  $\arctan\left(\frac{H-h_b}{W/2}\right)$ .

Dans ce cas K<sub>D</sub> est nul.

- Cas 2 : le piéton est complètement éclairé (Figure 1.b)

On retrouve cette situation lorsque  $\lambda$  est supérieur à  $\arctan\left(\frac{H}{W/2}\right)$ . Dans ce cas K<sub>D</sub> vaut  $K_{\downarrow} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right)$  où K<sub>↓</sub> est le rayonnement solaire direct incident au sommet du canyon.

- Cas 3 : le piéton est partiellement éclairé (Figure 1.c)

Lorsque  $\lambda$  est compris entre  $\arctan\left(\frac{H-h_b}{W/2}\right)$  et  $\arctan\left(\frac{H}{W/2}\right)$ , dans ce cas  $K_D = K_{\downarrow} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \lambda\right) \left(\frac{H - W/2 \tan(\lambda)}{h_b}\right)$ .

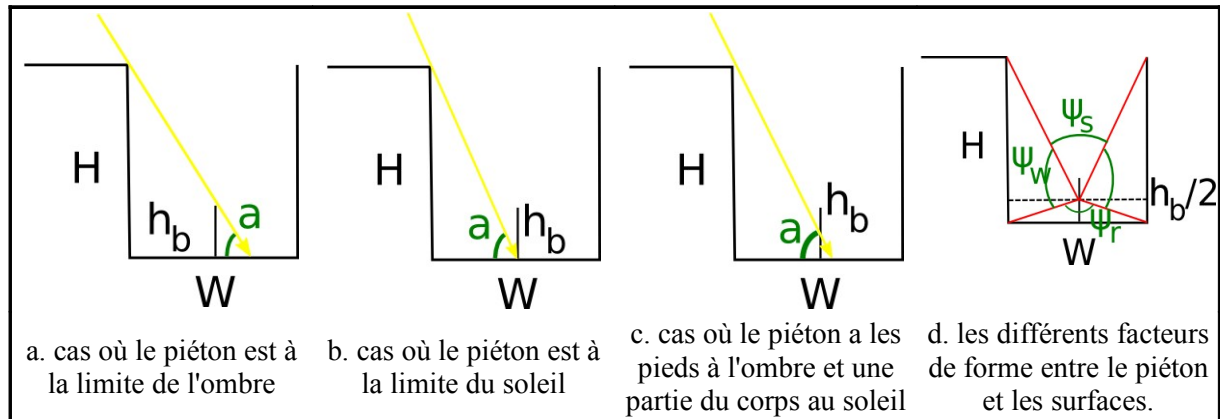


Figure 2: Représentation schématique des différents cas d'éclairage direct du piéton et des facteurs de forme.

Les contributions réfléchies de la route et des murs sont fonction du rayonnement qui arrive sur ces parois et de l'albédo des parois. Le rayonnement qui arrive sur les parois est calculé par le modèle TEB. L'impact de ces contributions sur le bilan d'un piéton sera comptabilisé comme du rayonnement diffus, c'est à dire en considérant que le rayonnement réfléchi par une surface est isotrope. Ainsi pour les calculs, on se basera sur les facteurs de forme du piéton et du ciel  $\psi_s$ , du piéton et de la route  $\psi_r$  et du piéton et des murs  $\psi_w$ . Les facteurs de formes seront calculés comme dans le modèle TEB en utilisant les formules de Noilhan (1981) pour une rue canyon mais en considérant une hauteur au centre du piéton soit  $H - \frac{h_b}{2}$  pour le calcul de  $\psi_s$  et une rue canyon d'une hauteur de  $\frac{h_b}{2}$  pour le calcul de  $\psi_r$ . Ainsi, on a les formules suivantes :

$$\psi_s = \sqrt{\left(\frac{H - \frac{h_b}{2}}{W}\right)^2 + 1} - \frac{H - \frac{h_b}{2}}{W}$$

$$\psi_r = \frac{1}{2} \frac{\frac{h_b}{2W} + 1 - \sqrt{\left(\frac{h_b}{2W}\right)^2 + 1}}{\frac{h_b}{2W}}$$

