



HAL
open science

Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort

Françoise Thellier

► **To cite this version:**

Françoise Thellier. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort. Thermique [physics.class-ph]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1989. Français. NNT: . tel-00993580

HAL Id: tel-00993580

<https://theses.hal.science/tel-00993580>

Submitted on 20 May 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° D'ORDRE :

THESE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE PAUL SABATIER DE TOULOUSE (SCIENCES)

en vue de l'obtention

DU DIPLOME DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PAUL SABATIER

Spécialité : "Energétique"

par

Françoise THELLIER

MODELISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE L'HOMME ET DE SON HABITAT. UNE APPROCHE DE L'ETUDE DU CONFORT

Soutenue le 11 juillet 1989, devant la Commission d'Examen :

MM. A. CORDIER

Président

V. CANDAS

P. DEPECKER,

C.J. HOOGENDOORN

R. JAVELAS,

F. MONCHOUX

P. MORAND,

P. VINCENSINI,

Examineurs

Laboratoire d'Energie Solaire Et Thermique de l'Habitat

Françoise THELLIER

**MODÉLISATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE DE
L'HOMME ET DE SON HABITAT.
UNE APPROCHE DE L'ÉTUDE DU CONFORT**

Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier
Spécialité Energétique, Toulouse 1989.

Résumé : La modélisation de l'habitat ne peut plus se limiter à la détermination des paramètres physiques d'une ambiance, mais doit s'étendre à l'étude de leurs effets sur le corps humain.

Un modèle mathématique de thermorégulation humaine, créé par J.A.J. Stolwijk, a été inséré dans le logiciel de simulation de l'habitat TRNSYS.

Diverses modifications ont dû être apportées, pour prendre en compte les vêtements et affiner le calcul des échanges thermiques entre un individu et son environnement, en particulier pour les échanges radiatifs.

Cet outil complet est validé par confrontation avec des données générales issues de la littérature et des résultats d'expériences réalisées par des physiologistes.

Il fournit des données caractérisant l'état thermique global et local du sujet (température et mouillure cutanée) et ses réactions physiologiques (sudation, frissons, vasomotricité).

La détermination des grandeurs physiques permet une meilleure analyse des interactions entre un habitant et son habitat dans des situations complexes, en vue d'une approche de l'étude du confort thermique ou des inconforts locaux d'un individu soumis à des ambiances hétérogènes.

Mots clefs :

- Modélisation	- habitat
- Régime variable	- bilan thermique
- Thermo-physiologie humaine	- température cutanée
- Confort thermique	- Inconforts locaux

Jury et date de soutenance : le 11 Juillet 1989

Président A. CORDIER

Membres V. CANDAS P. DEPECKER
 J.C. HOOGENDOORN R. JAVELAS
 E. MONCHOUX P. MORAND
 P. VINCENSINI

Laboratoire Energie Solaire Et Thermique de l'Habitat
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne - 31062, TOULOUSE Cedex

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui de près ou de loin m'ont permis de mener à bien ce mémoire:

Monsieur A. CORDIER, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, Directeur du Laboratoire Energie Solaire Et Thermique de l'Habitat et président du jury, qui m'a permis d'effectuer ce travail et m'a toujours guidée et encouragée. Je voudrais lui témoigner ici toute ma reconnaissance.

Madame F. MONCHOUX, Maitre de conférences à l'U.P.S., qui a accepté de diriger cette thèse et de faire partie de ce jury, pour son amitié, sa disponibilité, son soutien quotidien tant au niveau scientifique que personnel.

Monsieur V.CANDAS, chargé de recherche, responsable de l'équipe de physiologie du Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales (L.P.P.E.) de Strasbourg, pour sa participation au jury, et les conseils qu'il m'a donnés dans un domaine qui n'était pas le mien.

Monsieur P.MORAND, de l'A.F.M.E. pour l'intérêt qu'il porte à ce travail, qu'il a bien voulu accepté de juger.

Monsieur R. JAVELAS, Professeur à l'I.N.S.A. de Toulouse, d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail et membre du jury.

Messieurs P.DEPECKER, Professeur à l'I.N.S.A. de Lyon et P.VINCENSINI, Professeur à l'U.P.S., pour leur présence au sein de ce jury.

Monsieur J.C. HOOGENDOORN, de l'université de Delft, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de participer au jury malgré ses activités et son éloignement.

Monsieur G. SERIN, pour son aide lors de la bibliographie et pour la tenue vestimentaire de MARCL indispensable dans ce travail.

Monsieur J.Y. GRANPEIX, pour ses avis sur le rayonnement et son aide dans le domaine informatique, et Messieurs J.L.JOLY et J.L. BRETON pour les discussions informelles et chaleureuses qui m'ont permis de prendre le recul nécessaire face à mon travail.

Madame I. MINIER qui a assuré la dactylographie, et Monsieur M. LAURENS pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur aide à la réalisation de ce mémoire.

Monsieur F. GRIVEL, psychologue du L.P.P.E. de Strasbourg et Mademoiselle M. GALEOU, qui m'ont aidée, à travers leurs discussions, à mieux aborder un domaine qui m'était inconnu.

Et bien sûr sans citer tout le monde, je ne sais comment remercier, tous les membres du laboratoire pour leur soutien permanent, leur amitié et leurs conseils. Je voudrais souligner l'importance qu'a eu pour moi, la qualité des rapports humains au cours de ces quatre années.

Je remercie également le Plan-Construction, le Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, Electricité De France et Gaz De France, pour leur soutien financier.

TABLE DES MATIERES

Notations

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I - L'HABITANT ET SON ENVIRONNEMENT</u>	5
I.1 . LES ÉCHANGES THERMIQUES SUJET/AMBIANCE	7
I.1.1 . Généralités	7
I.1.2 . Production de chaleur et échanges internes	7
a) Production de chaleur	7
b) Echanges internes	10
I.1.3 . Echanges avec le milieu environnant	11
a) Respiration	11
b) Conduction	12
c) Convection	12
d) Rayonnement	16
e) Evaporation	19
f) Influence des vêtements	24
I.1.4 . La thermorégulation	30
a) Généralités	30
b) Réaction au froid	34
c) Réaction au chaud	35
I.1.5 . La surface cutanée	35
I.2 . BILAN, ÉQUILIBRE, NEUTRALITÉ ET CONFORT	38
I.2.1 . Bilan thermique et équilibre thermique	38
I.2.2 . Equilibre thermique et neutralité thermique	39
I.2.3 . Neutralité thermique et confort thermique	40
I.2.4 . Inconfort local	41
I.3 . LES PARAMETRES DE L'AMBIANCE	42
I.3.1 . Généralités	42
I.3.2 . Température de l'air	43
I.3.3 . Vitesse de l'air	44

I.3.4 .	Température de parois	45
a)	Température de rayonnement	45
b)	Température du sol	46
I.3.5 .	Humidité relative	48
I.3.6 .	Autres paramètres	49
I.4 .	LES INDICES	50
I.4.1 .	Les indices physiques	50
a)	Température moyenne de rayonnement	50
b)	Température opérative	50
c)	Température effective standard	51
I.4.2 .	Les indices physiologiques	52
a)	Les indices de danger	52
b)	Les indices de confort	53
c)	Le profil U.C.R.E.S.	55
I.4.3 .	Conclusion sur les indices	55
I.5 .	LES MODELES	56
I.5.1 .	Les modèles simples	56
a)	Le modèle de Gagge	56
b)	Le modèle K.S.U.	57
I.5.2 .	Les modèles complexes	58
I.5.3 .	Conclusion sur les modèles	60
<u>CHAPITRE II - LE MODELE HABITANT - HABITAT</u>		61
II.1 .	LE MODELE DE L'HABITAT	63
II.2 .	LE MODELE DE L'HABITANT	65
II.2.1 .	Le système contrôlé	65
a)	Production de chaleur	67
b)	Transferts internes de chaleur	67
c)	Les échanges avec le milieu extérieur	68
II.2.2 .	Le système de contrôle	69
a)	Les détecteurs	70
b)	L'intégrateur	70
c)	L'effecteur	71
II.2.3 .	Remarques générales sur le programme	72

II.3 . LES MODIFICATIONS APPORTÉES	75
II.3.1 . Convection	75
a) Stratification	76
b) Vitesses d'air locales	77
II.3.2 . Rayonnement	79
a) Description de la méthode de calcul	80
b) Description du sujet	81
c) Influence du sujet sur la pièce	81
d) Précision de la méthode	82
e) Influence de l'orientation du sujet	83
f) Position du sujet par rapport à une surface froide	85
II.3.3 . Les vêtements	87
a) Transferts de chaleur	87
b) Transferts de masse	90
II.3.4 . Synthèse du modèle	90
a) Vue d'ensemble	90
b) Hypothèses et limites de validité des simulations	92

CHAPITRE III - VALIDATION DU MODELE 95

III.1 . VALIDATION GLOBALE	97
III.1.1 . Variation des températures cutanées	97
III.1.2 . Différence verticale (tête-pieds) de température d'air	99
a) Conditions expérimentales	100
b) Conditions de simulation	101
c) Résultats	102
III.1.3 . Inertie thermique et régime transitoire	105
III.2 . VALIDATION FINE	108
III.2.1 . Les conditions proches de la neutralité	108
a) Conditions expérimentales	108
b) Comparaison des résultats	111
c) Conclusions	120
III.2.2 . Les conditions extrêmes	120
a) Conditions expérimentales	120
b) Comparaison des résultats pour les ambiances chaudes	122
c) Comparaison des résultats pour les ambiances froides	130
d) Comparaison des résultats pour l'ambiance "neutre"	132
e) Conclusions	133

<u>CHAPITRE IV - APPLICATION DU MODELE</u>	135
IV.1 . RISQUES DES COURANTS D'AIR	137
a) Conditons climatiques	137
b) Courant d'air sur la tête	137
c) Courant d'air sur les pieds	140
d) Comparaison des deux cas	141
e) Conclusions	142
IV.2 . PRÉVISION DANS L' HABITAT REEL	143
a) Conditons climatiques	143
b) Résultats	144
<u>CONCLUSIONS</u>	149
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	153
<u>ANNEXES</u>	
A.I . Paramètres physiologiques et confort ou inconfort thermique	
A.II . Résultats expérimentaux : les conditions proches de la neutralité	
A.III . Résultats expérimentaux : les conditions extrêmes	
A.IV . Les types créés dans TRNSYS	

NOTATIONS

A_{DU}	Surface corporelle, aire de Dubois	m^2
C	Echange convectif	W/m^2
C_{res}	Convection respiratoire	W/m^2
E_{diff}	Perspiration insensible, évaporation diffuse	W/m^2
E_{max}	Pouvoir évaporatoire de l'ambiance	W/m^2
E_{resp}	Evaporation respiratoire	W/m^2
E_{sw}	Evaporation de la sueur	W/m^2
f_{cl}	Facteur d'augmentation de surface des habits	
F_{cl}	Facteur d'isolement thermique des habits	
F_{eff}	Facteur de surface effective rayonnante	
F_{i-k}	Facteur de forme entre les surfaces i et k	
F_{pcl}	Facteur d'isolement évaporatoire des habits	
H_{flow}	Echange total de chaleur dans l'ambiance	W/m^2
H	Hauteur	m
h_c	Coefficient d'échange par convection	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
h_e	Coefficient d'échange par évaporation	$W/(m^2 Pa)$
h_r	Coefficient équivalent d'échange radiatif	$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
I_{cl}	Résistance thermique globale des vêtements	Clo ou $(m^2 \cdot ^\circ C)/W$
i_L	Coefficient de perméabilité des habits	
K	Echange conductif	W/m^2
L_v	Chaleur latente de vaporisation	J/Kg
L_w	Coefficient de lewis	$^\circ C/Pa$
M	Métabolisme total ou énergétique	met ou W/m^2
M_a	Métabolisme d'activité	W/m^2
M_b	Métabolisme basal	met ou W/m^2
M_{net}	Métabolisme net ou calorique	W/m^2
P_a	Pression de vapeur dans l'air	Pa
P_m	pression de vapeur à la surface de la peau	Pa
PMV	Predicted Mean Vote	
PPD	Predicted Pourcentage of Dissatisfied	
P_{sk}	Pression de vapeur saturante à température T_{sk}	Pa
R	Echange radiatif	W/m^2
R_{cl}	Résistance locale des habits	$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$
R_{resp}	Echange respiratoire	W/m^2

S	Charge thermique globale du corps	W/m ²
SET*	Température effective standard	°C
S _{kbf}	Débit sanguin cutané	l/min
S _{ud}	Quantité d'eau transpirée	g/h
T _a	Température de l'air	°C
T _{cl}	Température de surface des vêtements	°C
T _{cll}	Température locale de surface des vêtements	°C
T _{exp}	Température de l'air expiré	°C
T _{mrt}	Température moyenne de rayonnement	°C
T _{murs}	Température des murs	°C
T _{op}	Température opérative	°C
T _{sk}	Température moyenne cutanée	°C
T _{skl}	Température locale cutanée	°C
T _w	Température humide	°C
T _{dp}	Température de rosée	°C
V _a	Vitesse d'air dans le local	m/s
V _M	Vitesse d'air dû au mouvement du sujet	m/s
V _{rel}	Vitesse d'air relative	m/s
W	Travail externe	W/m ²
X	Teneur en eau	Kg d'eau/Kg d'air sec
ε	Emissivité dans le domaine infra-rouge	
σ	Constante de Stefan-Boltzman	W/m ² K ⁴
∂O ₂	Volume d'oxygène consommé	l/min
∂ _p	ventilation pulmonaire	l/min
ω	Mouillure cutanée	

Les indices

a	Relatif à l'air	l	données locales
b	Valeurs basales	r	Rayonnement
c	Convection	sk	Surface de la peau
cl	Surface des habits		

Les unités

Résistance thermique des vêtements : 1 clo = 0,155 (m²C)/W
 Métabolisme : 1 met = 58 W/m²

INTRODUCTION

Dans nos sociétés occidentales, l'homme passe la majeure partie de sa vie à l'intérieur d'un bâtiment. Le but essentiel du chauffage et de la climatisation est de contrôler cet environnement pour créer un climat interne favorable au développement des activités humaines. La production et le maintien d'un tel climat ne pose aucune difficulté de principe tant que l'élément qui doit en bénéficier reste passif : réguler une pièce ne contenant qu'un thermomètre est un problème que l'on doit savoir résoudre de manière satisfaisante.

Cela devient beaucoup plus compliqué lorsque la pièce contient un habitant : le corps humain ne reste pas passif. Il est le siège de réactions physiologiques (sudation, frissons, vasomotricité) qui interagissent avec les grandeurs physiques caractérisant l'environnement. De plus, c'est en s'appuyant sur des données relevant de la psychologie et de la sociologie que l'homme traduit les paramètres physiques et physiologiques qu'il perçoit en termes subjectifs tels que : "j'ai trop chaud".

Les études dans ce domaine ont débuté à la fin du 18ème siècle. Lavoisier, dès 1784, fut le premier à mettre en évidence la production de chaleur du corps. Depuis, de nombreuses études ont été réalisées par des physiologistes et des psychologues pour mieux connaître la façon dont un sujet perçoit son environnement. En parallèle, des études sur l'habitat ont été menées le plus souvent en considérant le bâtiment non occupé.

Les progrès réalisés dans la modélisation de l'habitat et dans celle du corps humain permettent maintenant d'envisager la réalisation de simulations plus complètes donnant les réactions physiologiques d'un individu dans un habitat réel. Dans ce but, le Plan-Construction, l'A.F.M.E., E.D.F. et G.D.F. ont mis en place une convention de recherche regroupant deux Laboratoires :

- le Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementale (LPPE) du CNRS de Strasbourg,
- le Laboratoire Energie Solaire Et Thermique de l'Habitat (LESETH) de Toulouse, où l'étude présentée ici a été effectuée en totalité. Cette collaboration a abouti à un modèle de simulation de l'homme à l'intérieur d'un bâtiment.

Les dimensions psychologiques et sociologiques ne sont pas prises en compte, car elles s'éloignent trop de notre domaine de connaissances. Ainsi, le modèle que nous présentons ici ne constitue qu'une approche physique du confort thermique de l'habitant.

Les bases de thermophysiologie sont données dans le Chapitre I. Nous y présenterons les échanges thermiques dont le corps humain est le siège, ainsi que les diverses tentatives de caractérisation du confort qui ont été faites, telles que les indices.

Dans le Chapitre II, nous décrivons le modèle mathématique de thermorégulation humaine utilisé et les modifications qui y ont été apportées.

Le Chapitre III est consacré à la comparaison du modèle avec les données globales ou détaillées issues d'expériences réalisées par des physiologistes.

Enfin, nous montrons dans le Chapitre IV que ce modèle peut être utilisé pour des situations complexes, pour lesquelles il n'existe pas encore de résultats expérimentaux.

CHAPITRE I

L'HABITANT ET SON ENVIRONNEMENT

I.1 . LES ECHANGES THERMIQUES SUJET/AMBIANCE

I.1.1 . Généralités

L'homme est un endotherme. Sa température interne doit rester voisine de 37°C quels que soient son activité et son environnement.

L'homéothermie est l'une des caractéristiques des mammifères et des oiseaux. On l'oppose souvent à l'hétérothermie des espèces (serpents, etc.), dont la température varie.

La température interne d'un homme varie au cours d'une journée de 36,5°C pendant la nuit à 37,5°C en milieu d'après-midi. Mises à part ces fluctuations circadiennes, des variations de 1,2 à 1,8°C peuvent être tolérées : au-delà des désordres physiologiques interviennent, dont certains peuvent être irréversibles et même mortels.

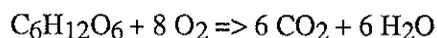
Le corps est régi par les lois générales de la thermodynamique ; il est le siège permanent de production de chaleur, et de transferts de masse et de chaleur interne. La chaleur interne produite est dissipée dans l'environnement par échanges de chaleur latente et sensible, au niveau des voies respiratoires et de la surface de la peau.

Le corps n'est pas un système passif ; il prend une part active dans le contrôle des échanges internes et externes. Pour cela, il met en jeu des réactions physiologiques végétatives, inconscientes, ainsi que comportementales, donc conscientes.

I.1.2 . Production de chaleur et échanges internes

a) Production de chaleur

La production de chaleur est due aux réactions chimiques qui se déroulent dans les cellules. Les principales sont de type oxydoréduction :



Plus l'activité de l'individu est grande, plus les réactions sont importantes ; la consommation d'oxygène et les rejets en gaz carbonique augmentent proportionnellement, l'énergie totale fournie par le corps ou métabolisme total est mesuré expérimentalement grâce au volume d'oxygène ($V'O_2$) consommé [30]. Il est donné en Watts par m² de surface corporelle.

$$M = 352(0,23 Q + 0,77) \frac{V_{O_2}}{A_{Du}}$$

M métabolisme total (W/m^2) ; l'unité souvent utilisée est le met : 1 met = 58 W/m^2 ;

V_{O_2} volume d'oxygène consommé (l/min) ;

Q quotient respiratoire.

A_{Du} surface corporelle ou Aire de Dubois (m^2)

$$A_{Du} = 0,203 P^{0,425} H^{0,725} \quad (P = \text{poids en kg ; } H = \text{taille en m}) ;$$

Le quotient respiratoire Q est le rapport du nombre de moles de CO_2 rejetées au nombre de moles d' O_2 inspirées : il vaut environ 0,82 au repos et 1 lors d'une activité physique. Cela donne, au repos, pour un homme moyen : $M = (180 V_{O_2}) W/m^2$.

Remarque : On peut aussi estimer la perte de poids métabolique (m_n) qui est due à la transformation du O_2 inspiré en CO_2 à l'expiration :

$$m_n = 0,18 V_{O_2} \quad (m_n \text{ en g/min})$$

Le métabolisme total ou énergétique peut être décomposé en plusieurs termes :

$$M = M_b + M_a + \Delta M$$

Le métabolisme basal, M_b , est la production de chaleur minimum nécessaire aux fonctions vitales de l'organisme ; il dépend du sexe, de l'âge (Figure I.1) et de la morphologie.

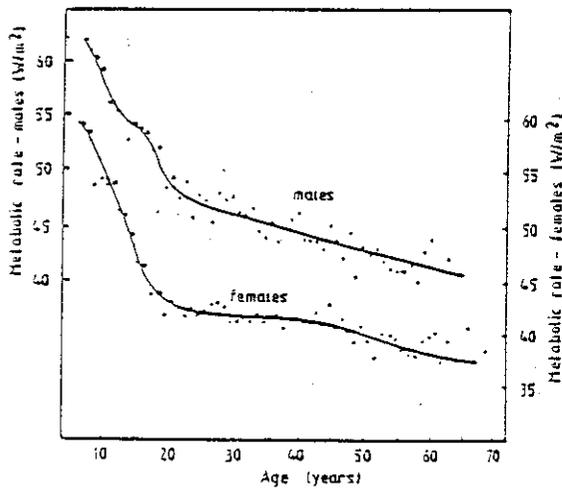


Figure I.1 - Variation du métabolisme basal en fonction de l'âge, pour les deux sexes [66]

Homme : $M_b = \frac{0,048}{A_{Du}} (66,47 + 13,75 P + 500 H - 6,75 A)$

Femme : $M_b = \frac{0,048}{A_{Du}} (155,05 + 9,56 P + 184,97 H - 4,67 A)$ A = âge (ans).

Ce qui donne en moyenne 45 W/m^2 pour un homme et 40 W/m^2 pour une femme.

Le métabolisme d'activité, M_a , est dû à l'augmentation de production de chaleur qui accompagne nécessairement toute activité physique.

D'autres variations de métabolisme, ΔM , peuvent intervenir ; elles sont liées à :

- la physiologie : sommeil, éveil, alimentation,
- la pathologie : dérèglements hormonaux, carences alimentaires,
- la régulation : apparitions de frissons.

Métabolisme net et travail externe

Lorsque le corps produit un travail externe il a un rendement d'au plus 20 %. Dans le bilan thermique du corps, la valeur à prendre en compte est la part de métabolisme qui se transforme en chaleur et qui devra être dégagée dans l'ambiance ; on parle alors de métabolisme net ou calorique :

$$M_{\text{net}} = M - W = M(1 - \mu)$$

W travail externe,

μ rendement du travail

Pour la plupart des activités, le travail est presque nul. Aussi, dans les calculs, il est fréquent de ne pas en tenir compte ; on a alors $M_{\text{net}} = M$.

La production de chaleur n'est pas homogène dans le corps, comme l'indique le tableau ci-après.

	masse %	M % repos	M % activité
cerveau	2	16	1
vicères	34	56	8
muscles	56	18	90
autres	8	10	1

Tableau I.1 - Poids et métabolisme relatif de chaque partie du corps

La valeur exacte du métabolisme est difficile à connaître ; dans la plupart des cas, elle est estimée grâce au tableau donnant le métabolisme total et le rendement pour des activités courantes (Tableau I.2).

Il existe quelques formules empiriques complexes permettant de calculer le métabolisme en fonction de divers paramètres, comme la vitesse de marche, la pente de la route ou le poids porté [46].

Il faut noter que l'augmentation du métabolisme peut atteindre des valeurs élevées (1000 W/m² pour certains athlètes) : seule une ambiance très chaude et pouvant provoquer des brûlures est susceptible de transmettre à l'individu une telle quantité de chaleur.

Type d'activité	Métabolisme		Rend. du travail
	met	W/m ²	
Couché au repos	0,8	47	
Assis au repos	1,0	58	
Activité sédentaire (bureau, domicile, laboratoire, école)	1,2	70	
Debout au repos	1,2	70	
Activité légère, debout (achats, industrie légère)	1,6	93	
Activité moyenne, debout (vendeur, travail ménager)	2,0	116	0,05
Activité soutenue (travail lourd sur machine)	3,0	175	0,15
Marche à une vitesse de :	3,2 Km/h	2	116
	4,8	2,6	151
	6,4	3,8	220
	8,0	5,8	330
Marche sur un pente, à une vitesse de :	5% 1,6 Km/h	2,4	139
	5 3,0	4	232
	15 1,6	2,8	168
	15 3,0	7	406
	25 1,6	3,6	209
Marche à 4 Km/h avec une charge de 20Kg	3,8	220	0,10
Course à pied :	10 Km/h	14,8	830
	25	43	2500
Nage à :	1,6 Km/h	5,4	315
	2,4	13,1	760

Tableau I.2 - Exemples de valeurs de métabolisme et de rendement du travail, pour différentes activités pratiques [33].

b) Echanges internes de chaleur

La chaleur produite dans le corps doit être amenée à la surface de la peau pour être dissipée dans le milieu environnant. Ce transfert de chaleur se fait de deux façons :

- Par conduction tissulaire :

La chaleur est transmise par conduction à travers les couches musculaires, graisseuses et cutanées. Il s'agit d'un phénomène passif, non contrôlé, qui est lié aux écarts de température entre les différentes couches. Le coefficient moyen de conduction est d'environ 5,8 W/m²°C. Ce mode de transfert est de faible importance par rapport à la convection sanguine.

- Par convection sanguine :

La chaleur est également transmise entre les différentes parties du corps par convection forcée due à la circulation sanguine. Le sang veineux venant de la périphérie est en général plus froid que le sang artériel : le sang agit comme un échangeur contre-courant. Le débit sanguin augmente dans les couches musculaires en fonction de l'activité physique du sujet ; au niveau de la peau il est contrôlé par le système de régulation.

I.1.3 . Echanges de chaleur avec le milieu environnant

Les échanges de chaleur avec milieu ambiant se font, d'une part, par respiration (R_{esp}), d'autre part, au niveau de la peau, par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation (E_{vap}). Ces échanges externes dépendent des caractéristiques physiques de surface de la peau, c'est-à-dire de sa température (T_{sk}) et son humidité.

a) La respiration

A l'inspiration, l'air est à température et pression de vapeur ambiante. Il s'humidifie et s'échauffe d'abord dans le nez, le pharynx, puis les poumons (où la surface d'échange est d'environ 100 m^2), pour atteindre 37°C [69,89,107].

A l'expiration, il cède une partie de la chaleur au pharynx, ce qui explique que la température de l'air expiré est d'environ 34°C et qu'il est presque saturé en humidité.

Ces variations de l'état de l'air se traduisent en général par une perte de chaleur pour le corps. On sépare les pertes respiratoires R_{esp} en deux termes : C_{res} , échange de chaleur sensible ou convection respiratoire et E_{res} , échange de chaleur latente ou évaporation respiratoire. La chaleur échangée dépend du débit d'air respiré \mathcal{V}_p qui est fonction de l'activité du sujet, ce qui donne alors:

$$R_{\text{esp}} = C_{\text{res}} + E_{\text{res}}$$

$$\text{avec } C_{\text{res}} = \mathcal{V}_p C_p (T_{\text{exp}} - T_a)$$

$$E_{\text{res}} = \mathcal{V}_p L_v (X_{\text{exp}} - X_a)$$

\mathcal{V}_p	Ventilation pulmonaire	$\mathcal{V}_p = 0,3M \text{ (Kg/h)}$ (avec M en met)
C_p	Chaleur massique de l'air	$C_p = 1 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$
L_v	Chaleur latente de vaporisation	$L_v = 2416 \text{ KJ/Kg}$
T_{exp}	Température de l'air expiré	$T_{\text{exp}} = 32,5 + 0,066 T_a + 1,99 \cdot 10^{-4} P_a$
T_a	Température de l'air ambiant	
X_{exp}, X_a	Teneur en eau de l'air expiré et ambiant (kg d'eau/kg air sec)	

On obtient alors les deux expressions les plus utilisées :

$$C_{\text{res}} = 0,0014 M (T_{\text{exp}} - T_a) \quad \text{et} \quad E_{\text{res}} = 1,72 \cdot 10^{-5} M (P_{\text{exp}} - P_a)$$

Les pertes respiratoires sont relativement faibles au repos ; elles représentent 10 à 12 % des pertes totales. Elles sont accompagnées d'une perte de poids, due à la perte d'eau, d'environ 1 à 2 g/min lors d'un activité modérée.

b) La Conduction externe

Il y a échange de chaleur par conduction lorsque le corps est en contact direct avec des éléments solides. En général, les surfaces en contact sont assez faibles. La surface de contact des pieds au sol, par exemple, représente un très petit pourcentage de la surface totale du corps. Dans le cas d'un sujet assis dans un fauteuil, on assimile ce dernier à un habit très épais.

Quelques études ont été réalisées sur des systèmes de chauffage individuel, par fauteuil chauffant, pour des personnes sédentaires [74] ; l'expression des échanges conductifs K est alors :

$$K = K_f A_{co} (T_{sk} - T_f)$$

A_{co}	surface corporelle en contact
K_f	coefficient de contact $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
T_f	température du fauteuil
T_{sk}	température de la peau

Ce cas est très particulier ; par la suite, on négligera les échanges conductifs.

c) La convection

Les échanges par convection se produisent lorsqu'il y a transfert de chaleur et de masse dans un milieu fluide en mouvement. Dans le cas d'un individu, ils ont lieu entre la surface de la peau et le fluide qui l'entoure, le plus souvent de l'air.

Ces échanges sont fonction de l'écart de température entre la surface de la peau (T_{sk}) et le fluide loin de la surface (T_a) et d'un coefficient d'échange (h_c).

$$C = h_c (T_{sk} - T_a)$$

C	échanges convectifs (W/m^2)
T_{sk}	température cutanée ($^\circ C$)
T_a	température de l'air dans le local ($^\circ C$)
h_c	coefficient de convection ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Il s'agit de pertes tant que la température de l'air est inférieure à celle de la peau, et de gain dans le cas contraire.

Au voisinage de la surface se développe une couche limite ; dans cette zone, la vitesse et la température varient rapidement comme l'indique la figure I.2. L'épaisseur de cette couche est fonction de la viscosité du fluide et de la vitesse moyenne (V_a) loin de la surface [92].

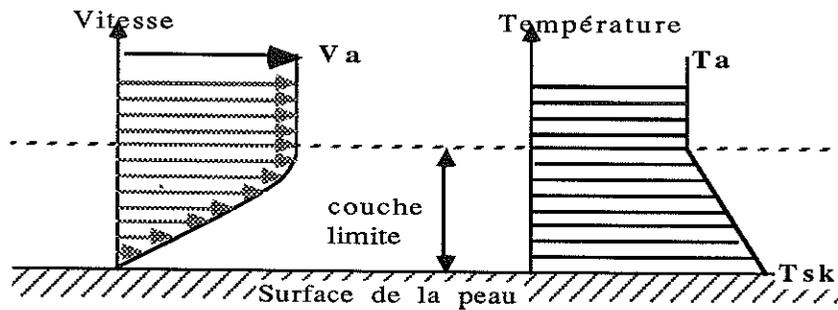


Figure I.2 - Profils de vitesse et de température dans la couche limite

Le coefficient de convection h_c dépend de plusieurs variables :

*** Caractéristiques du fluide dépendant de sa nature et de sa température**

Le fluide est le plus souvent de l'air ; diverses études ont été faites dans l'eau, pour les plongeurs sous-marins, car la convection y est le mode d'échange prépondérant. Ce cas ne nous intéresse pas dans l'habitat.

*** Caractéristiques de la surface : forme, orientation, rugosité**

Les formes de la surface jouent un rôle important. Les modèles théoriques utilisés (le plus souvent plaque plane, cylindres ou sphères) ne peuvent pas rendre compte de la complexité des formes du corps humain. C'est pourquoi les valeurs de h_c sont expérimentales. Des mesures très locales ne sont pas disponibles, mais il est probable que certains endroits du corps, le nez par exemple, ont des coefficients plus élevés.

Normalement, la peau a un aspect lisse, mais lors de l'apparition de frissons, les poils se dressent. La "chair de poule" donne alors un aspect rugueux, qui peut entraîner jusqu'à 25% de diminution des flux échangés par convection. Très peu d'études existent sur ce phénomène, qui n'est en général pas pris en compte.

*** Écoulement des fluides : vitesse, régime d'écoulement, direction**

On distingue la convection naturelle, ou libre, et la convection forcée.

- La convection naturelle

On dit qu'il y a convection libre lorsque le fluide est mis en mouvement uniquement sous l'effet des différences de températures (V_a faible).

La peau a le plus souvent une température supérieure à celle de l'environnement. Au contact de la peau l'air s'échauffe, sa masse volumique décroît. Il subit alors un mouvement ascendant ; il est ensuite remplacé vers le bas par de l'air

plus froid. Dans ce cas le coefficient h_c est essentiellement lié à l'écart de température entre la peau et l'air $\Delta T = T_{sk} - T_a$.

Le panache d'air chaud monte au-dessus de la tête jusqu'à environ 1,5 m avant de se dissiper dans la pièce. La couche limite a une épaisseur de 0,15 à 0,2 m et la vitesse passe par un maximum qui peut atteindre 0,4 m/s [18]. La Figure I.3 donne un exemple de variation de la vitesse et de la température dans cette couche limite pour un homme debout.

La couche limite est laminaire jusqu'à environ 1 m du sol, puis turbulente à partir de 1,5 m, comme l'indique la Figure I.4.

La position du sujet joue un rôle essentiel en convection naturelle. Par exemple, la vitesse d'air maximum sur le visage d'un sujet allongé est de 0,05 m/s contre 0,4 m/s en position debout.

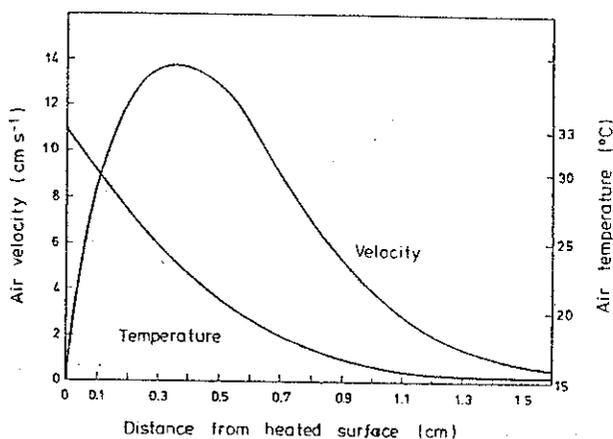


Figure I.3 : Profil de vitesse et de température dans la couche limite pour un homme debout

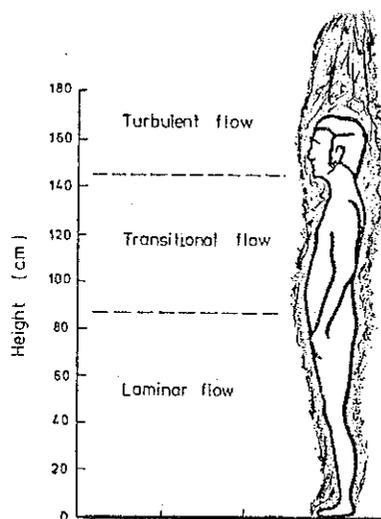


Figure I.4 : Variation du régime d'écoulement en fonction de la hauteur pour un homme debout ($T_{sk}=33^{\circ}\text{C}$, $T_a=25^{\circ}\text{C}$) (d'après Clark [18])

- La convection forcée

On dit qu'il y a convection forcée lorsque les mouvements de l'air sont provoqués par un moyen mécanique indépendant des différences de températures (ventilation du local, mouvement de l'individu, etc.) [20].

Dans ce cas, le coefficient convectif est lié à la vitesse de l'air et à son orientation par rapport au corps. Cette vitesse dépend de la vitesse moyenne d'air dans le local (V_a), mais aussi de la position et des mouvements de sujet. D'après Missenard [67], pour un sujet debout avec un flux d'air perpendiculaire de 1m/s, le coefficient h_c vaut 8,4

$W/m^2\text{°C}$, alors que, pour un sujet couché, l'écoulement étant alors parallèle au corps h_c vaut $11,4 W/m^2\text{°C}$. La Figure I.5 montre que le h_c de la tête varie fortement en fonction de son orientation par rapport à la vitesse d'air.

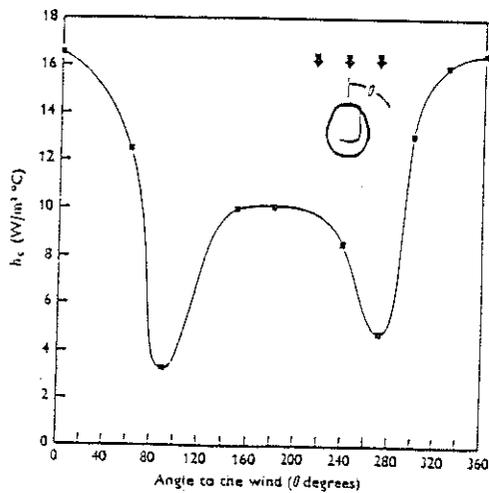


Figure I.5 - Variations du coefficient de convection local sur la tête pour différentes valeurs de Θ ($V_a = 0.8$ m/s) (d'après Clark [20])

Pour des vitesses d'air supérieures à 0.2 m/s, il s'agit de convection forcée pure ; pour des vitesses inférieures à 0.01 m/s, on se trouve en convection naturelle pure. Entre les deux (0.01 et 0.2 m/s), il s'agit de convection mixte. C'est le cas le plus fréquent dans l'habitat.