Enfin, le facteur de forme du mur se calcule par différence avec le facteur de forme global du piéton qui voit l'ensemble de la sphère qui l'entoure :

$$\psi_w = 2 - \psi_s - \psi_r.$$

Le bilan dans l'infrarouge  $R_i$  s'établit en faisant le bilan des contributions reçues par le ciel ( $L_s$ ), les murs ( $L_w$ ) et la route ( $L_r$ ) et des contributions émises selon la formule suivante :

$$R_i = \psi_s L_s + \psi_r L_r + \psi_w L_w - (\epsilon_{cl} \sigma T_{cl}^4 + (1 - \epsilon_{cl}) (\psi_s L_s + \psi_r L_r + \psi_w L_w))$$

où  $\epsilon_{cl}$  est l'émissivité des vêtements que l'on considérera à 0,97 (Matzarakis et al., 2007). Les différentes contribution  $L_s$ ,  $L_r$  et  $L_w$  sont déjà disponibles dans TEB.

### LES ÉCHANGES PAR ÉVAPORATION DE LA SUDATION $E_{sw}$

Les échanges par évaporation de la sudation ont lieu à la surface de la peau à travers les vêtements. Ils dépendent de la sudation  $SW$  et des propriétés d'échanges de vapeur d'eau vers l'extérieur à travers les vêtements. Höppe (1993) propose d'estimer la sudation en fonction des températures de la peau et du corps :

$$SW = 8,47 \times 10^{-5} \times [(0,1 T_{sk} + 0,9 T_c) - 36,6]$$

L'évaporation maximale à la surface de la peau peut s'exprimer de la manière suivante :

$$E_{\max} = \frac{e_s(T_{sk}) - e_a}{R_{tdyn}}$$

où  $e_s(T_{sk})$  est la pression de vapeur saturante à la température de la peau,  $e_a$  la pression partielle de vapeur d'eau et  $R_{tdyn}$  la résistance au transfert de vapeur d'eau à travers les vêtements. Cette résistance tient compte du vent et du mouvement du sujet qui tendent à réduire les propriétés isolantes et imperméables des vêtements. Ce paramètre s'exprime de la manière suivante (ISO 7933) :

$$R_{tdyn} = \frac{l_{tot\ dyn}}{i_{mdyn}} \cdot 16,7$$

où 16,7 est le nombre de Lewis (en °C.kPa<sup>-1</sup>),  $l_{tot\ dyn}$  est l'isolation « dynamique » du vêtement (prenant en compte le vent et les mouvements),  $i_{mdyn}$  est la perméabilité dynamique du vêtement à la vapeur d'eau. Ces deux derniers termes s'expriment en fonction de l'isolation ( $l_{tot\ st}$ , voir Tableau 7) et de la perméabilité ( $i_{mdyn} = 0,38$  selon ISO 7933) statique du vêtement et de facteur correctif selon les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} l_{tot\ dyn} &= C_{orr, tot} \times l_{tot\ st} \\ i_{mdyn} &= i_{mst} \times C_{orr, E} \end{aligned}$$

où les termes correctifs s'expriment comme suit en fonction du vent relatif  $U_{ar}$  et du vent lié aux mouvements du sujet  $U_w$  (voir section 3.3) :

- $C_{orr, tot} = C_{orr, cl} e^{(0,043 - 0,398 U_{ar} + 0,066 U_{ar}^2 - 0,378 U_w + 0,094 U_w^2)}$  lorsque l'habillement a une isolation supérieure à 0,6 clo,
- $C_{orr, tot} = C_{orr, la} e^{(-0,472 U_{ar} + 0,047 U_{ar}^2 - 0,342 U_w + 0,11 U_w^2)}$  lorsque il n'y a pas d'habillement,
- $C_{orr, tot} = (0,6 - l_{cl\ st}) C_{orr, la} + l_{cl\ st} \times C_{orr, cl}$  lorsque l'habillement est entre 0 et 0,6 clo,
- $C_{orr, E} = 2,6 C_{orr, tot}^2 - 6,5 C_{orr, tot} + 4,9$ .