Etant donnée la complexité du problème, les études théoriques ne sont pas satisfaisantes. Il faut avoir recours aux résultats expérimentaux. Le Tableau I.3, donne quelques expressions de h_c dans diverses configurations expérimentales, selon divers auteurs. On peut noter que la plupart d'entre eux considère que h_c en convection forcée varie en $V_a^{0.5}$, mais la dispersion des résultats est relativement importante (Figure I.6)

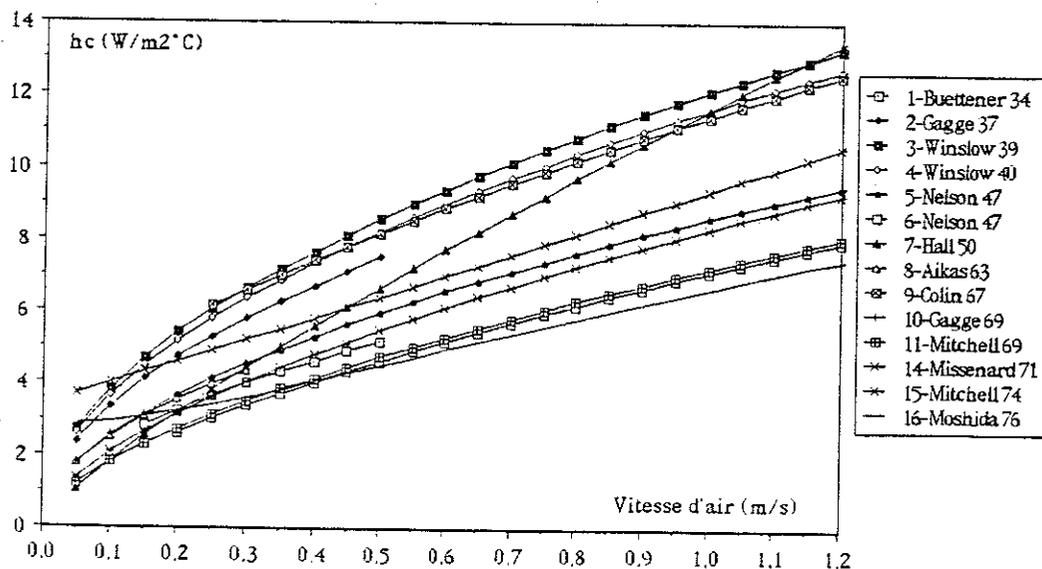


Figure I.6 - Coefficient h_c en fonction de la vitesse d'air en convection forcée.

N°	h_c (W/m ² °C)	zone de validité pour V_a (m/s)	conditions expérimentales	Auteurs
1	$7,3 V_a^{0,5}$	0,15-0,5	couché sur un lit	Buettener 1934
2	$10,6 V_a^{0,5}$	0,03-0,51	couché sur un filet	Gagge 1937
3	$12,1 V_a^{0,53}$	convection forcée		Winslow 1939
4	$11,6 V_a^{0,5}$	0,05-0,11	couché sur un filet	Winslow 1940
5	$8,6 V_a^{0,53}$	0,15-3	debout	Nelson 1947
6	$7,1 V_a^{0,62}$	0,15-3	debout	Nelson 1947
7	$11,6 V_a^{0,8}$			Hall 1950
8	$7,9 V_a^{0,5}$	0,15-0,22		Aikas 1963
9	$2,7 + 8,7 V_a^{0,67}$	0,2-1,2		Colin 1967
10	$8,6 V_a^{0,5}$	convection forcée		Gagge 1969
11	$7,2 V_a^{0,6}$	0,5-5,1		Mitchell 1969
12	$0,83 (M-50)^{0,531}$		marche légère	Stolwijk 1970
13	$1,16 (M-50)^{0,391}$		marche sur place	Nishi 1970
14	$3,42 + 5,93 V_a$		assis	Missenard 1971
15	$8,3 V_a^{0,6}$	convection forcée		Mitchell 1974
16	$(23 + 270 V_a^2)^{1/3}$			Moshida 1976
	$1,15 \Delta T^{1/4}$	convection naturelle	sur cylindre	Birebake 1966
	$2,38 \Delta T^{1/4}$	convection naturelle		Nelson 1952
	0,9-1,6	air calme	couché sur un filet	Hardy 1938
	4		sédentaire	Rapp 1973
	3	convection naturelle	repos	Nishi 1977

Tableau I.3 - Expressions du coefficient de convection selon divers auteurs.

d) Le rayonnement

On appelle rayonnement l'ensemble des échanges d'énergie à distance entre les corps, par ondes électromagnétiques. Seuls nous intéressent ici les échanges par rayonnement thermique de longueurs d'onde comprises entre 0.1 et 100 μm .

Le corps humain est soumis à deux types de rayonnement :

- le rayonnement infra-rouge échangé avec les parois qui entourent le sujet ; ce type d'échange peut conduire suivant le cas à un échauffement ou à un refroidissement du corps ;
- le rayonnement solaire reçu ; il correspond toujours à un échauffement du sujet.

Les échanges radiatifs avec le milieu extérieur ne concernent pas la totalité de la surface corporelle. Il faut tenir compte des parties du corps qui ne sont pas tournées

vers l'extérieur et rayonnent entre elles. On définit alors le facteur de surface effective rayonnante (f_{eff}), comme le rapport de la surface rayonnante (A_{ray}) à la surface corporelle totale (A_{DU}) : $f_{eff} = A_{ray}/A_{DU}$. Ce facteur peut varier de 0.96 pour une personne totalement étendue à 0.5 pour la position fœtale.

On peut remarquer que le changement de posture, agissant sur le facteur f_{eff} , afin de limiter les échanges radiatifs, est un moyen efficace de régulation comportementale.

* Le rayonnement infra-rouge

Le terme rayonnement infra-rouge est réservé aux longueurs d'onde comprises entre 0.8 et 1 μm ; elles correspondent à des corps portés à des températures voisines de 300 K. C'est le cas de la surface cutanée et de la plupart des parois dans l'habitat.

Le peau émet en permanence une quantité de chaleur par rayonnement liée à sa température (T_{sk}) et à son émissivité (ϵ).

$$R_{\text{émis}} = S_{sk} \epsilon \sigma T_{sk}^4$$

$R_{\text{émis}}$	flux émis par une surface cutanée S_{sk} (W)
S_{sk}	Surface émettrice (m^2)
T_{sk}	Température de la peau (K)
ϵ	Emissivité de la peau, elle est voisine de 1
σ	Constante de Stefan-Boltzman $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m ² K)

La peau reçoit une partie de l'énergie émise par les parois qui l'entourent. L'énergie reçue est fonction de la température de ces surfaces (T_i), de leur émissivité (ϵ_i), et de la façon dont elles "voient" la peau, donc des facteurs de vue ($F_{i \rightarrow sk}$), c'est-à-dire la fraction du flux émis par la surface (i) et reçu par la peau (sk).

La flux émis par une surface S_i vers la peau est de la forme :

$$R_{i \rightarrow sk} = F_{i \rightarrow sk} S_i \epsilon_i \sigma T_i^4$$

$R_{i \rightarrow sk}$	flux émis par S_i et reçu par la peau (W)
T_i	Température de la surface i (K)
ϵ_i	Emissivité de la surface i

La peau en absorbe une partie ϵ .

On appelle échanges radiatifs ou flux net échangé (R_s) par un élément de peau de surface S_{sk} la différence entre le flux qu'il émet et le flux qu'il reçoit de toutes les parois (i) environnantes, en négligeant la fraction qui revient sur la peau après réflexion sur les parois :

$$R_s = R_{\text{émis}} - \epsilon \sum R_{i \rightarrow sk} = S_{sk} \epsilon \sigma T_{sk}^4 - \epsilon \sum S_i F_{i \rightarrow sk} \epsilon_i \sigma T_i^4$$

Etant données les propriétés de réciprocité des facteurs de forme ($S_i F_{ij} = S_j F_{ji}$), on a :

$$\sum S_i F_{i \rightarrow sk} \epsilon_i \sigma T_i^4 = \sum S_{sk} F_{sk \rightarrow i} \epsilon_i \sigma T_i^4 = \sigma S_{sk} \sum F_{sk \rightarrow i} \epsilon_i T_i^4$$

ce qui donne :

$$R_s = S_{sk} \sigma (\epsilon T_{sk}^4 - \epsilon \sum F_{sk \rightarrow i} \epsilon_i T_i^4)$$

Pour tout le corps, on note R la densité de flux échangé par rayonnement :

$$R = f_{eff} \epsilon \sigma (T_{sk}^4 - \sum F_{sk \rightarrow i} \epsilon_i T_i^4) = f_{eff} \epsilon \sigma (T_{sk}^4 - T_{mrt}^4)$$

R densité de flux net rayonné par le corps (W/m^2)

f_{eff} facteur de surface effective rayonnante

T_{mrt} Température moyenne de rayonnement (K)

La température moyenne de rayonnement est définie comme étant la température d'une enceinte isotherme avec laquelle le sujet échange la même quantité de chaleur par rayonnement qu'avec l'enceinte non-isotherme où il se trouve réellement. Dans l'habitat, pour la plupart des matériaux, l'émissivité est proche de 1 ; dans les calculs, on pose fréquemment $\epsilon_i = 1$.

$$T_{mrt} = (\sum F_{sk \rightarrow i} (\epsilon_i) T_i^4)^{1/4} = (\sum F_{sk \rightarrow i} T_i^4)^{1/4}$$

Il s'agit de pertes pour le corps lorsque T_{mrt} est inférieure à la température de la peau, et de gains dans le cas contraire.

Le rayonnement est un mode de transfert important ; dans des ambiances froides pour un sujet au repos, en air calme, il représente environ 60% des pertes sensibles. Il est souvent mal connu. Beaucoup d'études expérimentales sont réalisées en considérant que l'enceinte est isotherme et que la température moyenne de rayonnement est égale à celle de l'air.

Ceci est rarement le cas dans l'habitat. En effet, en hiver, les différences de température de surface entre les fenêtres froides et les éléments chauffants peuvent être très importantes. De nouveaux systèmes de chauffage sont basés sur le rayonnement : plancher chauffant, plafond rayonnant. Il est donc important de mieux connaître ce mode d'échange.

* Le rayonnement solaire

L'influence du rayonnement solaire est en général difficile à calculer. Peu d'équations existent dans ce domaine et les expressions varient beaucoup selon les auteurs, car le nombre de variables à prendre en compte est important et ne dépend pas

uniquement du sujet. Les principales sont : les conditions météorologiques, l'albedo, les coefficients d'absorption de la peau et des vêtements, la surface projetée du corps, etc [12,112].

Les coefficients d'absorption de la peau et des habits varient beaucoup en fonction de leur couleur pour les longueurs d'onde du rayonnement solaire, comme le montre la Figure I.7.

Lors d'une exposition au soleil, les surfaces passives telles que les cheveux ou les habits peuvent atteindre des températures de 48 à 50°C ; par contre, pour les surfaces cutanées directement exposées, l'augmentation de température n'est que de 5 à 6°C car la régulation joue un rôle actif. La température des parties "à l'ombre" ne varie presque pas et peut même décroître en raison de l'augmentation du débit d'eau suée.

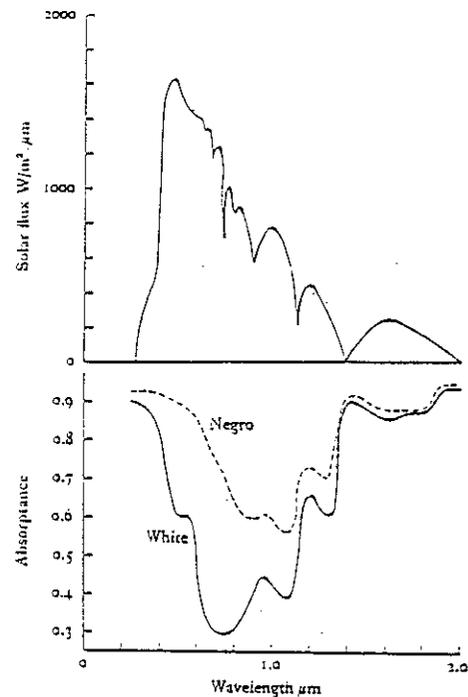


Figure I.7 - Absorption d'une peau blanche et d'une peau noire en fonction de la longueur d'onde ([66] d'après Jacquez)

Dans le calcul du bilan thermique du corps le rayonnement solaire est en général négligé. Ceci est valable dans le cas de l'habitat, mais pas pour des études en milieu extérieur, surtout dans les pays chauds.

e) L'Evaporation

Les échanges thermiques par chaleur latente sont dus au changement de phase de l'eau au niveau de la surface cutanée. Il s'agit le plus souvent d'évaporation, donc de pertes thermiques. Pour des humidités et températures d'air élevées, il peut y avoir condensation, donc apport de chaleur, mais ce phénomène est rarement observé dans nos climats, et ne sera pas étudié par la suite.

Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface et l'air environnant. Par analogie avec les transferts de chaleur, on définit un coefficient de transfert de masse, ou coefficient d'évaporation h_e .

La peau est humide avec une pression de vapeur P_m à sa surface. On considère que la pression de vapeur de la sueur est proche de celle de l'eau pure (ce qui n'est valable que pour une courte période, car, au cours du temps, la concentration en sels augmente et fait diminuer la pression).

On peut alors écrire l'expression de l'évaporation au niveau de la peau :

$$E_{\text{vap}} = h_e (P_m - P_a) \quad \left\{ \begin{array}{l} E_{\text{vap}} \text{ pertes de chaleur par évaporation (W/m}^2\text{)} \\ h_e \text{ coefficient d'évaporation (W/m}^2\text{Pa)} \\ P_a \text{ Pression de vapeur dans l'air (Pa)} \\ P_m \text{ pression de vapeur à la surface de la peau (Pa)} \end{array} \right.$$

Le coefficient d'évaporation (h_e) est fonction de la vitesse de l'air, il est souvent relié au coefficient de convection (h_c) par la relation de Lewis :

$$h_e = L_w h_c \quad \text{avec} \quad L_w = 2,2 \text{ } ^\circ\text{C/Torr} = 16,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/Pa} \text{ (coefficient de Lewis)}$$

La pression de vapeur à la surface de la peau est difficile à connaître. En définissant une humidité relative ϕ_{sk} , on a alors $P_m = \phi_{sk} P_{sk}$, avec P_{sk} pression de vapeur saturante à température T_{sk} [5].

Dans le cas où la peau est mouillée, $\phi_{sk} = 1$ et $P_m = P_{sk}$ on se trouve alors dans le cas de l'évaporation maximum :

$$E_{\text{max}} = h_e (P_{sk} - P_a)$$

Cette quantité est encore appelée pouvoir évaporatoire de l'ambiance.

Afin de se ramener à une quantité facilement accessible, on a défini la mouillure cutanée (ω), qui est la fraction équivalente de peau mouillée nécessaire pour obtenir l'évaporation observée, calculée de la façon suivante :

$$E_{\text{vap}} = h_e (P_m - P_a) = h_e (\phi_{sk} P_{sk} - P_a) = \omega h_e (P_{sk} - P_a) = \omega E_{\text{max}}$$

On peut en déduire l'expression de la mouillure :

$$\omega = E_{\text{vap}} / E_{\text{max}} = (P_m - P_a) / (P_{sk} - P_a) = (\phi_{sk} P_{sk} - P_a) / (P_{sk} - P_a) = A_w / A_{DU}$$

A_w est la surface équivalente de peau mouillée,

Ceci peut être interprété comme si la peau était une mosaïque de surfaces complètement mouillées, dont l'aire totale serait A_w , et de surfaces sèches d'aire totale ($A_{DU} - A_w$).

La mouillure est toujours inférieure ou égale à 1. Elle vaut 1 quand la peau est totalement mouillée. Par contre, elle n'est jamais nulle ; il y a toujours une diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées. Il s'agit de perspiration insensible (E_{diff} , évaporation diffuse ou cadavérique ; $E_{diff} = 0,06 E_{max}$). La mouillure minimale est donc de 6% et les pertes sont de l'ordre de 5 à 10 W/m^2 .

L'évaporation est un phénomène que l'on peut aisément mesurer [48,61]. On se place dans des conditions où la convection et le rayonnement sont nuls, c'est-à-dire que la température de l'ambiance est proche de la température cutanée. Les pertes de chaleur par évaporation correspondent alors à la chaleur produite par métabolisme. Elles sont directement liées à la perte de poids, de laquelle on a soustrait les pertes de poids métabolique et respiratoire qui sont des constantes pour une activité donnée :

$$E_{vap} = L_v m_{ev}$$

m_{ev} quantité d'eau évaporée ($Kg/s \cdot m^2$)

L_v chaleur latente de vaporisation (J/Kg)

Dans des ambiances chaudes, l'évaporation est le seul moyen dont le corps dispose pour évacuer la chaleur qu'il produit [64,109]. Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps [16,71,72,73]. On parle alors de sudation et d'évaporation requises (S_{req} , E_{req}).

Après une perturbation, un échelon de température par exemple, la sudation n'est pas immédiate ; elle s'établit de manière progressive et régulière. Le temps nécessaire pour atteindre l'état stable dépend de la charge thermique ; il faut environ une heure pour une température d'air de 35°C et seulement 9 minutes à 50°C [57].

La sueur est sécrétée par les glandes sudoripares, puis excrétée à la surface de la peau. Plusieurs cas se présentent alors :

- Si l'ambiance est sèche ($E_{vap} < E_{max}$), toute la quantité d'eau produite peut être évaporée ($E_{vap} = E_{req}$) ; la mouillure augmente avec l'évaporation :

$$\omega = \frac{E_{vap}}{E_{max}} = \frac{E_{req}}{E_{max}}$$

- Dans les cas extrêmes où l'ambiance est humide, l'évaporation requise ne peut plus être atteinte ($E_{vap} < E_{req}$). Dès que l'évaporation atteint l'évaporation maximale ($E_{vap} = E_{max}$), la mouillure est égale à 1 :

$$E_{vap} = E_{max} < E_{req} \quad \omega = \frac{E_{vap}}{E_{max}} = 1$$

La quantité d'eau suée (m_{sw}) ne peut plus être évaporée ($m_{sw} > m_{ev}$) et coule à la surface de la peau ; on définit m_{drip} la quantité d'eau qui coule :

$$m_{drip} = m_{sw} - m_{ev}$$

Le corps possède quelques millions de glandes sudoripares, mais elles ne sont pas réparties uniformément. On considère que la surface pouvant transpirer est égale à 92 % de A_{DU} [6] Le tronc par exemple, transpire beaucoup plus que les bras. Le débit m_{sw} n'est donc pas le même sur tout le corps.

D'autre part, les coefficients d'évaporation ne sont pas uniformes ; l'évaporation maximale (E_{max}) varie selon les endroits. Le seuil, $\omega = 1$, donc $m_{sw} = m_{ev} = E_{max}/L_v$ n'est pas atteint simultanément sur tout le corps ; on peut donc observer un ruissellement local pour une mouillure moyenne cutanée inférieure à 1. On définit alors le rendement évaporatoire η_{sw} , qui est le rapport entre les quantités d'eau évaporée et suée [14,15] :

$$\eta_{sw} = \frac{m_{ev}}{m_{sw}} = \frac{E_{vap}}{L_v m_{sw}}$$

Le rendement est exprimé en fonction de la mouillure cutanée moyenne. La Figure I.8 donne quelques expressions selon divers auteurs.

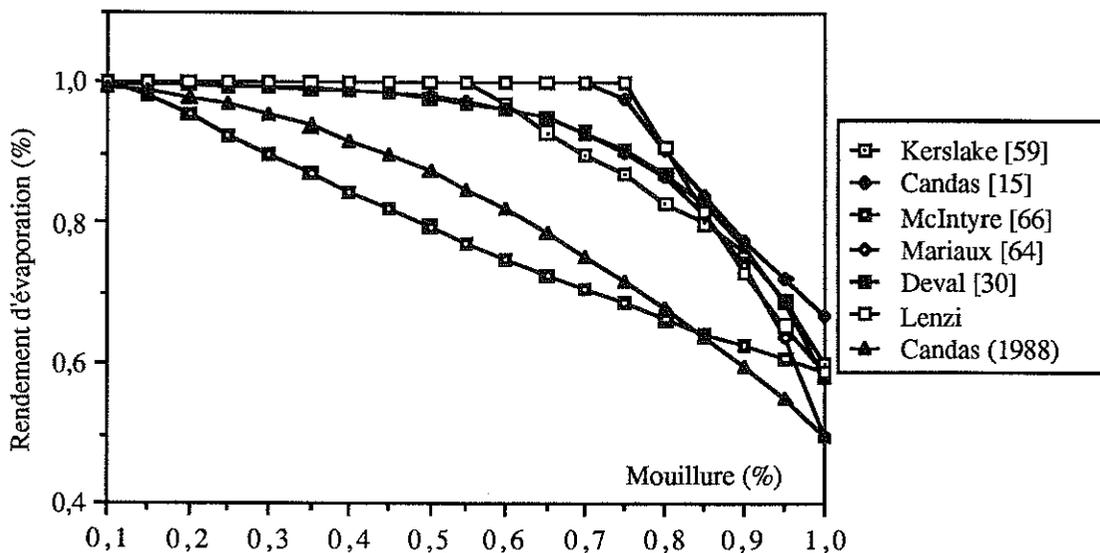


Figure I.8 - Rendement évaporatoire en fonction de la mouillure cutanée totale

Pour résumer, l'évaporation cutanée E est la somme de l'évaporation diffuse E_{diff} et de l'évaporation de la sueur E_{sw} . L'évaporation diffuse n'a lieu que sur les surfaces non mouillées. On peut alors écrire :

$$E_{\text{vap}} = E_{\text{diff}} + E_{\text{sw}} = 0,06 (1 - \omega) E_{\text{max}} + \omega E_{\text{max}} = \omega_e E_{\text{max}}$$

ω_e : mouillure effective.

D'autres facteurs interviennent dans l'évaporation, comme l'hydromeiose, qui est la réabsorption partielle de l'eau par la surface cutanée. Il en résulte un phénomène purement mécanique d'obturation des canaux des glandes sudorales ; la sueur ne peut plus être excrétée. Ceci entraîne une baisse de la mouillure et une augmentation du rendement évaporatoire. Il y a alors réduction du ruissellement et diminution des risques de déshydratation.

Il peut aussi y avoir transpiration émotionnelle, qui est forte, mais locale et de courte durée. On peut donc schématiser l'évaporation comme l'indique la Figure I.9.

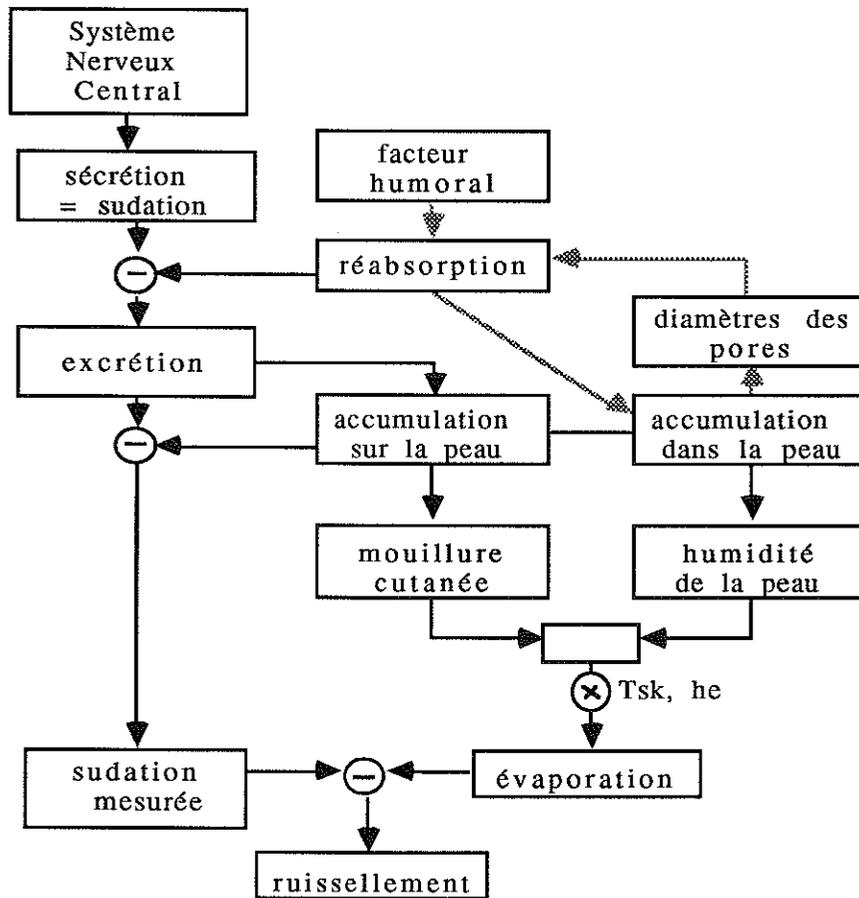


Figure I.9 - Schématisation des mécanismes de sudation [14]

Le débit d'eau suée est limité à environ 400 g/h au repos et 700 g/h pour une forte activité pour une personne non acclimatée. Mais l'acclimatement joue un rôle important [67]. Le débit peut atteindre 700 g/h au repos et 1000 g/h lors d'une activité. La mouillure est alors mieux répartie et le rendement évaporatoire est plus élevé.

f) Influence des vêtements

Le but essentiel des vêtements est de modifier les échanges thermo-hygrométriques entre la surface cutanée et le milieu environnant en créant un micro-climat sous-vestimental.

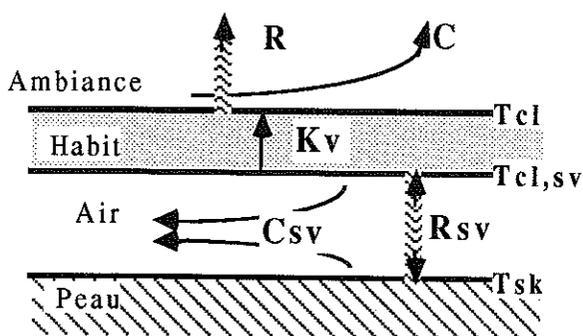
Les transferts d'eau et de chaleur à travers le vêtement sont des phénomènes couplés, donc très complexes à étudier. Il est impossible de traiter le problème dans son ensemble. Transfert de masse et de chaleur seront donc traités séparément. Ils sont traités généralement en régime permanent ; nous ferons de même. L'influence du régime dynamique sera abordée plus loin.

Les habits accroissent la surface d'échange ; comme tous les calculs se font par mètre carré de surface cutanée, on définit un facteur f_{cl} qui est le rapport entre la surface des vêtements et l'Aire de Dubois : f_{cl} est égal à 1 pour un sujet nu et supérieur à 1 pour un sujet habillé.

* *Transferts en régime permanent*

- *Transfert de chaleur*

En présence de vêtements, les échanges avec le milieu extérieur se font à leur surface, qui est à une température T_{cl} . Les transferts de chaleur sensibles se font par convection, rayonnement, entre la peau et la sous-face des habits, puis par conduction à travers le tissu, comme l'indique la Figure I.10.



C, R = convection et rayonnement dans le milieu extérieur

C_{sv} , R_{sv} = convection et rayonnement du domaine sous-vestimental

K_v = conduction à travers les habits

T_{cl} = température de surface des habits

$T_{cl,sv}$ = température de sous-face des habits

Figure I.10 - Transfert de chaleur en présence de vêtements

La convection naturelle sous-vestimentale est difficile à analyser ; elle est fonction de la différence de température entre la peau et les tissus. La posture a une influence : une réduction de 10 à 20 % des échanges est observée pour la position assise par rapport à la position debout.

La convection forcée sous-vestimentale, ou effet de pompage [109], a lieu lors d'une activité physique : une partie de l'air passe par les ouvertures (col, manches), l'autre à travers le tissu lui-même. Ainsi, la marche ou le pédalage réduisent l'isolement d'un vêtement de 30 à 50 %. On peut noter que cette augmentation des pertes peut avoir un effet positif, car la quantité de chaleur produite a augmenté.

Les estimations sur la convection sous-vestimentale sont difficiles à faire ; les équations existantes sont purement empiriques et dépendent beaucoup du protocole expérimental (coupe des vêtements, activités, etc.).

Le plus souvent, dans les calculs, seule la conduction est prise en compte. On peut schématiser ces échanges par analogie électrique, comme l'indique la Figure I.11.

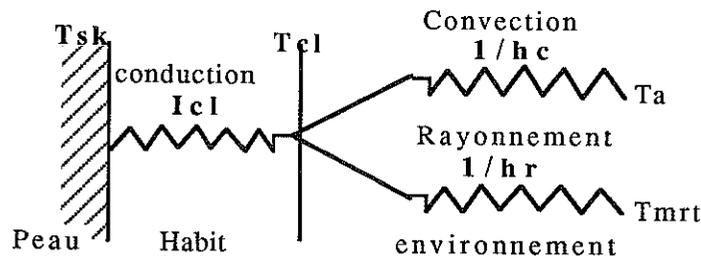


Figure I.11 - Schématisation des échanges de chaleur sensible

$$(1) \quad R + C = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{I_{cl}} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) + f_{cl} h_r (T_{cl} - T_{mrt})$$

I_{cl} , la résistance thermique des habits, est en général exprimée en clo (1 clo = 0,155 m²°C/W) ; elle est estimée par référence à des valeurs déterminées pour des vêtements standard (voir tableau ci-après).

Tenue vestimentaire	m ² °C/W	Clo
Nu	0	0
Short	0,015	0,1
Tenue tropicale type Slip, short, chemise manches courtes, chaussettes légères, chaussures	0,047	0,3
Tenue d'été légère Slip, pantalon léger, chemise manches courtes, chaussettes légères, chaussures	0,078	0,5
Tenue de travail légère Sous-vêtements légers, chemise manches longues, pantalon de travail, chaussettes en laine, chaussures	0,124	0,7
Tenue d'intérieure pour l'hiver Sous-vêtements, chemise manches longues, pantalon, pull-over manches longues, chaussettes épaisses, chaussures	0,155	1,0
Tenue de ville européenne traditionnelle Sous-vêtements coton manches et jambes longues, chemise, complet avec pantalon, gilet, veste, chaussettes en laine, grosses chaussures	0,233	1,5

Tableau I.4 - Exemple de valeurs de I_{cl} pour différentes tenues vestimentaires [33]

D'après l'équation (1), on obtient :

$$T_{cl} = \frac{T_{sk} + f_{cl}(h_c T_a + h_r T_{mrt}) I_{cl}}{1 + f_{cl}(h_c + h_r) I_{cl}}$$

En l'absence de vêtement, $I_{cl} = 0$ et on obtient $T_{cl} = T_{sk}$; inversement, si on suppose un vêtement très isolant, $I_{cl} \rightarrow \infty$; on a alors $T_{cl} \rightarrow (h_c T_a + h_r T_{mrt}) / (h_c + h_r)$, qui est la température opérative (voir paragraphe I.4.1), qui est la température équivalente caractéristique de l'ambiance.

Si on remplace l'expression de T_{cl} dans l'équation (1), on obtient :

$$R + C = \frac{f_{cl}}{1 + f_{cl}(h_c + h_r) I_{cl}} (h_c(T_{sk} - T_a) + h_r(T_{sk} - T_{mrt}))$$

$$R + C = f_{cl}(R_0 + C_0)$$

$F_{cl} = \frac{1}{(1 + f_{cl}(h_c + h_r) I_{cl})}$: facteur de réduction des échanges sensibles ou coefficient de Burton [78] (= 1 pour un individu nu),

$(R_0 + C_0)$: échanges sensibles en l'absence de vêtement,

F_{cl} est souvent noté $F_{cl} = I_a / (I_a + I_{cl})$, où $I_a = 1 / (f_{cl}(h_c + h_r))$ est l'isolation de surface due à l'air et I_{cl} l'isolation intrinsèque du vêtement.

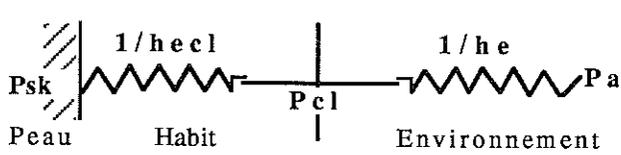
I_{cl} et F_{cl} sont tous deux utilisés dans la littérature, selon les auteurs. Toutefois, l'utilisation de I_{cl} est préférable, car elle ne fait appel qu'aux propriétés du vêtement, contrairement à F_{cl} qui fait intervenir les conditions ambiantes par l'intermédiaire de h_c et h_r .

$$f_{cl} = 1 + k I_{clo} \quad (I_{clo} \text{ exprimée en clo})$$

k varie entre 0,1 et 0,35 ; il est déterminé expérimentalement en même temps que I_{cl} [65].

- Transfert de masse

On peut schématiser les transferts de masse à travers le vêtement de la manière suivante, par analogie avec les transferts de chaleur [79].



P_{sk} , P_{cl} , P_a : pression de vapeur à la surface de la peau, des habits et dans l'air
 h_e : coefficient évaporatoire dans l'air
 $1/h_{ecl}$: résistance évaporatoire des vêtements

Figure I.12 - Schématisation des transferts de masse

On fait l'hypothèse que l'évaporation a lieu à la surface de la peau, puis que des transferts de vapeur ont lieu à travers les vêtements. La présence des habits modifie l'évaporation maximum qui devient alors :

$$E_{\max} = h_{ecl}(P_{sk} - P_{cl}) = f_{cl} h_e(P_{cl} - P_a)$$

ou encore :

$$E_{\max} = \frac{h_{ecl} f_{cl}}{h_{ecl} + f_{cl} h_e} (h_e(P_{sk} - P_a)) = F_{pcl} f_{cl} h_e(P_{sk} - P_a)$$

$h_e(P_{sk} - P_a)$: échanges de chaleur latente en l'absence d'habits

F_{pcl} : facteur de réduction des échanges latents (il vaut 1 pour une personne nue)

$$F_{pcl} = \frac{h_{ecl}}{h_{ecl} + f_{cl} h_e} = \frac{1}{1 + f_{cl} h_e I_{ecl}} = \frac{I_{ea}}{I_{ea} + I_{ecl}}$$

avec : $I_{ea} = 1/(f_{cl} h_e)$ et $I_{ecl} = 1/h_{ecl}$.

Les coefficients h_e et h_c sont liés par la relation de Lewis (cf. paragraphe I.1.3e).

Loten's définit i_L comme étant le taux de perméabilité [88] :

$$i_L = \frac{h_{ecl}}{L_w h_{cl}} = \frac{I_{cl}}{L_w I_{ecl}} \quad \text{d'où : } I_{ecl} = \frac{I_{cl}}{L_w i_L}$$

L'équation (2) devient :

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + f_{cl} L_w h_c \frac{I_{cl}}{L_w i_L}} = \frac{1}{1 + f_{cl} h_c \frac{I_{cl}}{i_L}}$$

En général i_L est compris entre 0,3 et 0,6. Il vaut 1 pour une personne nue ; pour la plupart des vêtements, $i_L = 0,5$ [6].

* Transferts en régime dynamique

Nous supposons toujours que transfert de masse et de chaleur sont indépendants.

- Transfert de chaleur

En raison de la faible épaisseur des tissus, les temps de réponse sont extrêmement courts. On peut supposer que l'on est proche de l'état stationnaire.

- Transfert de masse

Le comportement des habits vis-à-vis de la vapeur d'eau est complexe, car ils n'agissent pas uniquement comme une résistance à l'évaporation. En régime transitoire, l'absorption ou la désorption de la vapeur joue un rôle important dans l'équilibre thermique d'un sujet vêtu.

Lors d'une augmentation de pression de vapeur d'eau venant soit de l'extérieur (changement d'humidité relative de l'air), soit de l'intérieur (augmentation de production de sueur), le tissu absorbe une certaine quantité d'eau, qui s'évapore par la suite.

La capacité de fixer la vapeur d'eau est caractérisée par le taux de reprise. La courbe de la Figure I.13 montre la variation de la reprise en fonction de l'humidité relative. On peut constater que la nature des fibres intervient si la quantité d'eau absorbée est importante et que l'humidité de l'air baisse brusquement ; il peut y avoir un déséquilibre du bilan thermique dû à l'évaporation et la désorption de l'eau à la surface des vêtements. Inversement, si l'humidité augmente, il y a absorption et condensation d'où apport de chaleur. Les résultats d'expériences effectuées sur un cylindre habillé avec de la laine montrent (Figure I.14) la variation des échanges de chaleur pour une augmentation de l'humidité relative de 50 à 80 %.