Ainsi, on en déduit que si  $E_{\max} > SW$  alors toute la sudation peut être évacuée et  $E_{sw} = SW \times L_v$  avec  $L_v$  la chaleur de vaporisation. Dans le cas inverse  $E_{sw} = E_{\max} \times L_v$ .

### Les échanges par la perspiration insensible $E_D$

Ces échanges sont ceux liés à la diffusion de vapeur d'eau à travers la peau. Ils sont différents de la transpiration et la chaleur nécessaire pour l'évaporation est prélevée sur les tissus et peut s'exprimer (Höppe, 1993) :

$$E_D = m \times L_v \times (e_a - e_s(T_{sk}))$$

avec  $m$  le coefficient de perméance de la peau à la vapeur d'eau. D'après Blaxter (1989), ce coefficient a une valeur de  $5,32 \cdot 10^{-6} \text{ kg.s}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa}^{-1}$ , ce qui correspond à une perte moyenne d'environ 800 ml d'eau par jour pour un individu moyen.

### Les échanges par la respiration $E_{RES}$ et $C_{RES}$

Les termes  $C_{RES}$  et  $E_{RES}$  qui représentent respectivement les échanges de chaleur liés au réchauffement et à l'humidification de l'air respiré peuvent s'exprimer de la manière suivante :

$$\begin{aligned} C_{RES} &= \rho C_p V \frac{T_{ex} - T_a}{A_{DU}} \\ E_{RES} &= \rho V L_v \frac{e_a - e_s(T_{ex})}{A_{DU}} \end{aligned}$$

où  $\rho, C_p, L_v$  sont respectivement la masse volumique, la capacité de chaleur spécifique de l'air et la chaleur de vaporisation de l'eau,  $V$  est le flux respiratoire (en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>),  $T_{ex}$  la température de l'air expirée,  $e_s(T_{ex})$  le contenu en eau de l'air expiré à saturation et  $A_{DU}$  la surface du corps humain. En suivant la norme ISO 7933 (2004), ces termes s'expriment numériquement de la manière suivante :

$$\begin{aligned} C_{RES} &= 0,00152 M (28,56 + 0,885 T_a + 0,641 e_a) \\ E_{RES} &= 0,00127 M (59,34 + 0,53 T_a - 11,63 e_a) \end{aligned}$$

où  $M$  s'exprime en W.m<sup>-2</sup>,  $T_a$  s'exprime en °C et  $e_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en kPa dans ces formules.

## Détermination des températures de corps, de peau et des vêtements

Les différents termes du bilan d'énergie appliqué au système « personne vêtue » font intervenir trois températures caractéristiques de ce système :

- la température du corps  $T_{co}$  pour le terme de transpiration  $E_{sw}$ ,
- la température de la peau  $T_{sk}$  pour le terme de transpiration  $E_{sw}$ ,
- la température des vêtements  $T_{cl}$  pour les termes de convection  $C$  et de rayonnement  $R$ .

Ainsi, nous nous retrouvons avec 3 inconnues mais pour l'instant une équation. Fanger (1970) propose d'adopter des valeurs de confort pour ces températures et il a établi le PMV par une régression linéaire du ressenti thermique d'un groupe d'individus en fonction du bilan calculé (Tableau 8). Höppe (1993) ou la norme ISO 7933 proposent de calculer ces températures. Pour cela d'autres équations de bilan d'énergie sont nécessaires, elles sont obtenues en réalisant des bilans sur les systèmes thermodynamiques « peau » et « vêtements » pour lesquels, on considérera qu'il n'y a pas de stockage d'énergie. Ainsi on obtient les équations supplémentaires suivantes :

- $F_{cs} = F_{sc} + E_{sw}$  pour la peau où  $F_{cs}$  est le flux depuis le corps vers la peau et  $F_{sc}$  est le flux depuis la peau vers les vêtements (Figure 1),
- $F_{sc} = R + C$  pour les vêtements.