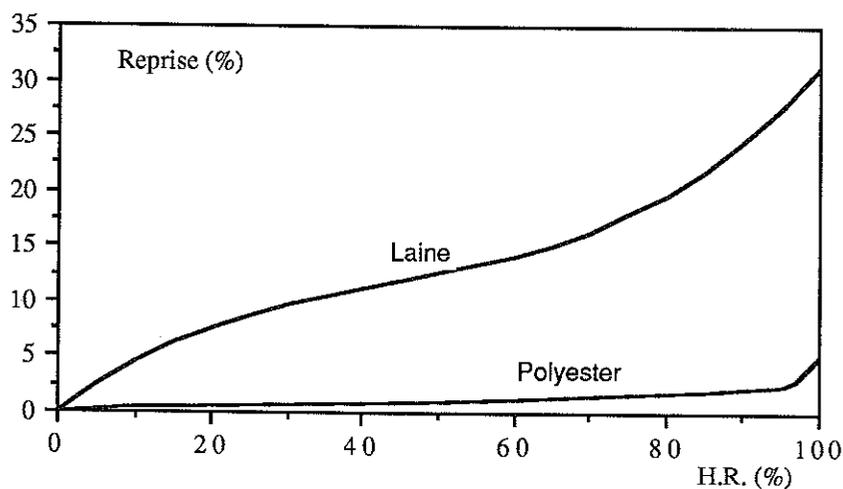


Figure I.13 - Variation du taux de reprise en fonction de l'humidité relative, pour la laine et le polyester [70]

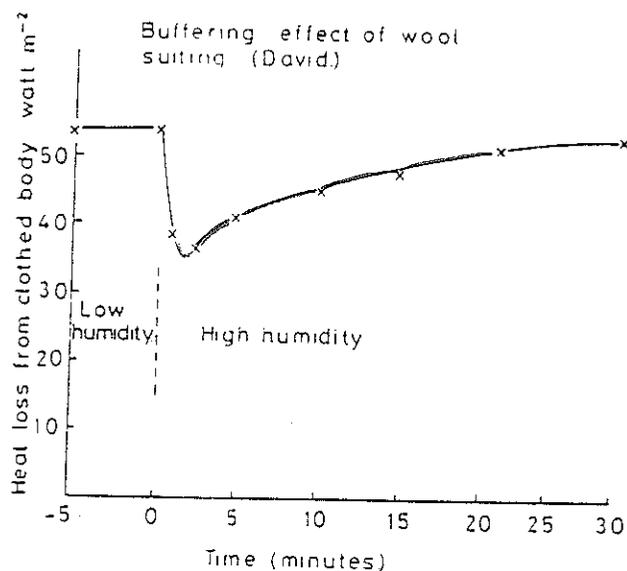


Figure I.14 - Variations du flux de chaleur perdu par le corps, en présence de vêtements pour une augmentation de HR de 50 à 80 %

En conclusion, les trois grandeurs caractérisant le vêtement sont :

- La résistance thermique, qui limite les échanges sensibles. La nature des fibres qui composent le tissu ne semble pas avoir une grande importance ; par contre, la morphologie des fibres et leur assemblage déterminent le volume d'air emmagasiné dans le tissu. L'isolation d'un tissu dépend de sa densité et de son épaisseur. L'isolation d'un vêtement est fonction de sa coupe et du tissu qui le compose, car elle est liée aux couches d'air comprises entre la peau et les diverses couches d'habits.

- La perméabilité à la vapeur d'eau, qui modifie les échanges par évaporation ; elle joue un rôle important sur les échanges de chaleur latente, donc dans les climats chauds.

- Le taux de reprise, qui est la faculté d'un tissu à emmagasiner de l'eau. Il joue un rôle prépondérant lors des variations d'humidité ambiante.

I.1.4 . La thermorégulation

a) Généralités

La thermorégulation est le terme général qui regroupe les réactions physiologiques inconscientes que l'organisme met en jeu pour maintenir l'homéothermie. La Figure I.15 donne la gamme de températures internes physiologiquement acceptables.

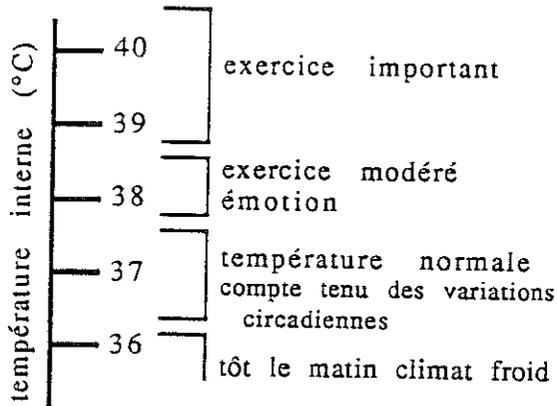


Figure I.15 - Gamme de températures internes [50]

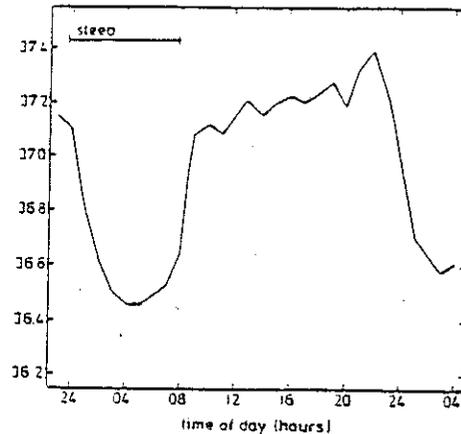


Figure I.16 - Variations circadiennes de la température interne [54]

Le corps possède un système de régulation pour faire face aux contraintes thermiques intérieures (variation d'activités) ou extérieures (variations de climats) et conserver sa température interne autour de 37°C. La température interne est généralement mesurée en trois sites [45] :

- la température rectale (T_{re}) est la plus élevée et la plus inerte ; elle est très liée au métabolisme [10],
- la température œsophagienne est la plus représentative, car elle est proche de la température moyenne du sang,
- la température tympanique (T_{ty}) est proche de celle de l'hypothalamus, qui joue un rôle important dans la régulation.

Il y a trois mécanismes régulateurs :

- la sudation, qui augmente la production d'eau au niveau de la peau et, donc, les pertes thermiques par évaporation,
- les frissons, qui augmentent la production de chaleur métabolique, par contractions musculaires
- la vasomotricité, qui modifie le débit sanguin et agit donc sur les échanges internes de chaleur.

Le débit sanguin cutané au repos est de 6 l/h.m^2 et le coefficient d'échange d'environ $12 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Quand un individu a froid, la vasoconstriction provoque une diminution du diamètre des vaisseaux sanguins, donc une réduction du débit et des échanges thermiques. Le coefficient d'échange peut diminuer jusqu'à $6 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Inversement, quand un individu a chaud, il y a vasodilatation, augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins et du débit ; le coefficient d'échange est alors $120 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Les trois mécanismes régulateurs fonctionnent sur le même principe de déclenchement et de répartition [55] ; le mieux connu est la sudation, qui est plus facile à étudier, car son effet est externe.

Les réactions au chaud sont : vasodilatation et sudation.

Les réactions au froid sont : vasoconstriction et frisson.

L'homme possède un système nerveux central situé plus particulièrement dans l'hypothalamus. Il intègre les informations venant des détecteurs centraux et périphériques et élabore une commande en retour.

Des études neuro-physiologiques ont démontré l'existence de deux types de thermorécepteurs : les uns répondent au chaud, les autres au froid. Les détecteurs chauds sont sensibles à des élévations de température de $0,001\text{°C/s}$ ($3,6\text{°C/h}$), les froids sont sensibles à une baisse de $0,004\text{°C/s}$ (14°C/h).

Il y a beaucoup de controverse dans la littérature sur le mode de fonctionnement des régulateurs [17,51,57,96,100] : les récepteurs sont-ils sensibles à une température (T) ou à sa variation dans le temps (dT/dt) ? Le contrôle se fait-il de manière centrale ou locale ?

L'hypothèse la plus généralement admise est que le thermostat est central et qu'il agit comme un comparateur qui établit la différence entre les températures instantanées et leurs valeurs de consigne, puis envoie dans les différentes parties du corps une commande proportionnelle à l'écart, dont le but est de déclencher les réactions physiologiques adéquates.

De nombreuses études ont été réalisées sur les températures de consigne [71,72], afin de déterminer si leur valeur est unique et fixe ou si elles varient en fonction du temps, de l'exercice ou du type de réaction.

On peut représenter de façon schématique (Figure I.17) l'amplitude du signal en fonction de la température moyenne du corps [9].

Si on note T_{setc} la température au-dessus de laquelle les réactions de lutte contre le chaud apparaissent et T_{setf} celle au-dessous de laquelle il y a lutte contre le froid, trois cas de figure se présentent ; ils semblent assez différents, mais, expérimentalement, cette zone où les réactions sont minimales n'est pas facile à étudier. Dans la plupart des cas, on considère que le contrôle se fait de la façon n°2.

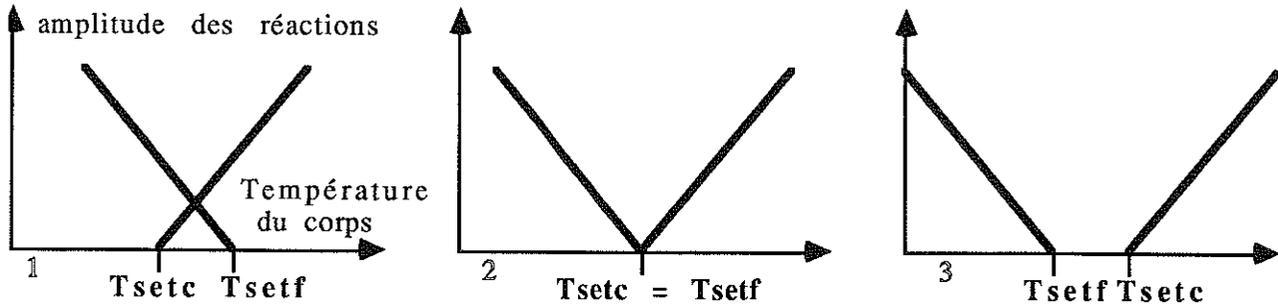


Figure I.17 - Trois cas possibles de réactions physiologiques en fonction de la température du corps

Les températures corporelles intervenant dans la régulation sont les températures cutanées et la température interne, qui joue un rôle 6 à 10 fois plus important. Pour certains auteurs, le produit des écarts intervient aussi. L'estimateur ζ permettant de prédire le sens de fonctionnement du régulateur a pour expression générale :

$$\zeta = \alpha(T_{int} - T_{set,int}) + \beta(T_{sk} - T_{set,sk}) + \gamma(T_{sk} - T_{set,sk})(T_{int} - T_{set,int})$$

α , β et γ sont des constantes,

T_{int} , T_{sk} sont les températures interne et moyenne cutanée

$T_{set,int}$, $T_{set,sk}$ sont leurs températures de consignes respectives.

Si ζ est positif, c'est donc que le corps s'échauffe ; il met alors en œuvre des mécanismes de lutte contre le chaud et inversement pour le froid. En fonction de l'amplitude et du signe ζ , le système de régulation envoie des commandes aux divers effecteurs, dans les diverses parties du corps, où un effet local peut intervenir. On peut schématiser le système de régulation comme l'indique la Figure I.18.

On peut faire une analogie entre la régulation du corps et celle conçue pour climatiser une pièce ; les récepteurs cutanés correspondent aux sondes extérieures et les récepteurs internes à la sonde intérieure du local, où la température doit être maintenue constante. Les récepteurs extérieurs permettent de détecter toute évolution, afin de réagir avant que la perturbation atteigne l'intérieur.

Les réactions de thermorégulation sont qualitativement semblables d'un sujet à l'autre, mais l'amplitude et les températures de consigne varient. De nombreuses différences inter-individuelles apparaissent ; les liaisons entre les causes et les effets sont souvent difficiles à établir [15,16].

Les principaux facteurs influençant la régulation sont :

- le sexe : le cycle hormonal chez la femme semble être un facteur important ;
- la morphologie : à la base du rapport entre production de chaleur et surface d'échange ;
- l'âge : il produit des variations de métabolisme et de morphologie ;
- l'acclimatement : c'est l'ajustement des réactions qu'un individu met en jeu lorsqu'il est exposé régulièrement à des conditions extrêmes ; les effets de l'acclimatement sont multiples, comme l'indique la Figure I.19 (baisse de la température rectale, augmentation de la quantité d'eau produite, mais avec une meilleure répartition sur la peau).

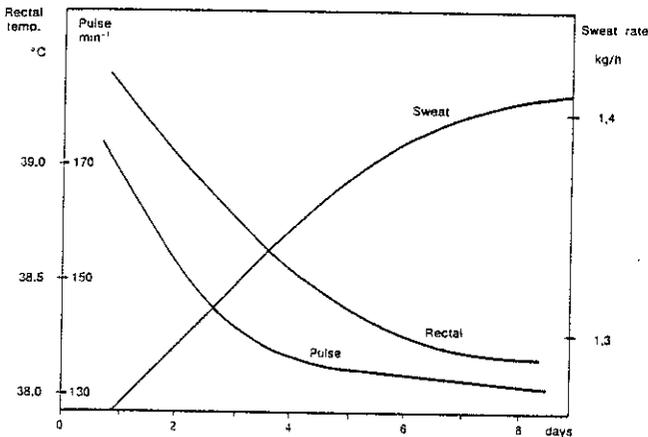


Figure I.19 - Effet de l'acclimatement

b) Réaction au froid

Un refroidissement du corps est, en général, lié à de trop fortes déperditions de chaleur vers l'extérieur. Dans un premier temps, la vasoconstriction des vaisseaux sanguins périphériques réduit les transports de chaleur vers la peau ; la température cutanée baisse, d'où diminution des pertes sensibles. Puis les frissons musculaires interviennent ; ils sont dus à des contractions musculaires involontaires et non coordonnées de la plupart des muscles du corps. L'énergie dégagée peut atteindre 5 fois le métabolisme basal.

Un autre mécanisme peut intervenir : c'est la production de chaleur métabolique supplémentaire due à une augmentation des réactions chimiques dans les muscles. Ceci n'apparaît que chez les personnes acclimatées au froid depuis plus de trois semaines et chez les nouveaux-nés.

Si la température interne baisse jusqu'à 35°C, il n'y a pas de danger, mais l'attention et la dextérité diminuent. A partir de 33°C, les frissons s'arrêtent, le corps est en hypothermie ; il y a alors apparition de crampes, d'irritabilité, de baisse de la volonté. Le seuil mortel est d'environ 30°C.

c) Réaction au chaud

Un bilan thermique [53] positif est dû à une augmentation de l'activité physique ou de la température ambiante. L'organisme augmente les transports de chaleur vers la périphérie par vasodilatation des vaisseaux sanguins, ce qui entraîne une élévation de la température cutanée et facilite les échanges sensibles. Ce mécanisme n'est efficace que si la température de l'air est inférieure à celle de la peau. Dans le cas inverse, le seul moyen d'évacuer de la chaleur est le déclenchement de la sudation.

Si la chaleur dissipée n'est pas suffisante pour équilibrer le bilan thermique, il y a alors emballement thermique ; le seuil mortel de la température interne est de 43°C.

Les risques de désordres physiologiques liés à la chaleur sont nombreux ; les principaux sont :

- le coup de chaleur ou hyperthermie, lié à une forte augmentation de la température interne ; à partir de 41°C, il produit des lésions irréversibles, surtout dans le cerveau et les reins ; il peut y avoir un arrêt brutal de la thermorégulation ;
- l'effondrement thermique, ou syncope, lié à une astreinte circulatoire trop importante qui provoque une baisse de la pression sanguine ;
- la déshydratation, liée à de trop fortes pertes hydriques ; les pertes en eau ne doivent pas dépasser 1,5 % du poids du corps ; à partir de 4 %, il apparaît une grande fatigue, à 6 % l'épuisement, à 12 % la réhydratation devient difficile ; 15 % est le seuil mortel (la déshydratation est souvent liée au climat chaud et sec, où l'individu peut équilibrer son bilan thermique au prix d'une forte évaporation, qui n'est pas perçue, car la peau reste sèche) ;
- le déficit sodique provoque un épuisement dû à une forte perte en sels minéraux ; il a les mêmes causes que la déshydratation, mais apparaît si les sujets compensent l'évaporation en buvant de l'eau non salée ;
- une affection des glandes sudorales, qui peut arriver après une exposition trop longue à la chaleur ou une maladie : les glandes sudorales s'arrêtent de produire et l'individu n'a alors plus aucun moyen de lutter contre la chaleur.

I.1.5 . La surface cutanée

La peau est l'interface où se produisent les échanges thermiques entre l'organisme et le milieu ambiant. Son aspect est fonction du sexe, de la race et de la morphologie de chaque individu. Son état (température, mouillure) est lié aux contraintes thermiques intérieures et extérieures et aux contraintes physiologiques qu'elles entraînent.

Les températures cutanées peuvent varier dans une gamme beaucoup plus étendue que la température centrale. La température cutanée moyenne au repos varie entre 33°C et 34°C. Les seuils de douleur inférieur et supérieur se trouvent respectivement à 17°C et 43°C. Entre ces valeurs, les durées de tolérance diminuent lorsqu'on s'éloigne de part et d'autre de la valeur optimale de 33°C.

La mesure des températures cutanées se fait par détecteurs de contact (thermocouples, thermistances) ou à distance (détecteurs infra-rouge).

La peau n'est pas à température uniforme, car chaque localisation du corps a des coefficients d'échanges de chaleur internes et externes différents. Pour calculer les échanges de façon globale, on définit une température cutanée moyenne T_{sk} , qui est une moyenne pondérée des diverses températures locales.

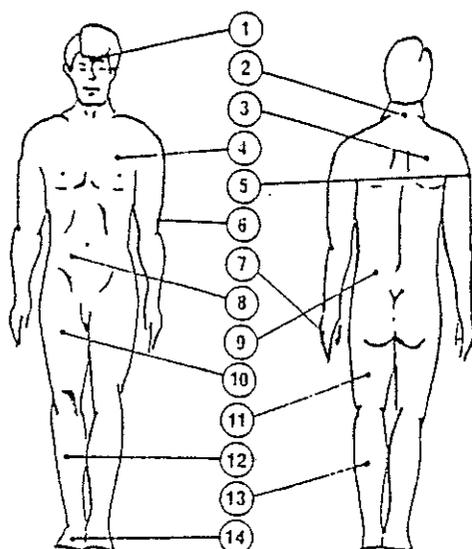
Le nombre de points de mesure et les coefficients de pondérations α_i permettant de calculer T_{sk} varient selon les auteurs. Le Tableau I.5 donne quelques exemples ; la Figure I.20 indique les numéros des températures [84] locales utilisées dans le tableau.

$$T_{sk} = \sum_i \alpha_i T_i \quad \text{avec : } \sum \alpha_i = 1$$

Auteurs	n ^{bre}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Fanger	14	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071	.071
Hardy & Dubois	12	.07	.088	.088		.14	.05	.088	.088	.095	.095	.065	.065	.07	
Nishi & Gagge	8	.07	.175	.175	.07	.07	.05			.19			.2		
Dubois & Hardy	7	.07				.14	.05	.35		.19		.13		.07	
Techner	6	.149		.186			.107		.186	.279	.093				
Ramanathan	4			.3	.3					.2		.2			
KSU	3			.5		.14							.36		

Tableau I.5 - Coefficients de pondération permettant de calculer la températures moyenne cutanée avec différentes températures cutanées locales [67]

La multitude d'expressions pose parfois des problèmes lors de la comparaison des résultats expérimentaux ; les extrémités (main 7, pied 14), présentent de fortes variations de température, mais ne sont pas toujours prises en compte dans le calcul de T_{sk} .



- 1 front
- 2 bas de l'occiput
- 3 omoplate droite
- 4 haut abdomen gauche
- 5 biceps haut droit
- 6 haut avant bras gauche
- 7 main gauche
- 8 bas abdomen droit
- 9 bas du dos gauche
- 10 cuisse avant droite
- 11 cuisse arrière gauche
- 12 tibia droit
- 13 mollet gauche
- 14 dessus pied droit

Figure I.20 - Localisation correspondant au tableau précédent

La Figure I.21 montre la répartition des températures d'un individu nu après une exposition de 1/2 heure à 11°C ; on constate que les écarts entre les divers endroits du corps peuvent être supérieurs à 5°C et que les zones les plus chaudes correspondent aux centres vitaux de l'organisme.

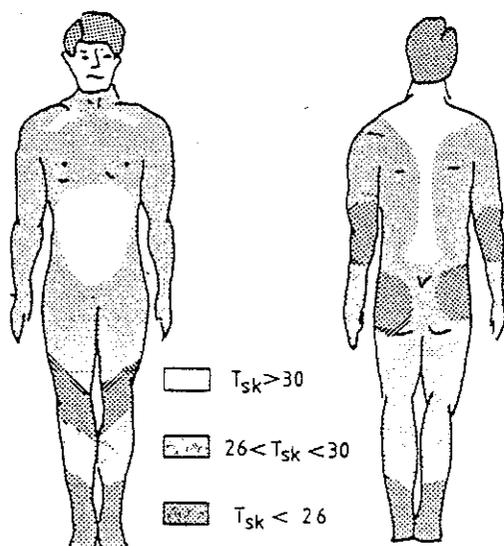


Figure I.21 - Répartition des températures cutanées d'une personne nue, après une exposition d'une demi-heure à 11°C, d'après Clark [66]

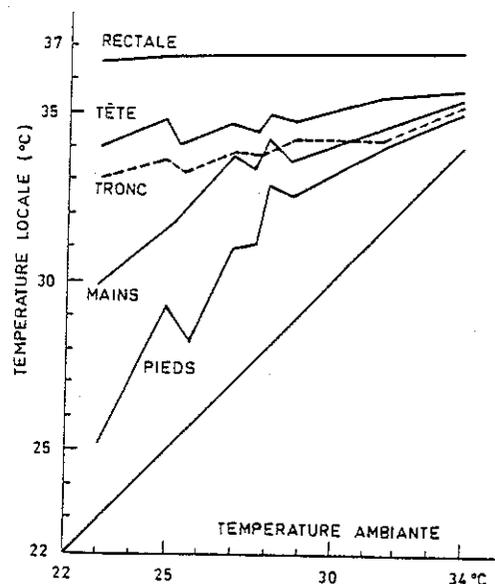


Figure I.22 - Températures cutanées locales d'une personne nue mesurées pour différentes températures ambiantes, d'après Hardy [82]

La Figure I.22 donne les variations de températures cutanées locales en fonction de la température ambiante. Toutes les parties du corps réagissent dans le même sens ; les différences de température entre les diverses localisations sont significatives au froid et diminuent considérablement au chaud.

I.2 . BILAN, EQUILIBRE, NEUTRALITE ET CONFORT

I.2.1 . Bilan thermique et équilibre thermique

Afin de conserver l'homéothermie, le corps humain doit dissiper dans le milieu environnant la totalité de la quantité de chaleur interne qu'il produit par métabolisme. La Figure I.23 schématise les différents modes d'échanges.

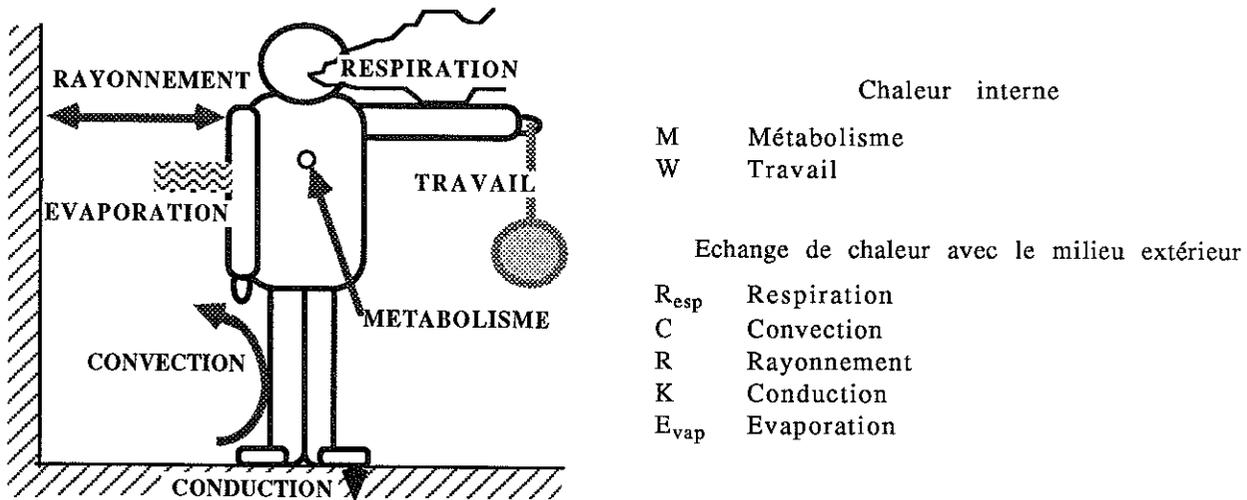


Figure I.23 - Schématisation des échanges de chaleur entre un sujet et l'ambiance

Si on note S la charge thermique ou bilan des quantités de chaleur :

$$S = (M - W) - (E_{vap} + R + C + K + R_{resp})$$

$S=0$: le corps est à l'équilibre thermique ;

$S < 0$: le corps se refroidit, les températures baissent ;

$S > 0$: le corps se réchauffe, les températures augmentent.

L'énergie interne (métabolisme) diminuée du travail externe (M-W), ou métabolisme net, est évacuée dans le milieu environnant par respiration (R_{resp}), et au niveau de la peau par rayonnement (R), convection (C), évaporation (E_{vap}) et conduction (K).

En régime permanent, il faut que le bilan thermique soit équilibré, c'est-à-dire que la charge thermique soit nulle.

$$S = 0 \quad \text{ou encore} \quad : M - W = E_{vap} + R + C + R_{resp}$$

Pour maintenir cet équilibre, le corps met en jeu les réactions physiologiques qui ont été décrites précédemment.

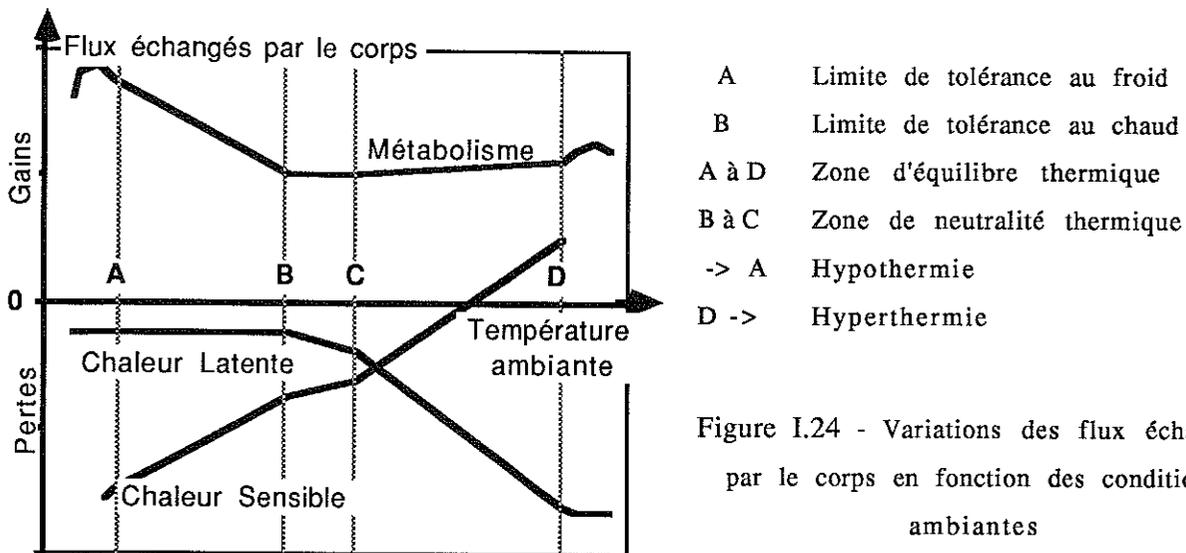
On parlera d'équilibre thermique lorsqu'un individu peut avoir un bilan thermique nul, en faisant intervenir des réactions de thermorégulation.

I.2.2 . Equilibre thermique et neutralité

Les ambiances dites de *neutralité thermophysiological* correspondent à un ensemble de conditions dans lesquelles le corps est à l'équilibre thermique, en régime permanent, sans mettre en jeu des phénomènes importants de régulation.

Plus on s'écarte de ces ambiances neutres, plus les réactions physiologiques s'accroissent ; le bilan thermique peut être équilibré pendant un temps d'autant plus court qu'on s'éloigne de la neutralité. Si les contraintes thermiques continuent d'augmenter, les astreintes physiologiques atteignent un maximum au-delà desquelles l'organisme ne peut plus faire face. Il y a en général effondrement du système de régulation ; l'homéothermie ne peut plus être maintenue : il faut alors faire intervenir la régulation comportementale.

On peut récapituler ces différentes zones sur la figure I.24 donnant les flux échangés par le corps en fonction de la température ambiante [19].



Jusqu'à A Zone d'hypothermie, les pertes dans le milieu ambiant sont trop importantes $S < 0$; le corps se refroidit.

de A à B Zone de réaction au froid ; l'équilibre peut être maintenu grâce aux frissons et à la vasoconstriction ; la température interne varie de 30 à 37 °C.

de B à C Zone de neutralité thermophysiological ; les réactions sont minimums.

de C à D Zone de réaction au chaud. L'équilibre peut être maintenu grâce à la sudation et à la vasodilatation ; la température interne varie de 37 à 40 °C.

Après D Zone d'hyperthermie ; trop d'apport de chaleur ; $S > 0$; le corps s'échauffe.

I.2.3 . Neutralité thermique et confort thermique

Une analyse physique peut permettre de déterminer objectivement les combinaisons des divers paramètres caractéristiques de l'ambiance et du sujet pour lesquelles un individu peut atteindre la neutralité thermique. Il est beaucoup plus difficile d'assurer son confort.

Le confort est une notion subjective ; c'est le jugement sur la qualité thermique d'une ambiance qui est liée à la sensation de neutralité, mais aussi aux conditions physiologiques et psychologiques dans lesquelles se trouve un sujet à un instant précis.

Le confort thermique est défini par Fanger comme "*l'état d'esprit qui exprime une satisfaction de son environnement ; le sujet ne peut pas dire s'il veut avoir plus chaud ou plus froid*" [33,34].

Le confort fait intervenir d'autres aspects que la physique et la physiologie. La psychologie et la sociologie jouent un rôle très important sur l'impression de confort. Toutes les expériences dans ce domaine sont effectuées à l'aide de questionnaires permettant de connaître la façon dont les sujets perçoivent leur environnement.

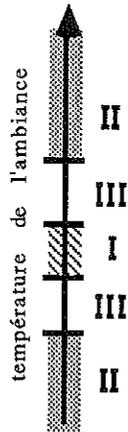
Les critères psychologiques sont les suivants:

- la thermoneutralité sensorielle : le sujet ne ressent ni le chaud, ni le froid;
- le confort déclaré : le sujet déclare l'agrément ;
- l'indécision : le sujet ne sait pas dire s'il souhaite avoir plus chaud ou plus froid ;
- la température préférée : le sujet choisit lui-même la température qu'il préfère.

Les échelles de réponses les plus répandues sont :

sensation thermique		échelle de Bedford		affective	
3	chaud	7	beaucoup trop chaud	7	très désagréable
2	tiède	6	trop chaud	6	désagréable
1	légèrement tiède	5	confortablement chaud	5	un peu désagréable
0	neutre	4	confortable	4	ni l'un ni l'autre
-1	légèrement frais	3	confortablement frais	3	juste agréable
-2	frais	2	trop frais	2	agréable
-3	froid	1	beaucoup trop frais	1	très agréable

Les limites entre le confort et l'inconfort ne sont pas nettes ; on peut schématiser 3 zones, comme l'indique la Figure I.25.



- La zone I de confort, où l'on peut espérer que la plupart des gens sera satisfaite de l'ambiance dans laquelle ils se trouvent.

- Les zones II d'inconfort généralisé chaud ou froid, où toutes les personnes seront inconfortables

- Les zones III, où une partie des gens sera satisfaite et l'autre non. Plus on s'approche de la zone I, plus le nombre de satisfaits augmente. On parle alors de confort dégradé ou amoindri.

Figure I.25 - Schématisation des zones de confort et d'inconfort

Une ambiance idéale pour tout le monde est difficile à déterminer ; par contre, "le confort n'est possible que si les mécanismes régulateurs sont assez faibles pour qu'on ne puisse les sentir". Il s'agit là de neutralité, qui est donc une condition nécessaire mais pas suffisante pour assurer le confort.

La sensation de confort global semble être liée à la température cutanée moyenne pour des ambiances froides et liée à la mouillure pour des ambiances chaudes.

Dans un cas extrême vu par Fanger, "les pieds dans le four, la tête au congélateur, le corps est à la neutralité globale". Il apparaît donc la notion d'inconfort local.

I.2.4 . Inconfort local

L'inconfort local est défini comme "un refroidissement ou un échauffement local d'une partie du corps et qui est ressenti désagréable".

De nombreuses études ont été faites sur les problèmes d'inconforts locaux [85,112, 29,32]. Les principales causes sont :

- asymétrie de rayonnement,
- courant d'air,
- plancher trop chaud,
- différence verticale de température d'air.

L'étude du confort ne doit donc pas s'arrêter à une analyse globale des échanges de chaleur, mais doit s'attacher aux phénomènes locaux qui peuvent intervenir. Dans l'habitat actuel, les températures moyennes et les conditions de confort global sont en général bien contrôlées, mais une grande partie des plaintes des occupants viennent d'inconforts locaux. En effet, il est rare qu'un habitat réel soit isotherme. Le manque de prise en compte des variations spatiales et temporelles aboutit souvent à des aberrations

et entraîne des interventions personnelles sur les modes de chauffage ou de climatisation qui peuvent s'avérer gênantes pour le fonctionnement d'une installation (obturation des bouches de soufflage d'air pour diminuer les courants d'air, réorganisation de l'espace pour s'éloigner des surfaces froides ou chaudes, etc.).

L'homme essaie par son comportement de créer un microclimat optimal, afin de s'approcher de la neutralité thermique ou plutôt du confort idéal. Cette recherche de conditions préférées se traduit par la modification de la couche de vêtement, de l'activité physique ou de la posture, qui agissent sur les échanges avec le milieu environnant. Elle se manifeste également par une modification de l'environnement lui-même, par création de l'habitat. C'est pourquoi il faut connaître de façon précise l'influence des divers paramètres caractérisant une ambiance, afin de pouvoir agir de manière optimale sur l'un ou plusieurs d'entre eux.

I.3. LES PARAMETRES DE L'AMBIANCE

I.3.1. Généralités

Dans un même local les personnes présentes ne peuvent pas être satisfaites toutes en même temps, compte tenu de leur différences inter-individuelles : on considère donc qu'il y a toujours un minimum de 5% d'insatisfaits.

Dans ce qui suit, chaque paramètre caractéristique de l'ambiance sera étudié ; les valeurs données pour le confort ou les limites d'inconfort proviennent d'études expérimentales et correspondent le plus souvent à 10% d'insatisfaits. Ce seuil est considéré par la plupart des auteurs comme la limite acceptable.

variables	T_a	T_{mrt}	P_a	V_a	M	W	I_{cl}		
éléments de bilan thermique	°C	°C	Pa	m/s	W/m ²	W/m ²	Clo	pertes	gains
Production de chaleur					*	*			*
Convection (C)	*			*	+		*	$T_{sk} > T_a$	$T_{sk} < T_a$
Rayonnement (R)		*					*	$T_{sk} > T_{mrt}$	$T_{sk} < T_{mrt}$
Respiration (R_{esp})	E_{res}		*		*			*	
	C_{res}	*			*			*	
Evaporation (E_{vap})	E_{diff}		*	*	+		*	*	
	E_{sw}		*	*	+		*	*	

Tableau I.6 - Influence des divers paramètres sur les échanges de chaleur

(* : influence directe ; + : influence indirecte)

Le Tableau I.6 est un récapitulatif de l'influence de chaque paramètre de l'ambiance et de l'individu sur les différents modes d'échanges de chaleur.

I.3.2 . Température de l'air

La température de l'air (T_a) est souvent utilisée comme seul paramètre pour définir ou réguler une ambiance thermique. Or, elle n'influence directement que les échanges convectifs cutanés et respiratoires.

On peut tout de même noter quelques valeurs à titre d'exemple : pour qu'un sujet nu au repos soit à la neutralité, il faut que T_a soit comprise entre 27 et 30°C, alors que s'il est habillé avec 1 clo, T_a peut être entre 22 et 24°C, [33,114].

Il faut aussi tenir compte du gradient vertical de température qui peut exister pour certains modes de chauffage [86,87,101]. Sur la Figure I.26, donnant le nombre d'insatisfaits en fonction de la différence verticale de température entre 0,1 et 1,1 m du sol, on peut remarquer qu'une différence supérieure à 3°C/m devra être évitée.

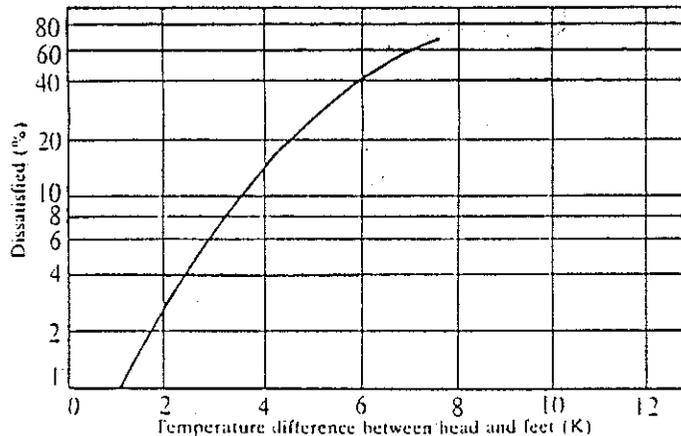


Figure I.26 - Pourcentage d'insatisfaits en fonction de la différence de température entre 0,1 m et 1,1 m du sol [82].

Le risque d'inconfort lié à des pieds froids est très fréquent, surtout pour des personnes assises. Par contre, si l'air est plus chaud au niveau des pieds qu'à la tête, un plus grand écart pourra être accepté.

Il est à noter qu'un air trop chaud entraîne une gêne respiratoire ; plus l'air est chaud, plus les gens se plaignent de manque de ventilation, même si, par ailleurs, ils ont une bonne impression de confort global.