D'après Höppe (1993), le flux depuis le corps vers la peau s'exprime selon la formule suivante :

$F_{cs} = V_B \rho_B C_B (T_{co} - T_{sk})$   
avec  $V_B = \frac{6,3 + 75 \times (T_{co} - 36,6)}{1 + 0,5 \times (34,0 - T_{sk})}$  la densité de flux sanguin depuis le corps vers la peau (en  $l.s^{-1}.m^{-2}$ ),  
 $\rho_B = 1,06 \text{ kg.l}^{-1}$  la masse volume du sang et  $C_B = 3,78 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$  la capacité calorifique du sang. Le flux entre la peau et les vêtements peut s'exprimer par la formule suivante :

$$F_{sc} = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{I_{cl \text{ dyn}}}$$

où  $I_{cl \text{ dyn}} = C_{orr,cl} I_{cl \text{ st}}$  est l'isolation du vêtement (voir section 3.5).

A partir des bilans d'énergie des trois systèmes « individu vêtu », « peau » et « vêtement », on dispose donc de 3 équations indépendantes qui permettent de calculer les 3 variables d'état que sont les températures de corps, peau et vêtement.

## Calcul de l'indice P.E.T. et critères d'évaluation

L'indice P.E.T. (Höppe, 1999) est défini comme la température d'un environnement intérieur de référence qui conduirait aux mêmes valeurs des variables d'état du modèle de bilan thermique du corps humain. L'environnement de référence se définit par :

- une activité métabolique produisant  $80 \text{ W.m}^{-2}$ ,
- un habillement ayant une isolation de  $0,9 \text{ clo}$ ,
- une vitesse de l'air de  $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ ,
- une pression partielle de vapeur d'eau de  $12 \text{ hPa}$  (correspondant approximativement à une humidité relative de  $50\%$  à  $20^\circ\text{C}$ ),
- un environnement radiatif générant une température radiante égale à la température de l'air.

Enfin, la valeur de l'indice PET est bien reliée au ressenti thermique des personnes et d'autres indicateurs du confort thermique du corps humain (Echave, 2007). Les critères sont indiqués dans le Tableau 8.

Physiologically Equivalent Temperature (°C)	Ressenti thermique	Bilan thermique (W m <sup>-2</sup> )	Predictary Mean Vote
> 35	Trop chaud	> 150	> 3,5
23 à 35	Préférerait plus frais	50 à 150	1,5 à 3,5
18 à 23	Confortable	-50 à 50	-1,5 à 1,5
13 à 18	Préférerait plus chaud	-150 à - 50	-3,5 à -1,5
< 4	Trop froid	< - 150	< -3,5

Tableau 8: Correspondance entre la valeur de l'indice PET, le ressenti thermique, le bilan d'énergie du corps et le vote moyen prévisible.