Les effets dus à une baisse de température ou une augmentation de vitesse d'air sont ressentis de la même façon par un individu, car il y a augmentation de pertes convectives ; il est donc important de tenir compte de ce couplage, surtout pour des systèmes de chauffage par air pulsé.

I.3.3 . Vitesse de l'air

La vitesse d'air intervient dans les échanges cutanés pour la convection et l'évaporation. De nombreuses plaintes sont liées à des vitesses d'air trop élevées et aux courants d'air [36,38,76].

Le courant d'air est défini comme "un refroidissement indésirable, partiel, du corps causé par le mouvement de l'air".

Il n'est pas suffisant de connaître le débit d'air dans une pièce afin de calculer la vitesse moyenne ; il faut connaître les vitesses locales. En effet, une vitesse élevée pourra être tolérée sur le tronc vêtu, mais pas dans le cou ou sur les chevilles.

La vitesse d'air dans un local fluctue et n'est jamais constante. Les fluctuations par rapport à la vitesse moyenne ont une amplitude variable selon le mode de chauffage. La Figure I.27 donne la sensation de confort en fonction de la fréquence de ces fluctuations pour différentes vitesses moyennes d'air.

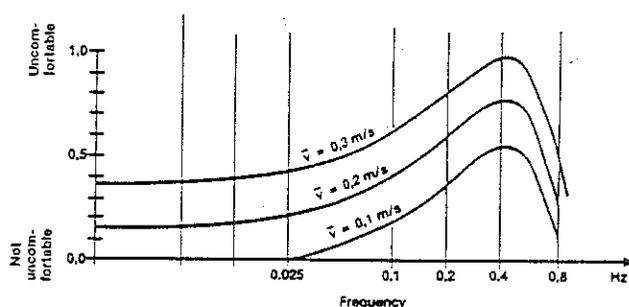


Figure I.27 - Sensation de confort en fonction de la fréquence [36].

On peut constater que seules les fréquences comprises entre 0,01 et 1 Hz ont une influence sur la réponse subjective. Les fréquences les plus "inconfortables" sont autour de 0,4 Hz. Dans la pratique, on a apparemment le plus souvent des fréquences autour de 0,1 Hz.

La température d'air joue un rôle important sur les limites acceptables de vitesse. Tant que la température d'air est inférieure à celle de la peau, un accroissement de la vitesse provoque une augmentation des pertes convectives et évaporatoires. Par contre, dès qu'elle devient supérieure, on a alors des apports par convection et des pertes par évaporation. Il faut trouver un compromis pour la vitesse d'air, afin que le bilan global évolue dans le sens désiré. Si l'humidité est faible en climat chaud, il est possible d'améliorer le confort en augmentant la vitesse ; par contre, si l'humidité est élevée, la seule solution sera le conditionnement d'air.

De façon générale, on peut déterminer (d'après la Figure I.28) que, pour des conditions d'hiver, la vitesse à ne pas dépasser est environ $V_a = 0,15$ m/s, alors qu'en été, on pourra aller jusqu'à 0,25 m/s.

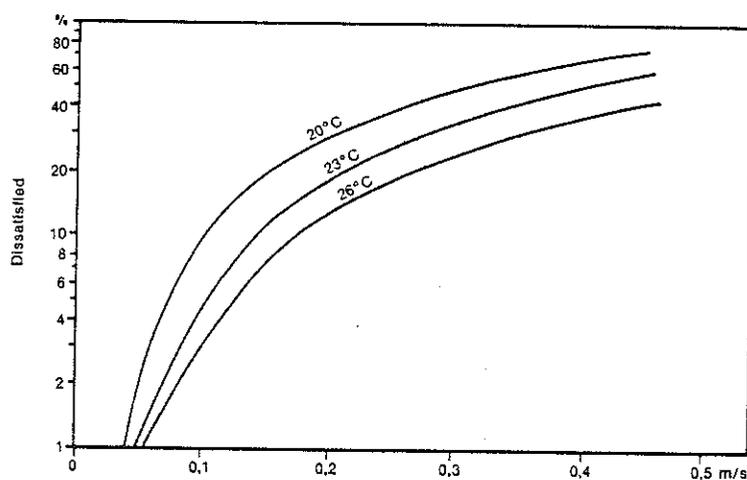


Figure I.28 - Nombre d'insatisfaits en fonction de la vitesse d'air et de diverses températures [36]

D'autre part, il faut noter que, pour ces limitations, on ne doit prendre en compte que les vitesses d'air dans la pièce. Les augmentations de vitesse, provoquées par le mouvement du sujet ne sont pas ressenties comme désagréables.

I.3.4 . Température des parois

a) Température de rayonnement

Les études réalisées sur le bilan thermique global du corps utilisent en général la température moyenne de rayonnement (T_{mrt}).

Or, cette valeur moyenne ne peut pas suffire à caractériser une ambiance [35,37,82], car il peut avoir la même T_{mrt} avec des parois à des températures très différentes. C'est pourquoi il faut définir l'asymétrie de température radiante (ΔT_{mrt}), qui est la différence entre les températures moyennes de rayonnement, vue par deux éléments plats regardant dans des directions opposées [10].

Les Figures I.29 et I.30 donnent le nombre d'insatisfaits en fonction de l'asymétrie de rayonnement. Une asymétrie horizontale causée par un plafond chaud doit être limitée à 5 K, car elle est beaucoup plus vite ressentie qu'une asymétrie verticale, limitée à 10 K. L'asymétrie causée par un plancher chaud n'est pas prise en compte, car, dans ce cas, la limitation vient de la température de surface du sol.

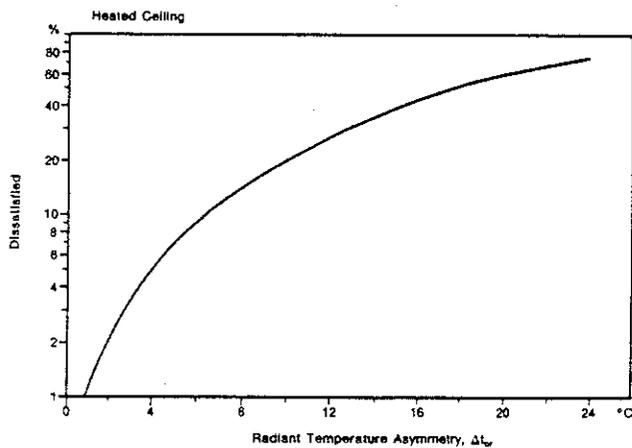


Figure I.29 - Pourcentage d'insatisfaits en fonction d'une asymétrie de rayonnement due à un plafond chaud

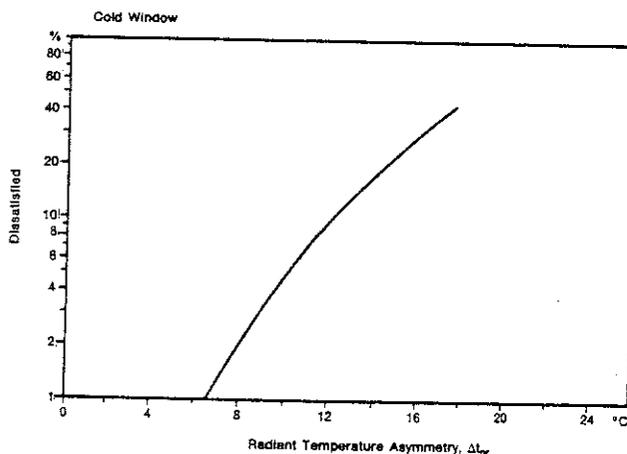


Figure I.30 - Pourcentage d'insatisfaits en fonction d'une asymétrie de rayonnement causée par une surface froide

L'asymétrie causée par un plafond froid a aussi été étudiée, mais les sujets semblent y être beaucoup moins sensibles. Si une surface froide ne peut être évitée, elle sera mieux tolérée à l'avant plutôt qu'à l'arrière du sujet.

Une baisse de température moyenne de rayonnement peut être compensée par une augmentation de température d'air. Par contre, une asymétrie ne peut pas être compensée ; il faudra donc être particulièrement vigilant au positionnement d'éléments chauffant par rapport aux surfaces froides.

En hiver, une fenêtre avec simple vitrage peut atteindre 7°C de température de surface si le reste de la pièce est à 20°C : l'asymétrie sera trop forte. Or, ce cas est souvent rencontré.

b) Température du sol

Les échanges conductifs sont souvent négligés dans le bilan thermique global du corps, mais des inconforts locaux peuvent apparaître, dus au contact direct entre les pieds et le sol.

Plusieurs études ont été réalisées pour déterminer les limites acceptables. Lors de l'apparition des premiers planchers chauffants, beaucoup de gens se sont plaints de températures de sol trop élevées. Pour des personnes ayant les pieds nus, la limite acceptable dépend du matériau de revêtement. Si le coefficient de contact est faible, on pourra supporter une plage de température plus étendue (voir Tableau I.7)

Matériaux de revêtements	Température optimale pour une occupation de		gamme de température acceptable (°C)
	1 min (°C)	10 min (°C)	
Textiles	21	24,5	21 - 28
Liège	24	26	23 - 28
Sol en pin	25	26	22,5 - 28
Sol en chêne	26	26	24,5 - 28
Linoléum sur du béton	28	27	25,5 - 28
Linoléum sur du bois	28	26	24 - 28
Béton	28,5	27	26 - 28,5
Marbre	30	29	28 - 29,5

Tableau I.7 - Température de sol "confortable" pour des personnes "pieds nus"[82]

Pour une personne portant des chaussures, le revêtement n'intervient pas : la température optimum est de 25°C pour quelqu'un de sédentaire et 23°C pour une personne debout ou marchant.

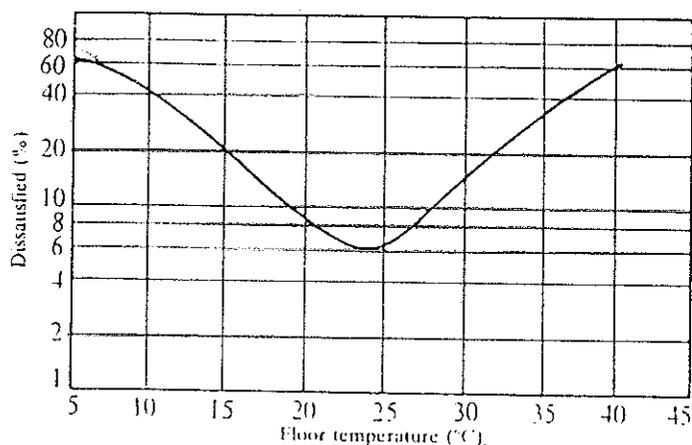


Figure I-31 - Pourcentage d'insatisfaits portant des chaussures légères en fonction de la température du sol

Les limites à ne pas dépasser sont respectivement 22-30°C pour un sujet sédentaire, 20-28°C pour un sujet se déplaçant. Les limites données dans la plupart des recommandations du bâtiment sont fixées à 19°C et 26°C ; la limite supérieure est apparemment liée à des raisons pathologiques.

I.3.5 . Humidité relative

L'humidité intervient dans les échanges évaporatoires cutanés et respiratoires.

Dans les climats tempérés, la pression de vapeur est basse et varie peu. L'évaporation requise à l'équilibre du bilan thermique du corps est toujours possible. Par contre, une variation brusque d'humidité peut être ressentie. Si l'air devient plus sec, il y aura une augmentation de l'évaporation ; le sujet aura légèrement plus froid et l'attribuera plutôt à une baisse de température ou une augmentation de vitesse.

La teneur en eau intervient dans les régimes transitoires. Cela est dû à l'absorption d'eau par les habits. En effet, la présence d'eau dans les fibres de tissu diminuerait la résistance thermique ; peu de travaux existent actuellement dans ce domaine.

Dans les climats chauds, l'humidité joue un rôle prépondérant, car, le plus souvent, l'évaporation reste le seul moyen d'évacuer la chaleur. On peut alors tracer une courbe donnant l'évolution des pertes latentes en fonction de la température pour deux valeurs de l'humidité relative.

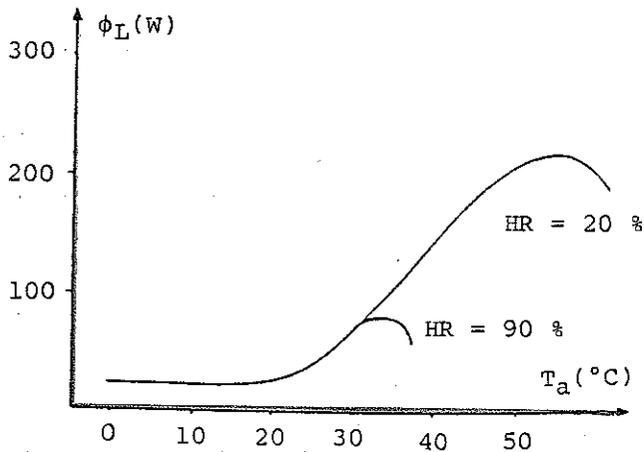


Figure I.32 - Variation des pertes latentes en fonction de la température [116].

Dans l'habitat, les principales limitations existantes pour la pression de vapeur sont d'ordre physiologique et hygiénique. au-dessous de 650 Pa, il y aura des problèmes de sécheresse des muqueuses ; au-dessus de 1900 Pa, la plupart des gens a une impression d'air vicié mal ventilé. Dans le bâtiment lui-même, l'humidité ne doit pas être négligée. Si l'humidité relative est inférieure de 40 %, il peut y avoir des chocs électrostatiques, surtout pour les moquettes en nylon. Par contre, si l'humidité est supérieure à 45 %, il y a développement des mites et des acariens.

I.3.6 . Autres paramètres

De nombreux paramètres interviennent sur l'impression de confort thermique, mais leurs influences sont mal connues et difficiles à mettre en évidence, car elles sont probablement d'ordre psychologique [33,56]. Il s'agit du niveau sonore, de la couleur des matériaux, de la possibilité d'intervenir sur la régulation ou l'ouverture des fenêtres etc....

Par contre certains paramètres du bâtiment ont une influence évidente, car ils modifient les échanges de chaleur, en particulier :

- la position de la pièce dans un immeuble, dont dépend le nombre de surfaces froides et son orientation à laquelle est lié l'ensoleillement intérieur ;
- la forme du local et la position du sujet par rapport à celui-ci, dont dépendent les facteurs de formes entre le sujet et les murs ;
- la nature des matériaux de revêtement, qui peuvent avoir des coefficients de contact et des émissivités différents ;
- la position des bouches de soufflage et d'extraction, qui détermine la circulation et la vitesse d'air dans la pièce.

On ne peut évidemment pas citer toutes les variables intervenant de manière objective ou subjective. Certaines ont des effets négligeables dans la plupart des cas, mais peuvent s'avérer critiques dans quelques configurations.

I.4 . LES INDICES

Chaque mode d'échanges est fonction de plusieurs paramètres de l'ambiance et du sujet :

$$\begin{aligned} C &= f(T_a, V_a, I_{cl}) & R &= f(T_{mrt}, I_{cl}) \\ E_{vap} &= f(P_a, V_a, I_{cl}) & R_{esp} &= f(P_a, T_a, M) \end{aligned}$$

On peut donc ramener l'étude de la thermoneutralité à l'analyse d'une fonction à 6 variables :

$$S = (M - W) - (C + R + E + R_{esp}) = f(T_a, V_a, P_a, T_{mrt}, M, I_{cl})$$

Le but des indices consiste à réduire le nombre de variables. Trente à quarante indices existent à l'heure actuelle ; seuls sont cités ici les plus courants.

I.4.1. Les indices physiques

Les indices physiques ou indices de contrainte thermique sont basés sur le fait qu'il est difficile pour un individu de faire la différence entre les divers modes d'échanges de chaleur et que le seul paramètre influençant l'impression de confort est le flux total échangé par le corps. A une même valeur d'indice correspond une même quantité de chaleur échangée. Ces indices ont été établis pour la plupart de façon analytique à partir des équations d'échanges de chaleur. Il ramènent des conditions hétérogènes à une température équivalente.

a) Température moyenne de rayonnement (T_{mrt})

Elle a déjà été citée. Elle permet de simplifier l'expression des échanges radiatifs, en ramenant les températures (T_i) de surface d'un local non isotherme à une température unique équivalente d'un local isotherme :

$$R = h_r (T_{sk} - T_{mrt}) \quad \text{avec :} \quad T_{mrt} = f(F_{i,sk}, T_i)$$

b) Température opérative (T_{op}) ou température résultante sèche

Elle est définie comme la température d'une cavité isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par convection et rayonnement que dans l'enceinte non isotherme où il se trouve réellement :

$$C + R = h_c (T_{sk} - T_a) + h_r (T_{sk} - T_{mrt}) = h_{tot} (T_{sk} - T_{op})$$

$$\text{avec :} \quad T_{op} = \frac{h_c T_a + h_r T_{mrt}}{h_{tot}} \quad \text{et} \quad h_{tot} = h_c + h_r$$

On exprime souvent T_{op} sous la forme :

$$T_{op} = \frac{h_c}{h_{tot}} T_a + \frac{h_r}{h_{tot}} T_{mrt} = A T_a + (1 - A) T_{mrt}$$

A varie en fonction de la vitesse V_a :

V_a	< 0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
A	0,42	0,46	0,52	0,55	0,58	0,61	0,63	0,65

Dans la littérature, la plupart des résultats d'expériences sur le confort est donnée en fonction de la température opérative. On utilise le plus souvent $A = 0,5$, ce qui donne $T_{op} = (T_a + T_{mrt})/2$. Ceci n'est valable que si la différence entre T_a et T_{mrt} est inférieure à 4°C et si $V_a < 0,4$ m/s.

D'autres températures équivalentes en sont dérivées, telles que la température opérative standard (T_{op}^*) qui fait référence à un air calme ($V_{air} = 0,07$ m/s) ou la température opérative humide (T_{oh}) qui fait aussi intervenir les pertes latentes. Ces deux températures sont peu utilisées, car elles sont incluses dans la définition de la température effective standard

c) Température Effective Standard (SET*)

La température effective standard est très utilisée, surtout par les américains [39,41] ; elle est définie comme la température d'un environnement standard avec laquelle le sujet ayant la même température de peau (T_{sk}) et la même mouillure (w) échange la même quantité de chaleur par rayonnement (R), convection (C) et évaporation (E) que dans l'environnement où il se trouve réellement.

Les conditions définies comme standard sont les suivantes :

- température uniforme : $T_a = T_{mrt} = T_{op}$
- air calme : $0,1 < V_{air} < 0,18$ m/s
- humidité relative : 50 %
- habillement moyen : 0,6 clo

On a alors :

$$\begin{aligned} C + R + E_{vap} &= h_o F_{cl}(T_{sk} - T_{op}) + (0,06 + 0,94 w)2,2 h_c F_{pcl}(P_{sk} - P_{air}) \\ &= h'_o F'_{cl}(T_{sk} - SET^*) + (0,06 + 0,94 w)2,2 h'_c F'_{pcl}(P_{sk} - 0,5 P_{SET^*}) \end{aligned}$$

P_{SET^*} : pression de vapeur saturante à température SET^* .