## RÉFÉRENCES

- Belding H., Hatch T.F., 1955, Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological straining. *Heating, Piping, Air Conditioning*, 27: 129-142.
- Blaxter K.L., 1989, *Energy Metabolism in Animals and Man*. Cambridge University Press, Cambridge, 336 p.
- Bruse M., 2005, Assessing urban microclimate from the user's perspective – Multi-Agent systems as a new tool in urban biometeorology. *Ann. Meteorol.*, 41: 137-140.
- Bruse M., 2005, ITCM – a simple dynamic 2-node model of the human thermoregulatory system and its application in a multi-agent system. *Ann. Meteorol.*, 41: 398-401.
- Bruse M., 2009, Analysing human outdoor thermal comfort and open space usage with the multi-agent system Botworld. In *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, Yokohama (Japan)*.
- Burt J.E., O'Rourke P.A. and Terjung W.H., 1982, The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature I. Modeling considerations. *Int. J. Biometeor.*, 26: 3-23.
- Burt J.E., O'Rourke P.A. and Terjung W.H., 1982, The relative influence of urban climates on outdoor human energy budgets and skin temperature II. Man in an urban environment. *Int. J. Biometeor.*, 26: 25-35.
- Echave C., 2007, Verdes de la ciudad. Potencial de Habitabilidad térmica en espacios urbanos. Thèse de l'Université Politècnica de Catalunya.
- Fanger P.O., 1970, *Thermal comfort: analysis and application in environment*. New York: McGraw Hill.
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M., 1999, A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: The passive system. *J. Appl. Physiol.*, **87** (5), 1957-1972.
- Fiala D., Lomas K.J., Stohrer M., 2001, Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.*, 45: 143-159.
- Gagge A.P., Stolwijk J.A.J., Hardy, J.D., 1967, Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ. Res.*, 1: 1-20.
- Gagge A., Stolwijk J., Nishi Y., 1971, An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Trans.*, 77(1): 247-262.
- Gagge A.P., Fobelets A.P., Berglund L.G., 1986, A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.*, 92: 709-31.
- Giles B.D., Balafoutis C., Maheras P., 1990, Too hot for comfort: the heatwaves in Greece in 1987 and 1988. *Int. J. Biometeor.*, 34: 98-104.
- Givoni B., 1969, *Man, climate and architecture*. New York: John Wiley & Sons.

- Havenith G., 2001, Individualized model of human thermoregulation for the simulation of heat stress response. *J. Appl. Physiol.*, 90:1943-1954.
- Höppe P., 1993, Heat Balance modelling. *Experientia*, 49: 741-746.
- Höppe P., 1999, The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeor.*, 43: 71-75.
- Höppe P., 2002, Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 34: 661-665.
- ISO 7933, 2004, Ergonomie des ambiances thermiques—Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible
- Jendritzky G., Nübler W., 1981, A model analysing the urban thermal environment in Physiologically significant terms, *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B., 29: 313-326.
- Jendritzky G., Staiger H., Bucher K., Graetz A., Laschewski G., ?, The perceived temperature: the method of the Deutscher Wetterdienst for the assessment of cold stress and heat load for the human body.
- Krys S.A., Brown R.D., 1990, Radiation absorbed by a vertical cylinder in complex outdoor environments under clear sky conditions. *Int. J. Biometeor.*, 34: 69-75.
- Masterton, J.M., Richardson F.A., 1979, Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, 45 pp.
- Matzarakis A., Mayer H., Iziomon M.G., 1999, Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. *Int. J. Biometeor.*, 43: 76-84.
- Matzarakis A., Rutz F., Mayer H., 2007, Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – application of the RayMan model. *Int. J. Biometeor.*, 51: 323-334.
- Mayer H., Höppe P., 1987, Thermal comfort of man in different Urban Environments. *Theor. Appl. Climatol.*, 38: 43-49.
- Monteiro L.M., 2005, Review of numerical modelling of outdoor thermal comfort. In proceedings of *The 2005 World Sustainable Building Conference*, 2252-2259.
- Oke T.R., 1987, Boundary Layer Climates. *Methuen London & New York*, 435 p.
- Parsons K.C., Havenith G., Holmér I., Nilsson H., Malchaire J., 1999, The effects of wind and human movement on the heat and vapour transfer properties of clothing. *Ann. Occ. Hyg.*, 43: 347-352.
- Pearlmutter, D., Bitan A. and Berliner P., 1999, Microclimatic analysis of « compact » urban canyons in an arid zone. *Atmospheric Environment*, 33: 4143-4150.
- Santamouris M. Asimakopoulos D., 1996, Passive cooling of buildings. London: *J&J*.
- Siple, P.A., Passel C.F., 1945, Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *In Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, N°1: 177-199.
- Webb C., 1960, Thermal discomfort in an equatorial climate. A monogram for the index. *J. of the IHVE*, 27, 10p.
- Williamson S.P., 2003, Report on wind chill temperature and extreme heat indices: evaluation and improvement projects. Washington: The Office for Meteorological Services and Supporting Research.
- Yaglou C.P., Minard D., 1957, Control of heat casualties at military training centers. *A. M. A. Archives of Industrial Health*, 16: 302-316.