La Figure I.33 donne une vue schématique de l'évolution de ces indices. On constate que le nombre de variables nécessaires pour caractériser un environnement diminue, mais les informations le concernant diminuent aussi.

Il est évident que ces températures équivalentes, bien que très pratiques d'emploi, ne peuvent être représentatives d'une ambiance réelle que si celle-ci est homogène et ne peuvent en aucun cas caractériser une ambiance spatialement hétérogène.

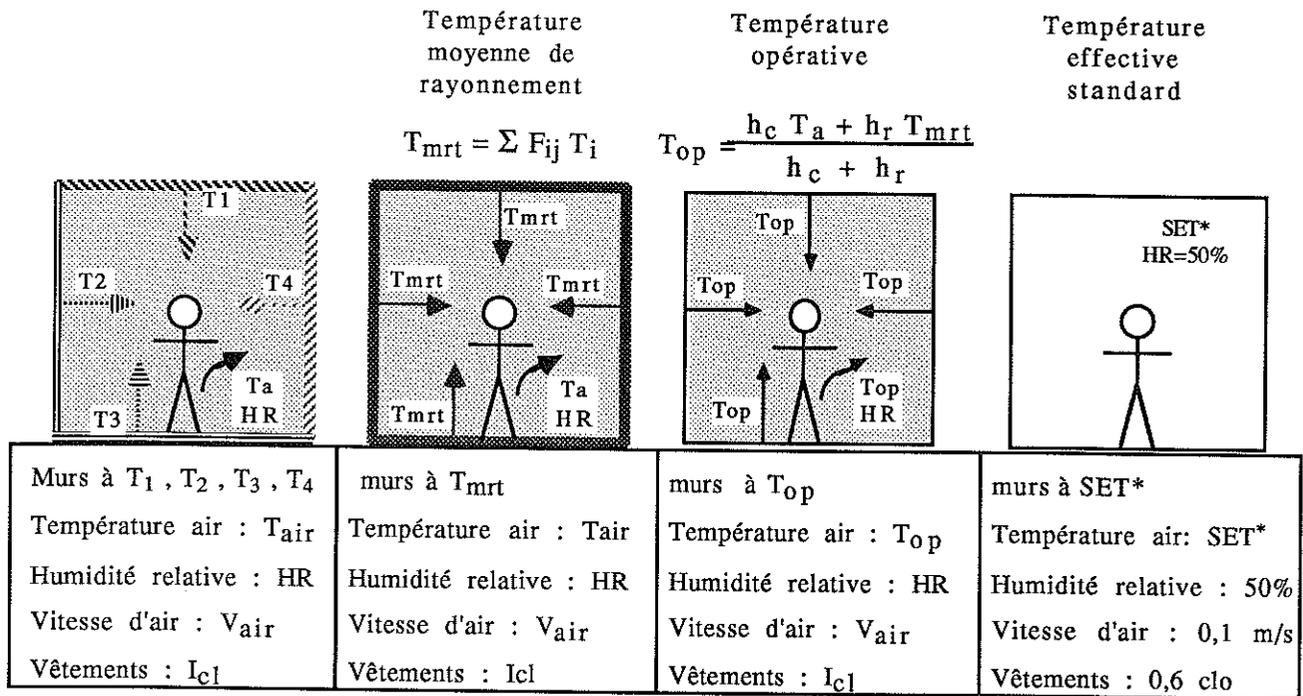


Figure I.33 - Evolution schématique des températures équivalentes

I.4.2 . Les indices physiologiques

Les indices d'astreinte physiologique ont été établis de façon empirique. A une même valeur d'indice correspond une même sensation thermique. Ils sont le plus souvent donnés sous forme de tableaux ou d'abaques.

Il existe des indices de danger conçus pour des climats extrêmes et des indices de confort conçus pour optimiser des ambiances.

a) Les indices de danger

Ils ont été créés pour prédire les conséquences d'un climat extrême sur un sujet. La plupart aboutit au calcul d'une Durée Limite d'Exposition (D.L.E.). Ils ont en général été établis pour des raisons spécifiques ; leur domaine de validité est donc souvent limité à cette application [66].

Il existe un grand nombre d'indices pour les climats chauds. La D.L.E. est calculée à partir de la production de sueur nécessaire à l'équilibre du bilan thermique, comparée à la production maximale réalisable sans danger sur l'individu.

Les principaux sont :

- Predicted 4 Hours Sweat Rate : P4SR (Mc Nall, 1968)
- Heat Stress Index : HSI (Belding, 1956)
- Sudation Requisite : SR (Normes Françaises, Vogt et al)

Les indices de danger au froid sont beaucoup moins nombreux. La D.L.E. est en général calculée en fonction de la température cutanée ou de l'isolement vestimentaire requis, tels que :

- Wind Chill Index : WCI (Passel, 1945)
- Required Clothing Insulation : IREQ (Holmer)

b) Les indices de confort

Ils ont été conçus pour prédire des situations optimales où un maximum de gens sera en condition de confort. Ils ont en général été établis à partir d'expériences et font intervenir des données physiologiques et psychologiques. Certains dont le calcul est complexe font partie intégrante du modèle de physiologie.

Les plus courants de ses indices sont le PMV et PPD qui font actuellement partie des Normes Françaises et Internationales.

Le P.M.V. et le P.P.D.

Le Predicted Mean Vote (P.M.V.), ou vote moyen prévisible, a été établi de manière empirique, sur 1396 sujets, par P.O. Fanger en 1970 [33].

Il fait intervenir les quatre variables de l'ambiance (T_a , T_{mrt} , P_a , V_a) et les deux du sujet (M , I_{cl}). Son expression est assez lourde d'emploi, mais de nombreux tableaux et abaques ont été développés et facilitent son utilisation.

Il est basé sur un bilan thermique global simplifié (S) du corps humain et ramené à l'échelle de confort (de -3 à +3) par un coefficient empirique (A). L'expression générale est :

$$PMV = A S = A [(M - W) - (E_{vap} + R + C + R_{esp})]$$

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

$$E_{vap} = 3,05 \cdot 10^{-3} (P_s - P_a) + 0,42 (M - W - 58)$$

$$R_{esp} = 0,0014 M(34 - T_a) + 1,72 \cdot 10^{-5} M (5867 - P_a)$$

$$R = F_{eff} f_{cl} \epsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) \quad (\text{avec } T \text{ en Kelvin})$$

$$C = h_c f_{cl} (T_{cl} - T_a) \quad h_c = \text{MAX} [2,38 (T_{cl} - T_a)^{0,25} ; 12,1(V_a)^{1/2}]$$

$$T_{cl} = T_{sk} - 0,155 I_{cl} (R + C)$$

$$T_{sk} = 35,7 - 0,028 (M - W)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2 I_{cl} & \text{si } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 I_{cl} & \text{si } I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases}$$

Les deux équations donnant la température moyenne cutanée (T_{sk}) et l'évaporation (E_{vap}) ont été établies à confort égal, proche de 0. Il faut plutôt les voir comme étant les valeurs idéales que devrait avoir un individu (pour une activité donnée) pour être confortable. On peut remarquer que T_{sk} ne varie pas en fonction de la température de l'ambiance, ce qui est contraire aux équations données par d'autres auteurs.

Comme il a déjà été remarqué, il est impossible de satisfaire tous les occupants d'un même local ; il y a toujours un minimum de 5% d'insatisfaits, d'où la création d'un deuxième indice : le P.P.D. (Predicted Pourcentage of Dissatisfied), ou pourcentage prévisible d'insatisfaits. La Figure I.34 donne l'évolution du PPD en fonction du PMV. Lorsque le PMV est égal à 0, le PPD vaut 5%.

$$PPD = 100 - 95 e^{-[0,03353 PMV^4 + 0,2175 PMV^2]}$$

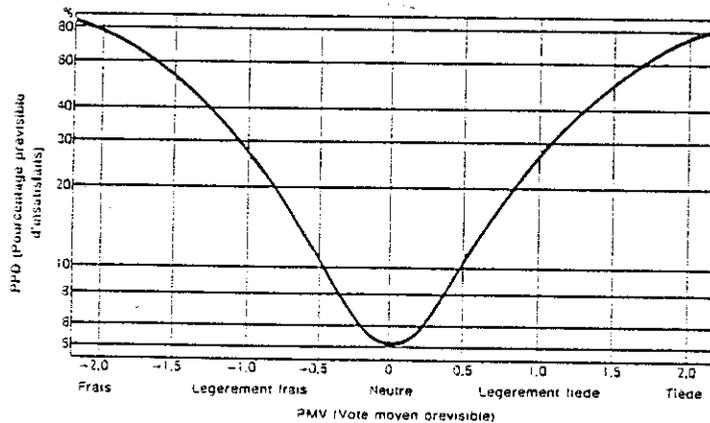


Figure I.34 - Relation entre le PMV et le PPD [114].

Ces deux indices ont été conçus pour prédire les sensations de confort d'un individu dans des conditions homogènes, proches de la neutralité et en régime permanent, et se limitent donc à cette utilisation.

Des études ont été faites sur leurs applications possibles en-dehors de ce domaine [28]. Les principaux problèmes rencontrés sont liés au fait qu'ils ne rendent pas compte des effets d'un régime transitoire et des réactions physiologiques que peuvent avoir des individus soumis à des conditions réelles. Par la suite, le PMV a été inclus dans nos simulations [102], mais uniquement à titre indicatif. Nous reviendrons sur les résultats obtenus dans le Chapitre III.

c) Le profil U.C.R.E.S.

On note l'apparition récente d'un indice de limite d'inconfort. Il s'agit du profil U.C.R.E.S. qui attribue un coefficient positif ou négatif aux principaux risques d'inconfort [29] :

Uniformité horizontale,
 Courant d'air,
 Asymétrie de Rayonnement,
 Ecart de température verticale)
 Température du Sol

Cet indice est peu utilisé pour l'instant, car il est en cours de validation.

I.4.3. Conclusions sur les indices

Les températures équivalentes citées précédemment ont toutes un point commun : ces indices ont pour but essentiel de réduire la complexité de l'étude d'une ambiance réelle et font l'hypothèse que les hétérogénéités spatiales ou temporelles peuvent être ramenées à une variable unique.

On peut alors se poser la question : Deux ambiances complexes réelles ayant le même indice auront-elles vraiment les mêmes conséquences physiologiques sur un individu ?

Pour répondre à cette question nous nous sommes intéressés aux modèles de thermorégulation humaine, afin de pouvoir prédire les réactions d'un individu soumis à des climats complexes, tels qu'on peut les rencontrer dans l'habitat, c'est-à-dire variables dans le temps et dans l'espace.

I.5 . LES MODELES

Le premier modèle fut créé par Burton en 1934 ; depuis, un grand nombre de modèles est apparu, surtout dans les années 1970. La plupart a été créée par des physiologistes, dans le but de mieux comprendre, par analogie, les phénomènes de thermorégulation.

Dans tous ces modèles, le corps est divisé en compartiments de deux à plusieurs centaines. Les réactions physiologiques sont prises en compte et le bilan thermique de chaque compartiment est établi. Un modèle fait exception : c'est celui de Givoni et Goldman (1972) qui est conçu pour prédire uniquement la réponse de la température rectale ; il ne s'agit pas réellement de thermorégulation.

Par la suite, une courte présentation des modèles les plus courants sera faite, afin de justifier notre choix d'un modèle particulier.

I.5.1 . Les modèles simples

Les modèles simples à petit nombre de nœuds (2 en général), tels que le modèle de Gagge, ou le KSU, sont fiables en régime transitoire . Ils sont assez répandus, car faciles à utiliser et peu coûteux en temps de calcul. Leur but essentiel est de calculer de façon assez précise des indices de sensation thermique complexes faisant intervenir les variables physiologiques (température cutanée, mouillure, etc.).

a) Le modèle de Gagge

C'est un modèle de thermorégulation humaine. Son but essentiel est de calculer la température effective standard (SET*) et un indice de sensation thermique (T_{SENS}) [40, 42.43].

Ce modèle est une version simplifiée, dérivée du modèle de Stolwijk. Il est composé de deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et la peau, comme l'indique la figure I.35.

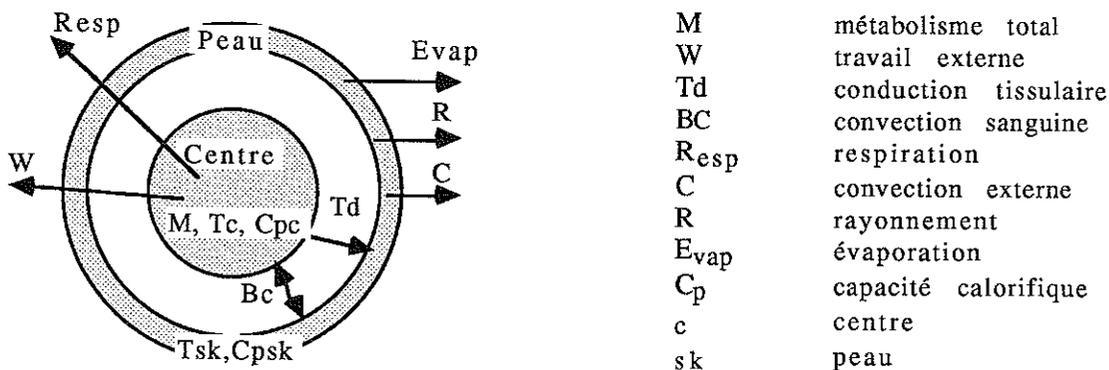


Figure I.35 - Schématisation du modèle de Gagge

Les compartiments sont isothermes. Les transferts de chaleur entre eux se font par conduction tissulaire (Td) et convection sanguine (BC). Les échanges vers l'extérieur se font par les modes définis au paragraphe précédent. L'influence des habits est prise en compte grâce à des résistances thermique et évaporatoire globale.

A tout instant le bilan thermique des compartiments (S_c et S_{sk}) est effectué ; on en déduit les nouvelles températures qui en résultent (T_c , T_{sk}), puis les réactions physiologiques (vasomotricité, frissons, sudation) nécessaires pour équilibrer ce bilan.

S_c = métabolisme total - travail externe- (respiration + conduction tissulaire + convection sanguine)

S_{sk} = chaleur venant du noyau - (convection externe + rayonnement + évaporation)

$$S_c = (M - W) - (R_{esp} + TD + Bc) \quad dT_c/dt = S_c/C_{pc}$$

$$S_{sk} = (TD + Bc) - R - C - E_{vap} \quad dT_{sk}/dt = S_{sk}/C_{psk}$$

Le calcul de la température moyenne cutanée et de l'évaporation permet de déterminer la température effective standard telle qu'elle a été décrite précédemment. On en déduit ensuite l'indice de sensation thermique (TSENS) :

$$TSENS = 0,245 SET^* + 0,0165 PSET^* - 6,741$$

Ce modèle est de plus en plus utilisé, car il est relativement simple. De nombreux modèles en sont dérivés.

b) Le modèle K.S.U.

Le modèle KSU, publié en 1974, est dérivé du "Gagge". Certaines équations ont été modifiées, mais la structure générale est la même [1,94].

Il permet de calculer un indice de sensation thermique lié à l'astreinte physiologique, contrairement au modèle de Gagge qui fournit un indice lié aux contraintes thermiques. Il s'agit d'un indice empirique, séparé en deux termes :

- l'indice au froid $TSENS^-$ est relié à l'état de vasoconstriction :

$$TSENS^- = -1,46 \epsilon_{vc} + 3,75 \epsilon_{vc}^2 - 6,15 \epsilon_{vc}^3$$

(ϵ_{vc} : facteur de vasoconstriction).

$$\epsilon_{vc} = \frac{KS_0 - KS}{KS_0 - KS_{-4}}$$

$KS = K + V_b C_b$
K : conductance entre centre et peau
V_b : débit sanguin
C_b : chaleur massique du sang
l'indice 0 correspond à la neutralité
l'indice 4 correspond à des conditions très froides

- l'indice au chaud $TSEN^+$ est lié à la mouillure cutanée :

$$TSEN^+ = (5 - 6,56(HR - 0,5)) \epsilon_{sw}$$

$$\epsilon_{sw} = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - 1} \quad \text{: facteur de mouillure}$$

(ω = mouillure cutanée, ω_0 = mouillure à la neutralité thermique)

Ces deux modèles prennent en compte les réactions physiologiques et sont utilisables en régime transitoire. De nombreuses études comparatives ont été réalisées et montrent qu'ils donnent de bons résultats dans une gamme assez étendue de conditions ambiantes ; mais on peut étudier uniquement des configurations homogènes, chaque paramètre (T_a , T_{mrt} , P_a , V_a) de l'ambiance étant caractérisé par une seule valeur.

I.5.2 . Les modèles complexes

Si on veut avoir accès à des données plus précises sur les réactions physiologiques locales du corps humain, il faut utiliser un modèle décomposant le corps en divers segments. Les modèles complexes permettent une meilleure précision pour l'étude des climats sévères et des conditions hétérogènes.

Le premier modèle complexe a été celui de Wissler (1963). Le corps est divisé en 7 compartiments. Les 6 segments (tête, tronc, 2 bras, 2 jambes) sont homogènes et reliés entre eux par le flux sanguin (septième compartiment).

Puis, une première version du modèle de Stolwijk est apparue en 1966 [97], avec tout d'abord 8 compartiments, puis 14. La version actuelle en comporte 25 [98,99] (ce modèle sera décrit en détail par la suite).

Gordon, en 1976 [49], a agrandi le modèle de Stolwijk et a créé 10 segments composés de 3 ou 5 couches, ce qui fait au total 44 compartiments.

Wissler, en 1982 [111], a utilisé aussi le modèle de Stolwijk pour obtenir un modèle à 15 segments composés chacun de 15 à 21 couches, soit 250 compartiments.

La Figure I.36 donne un récapitulatif de la progression des modèles. Il ne s'agit pas d'un catalogue exhaustif. Une étude comparative réalisée par Lotens entre les divers modèles, montre que la complexité n'amène pas à une plus grande précision des résultats. Il faut noter que plus un modèle devient complexe, plus il nécessite des données physiologiques locales précises, souvent impossibles à obtenir.

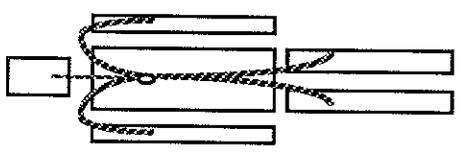
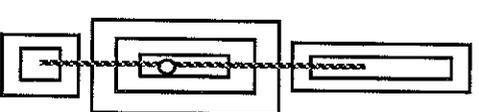
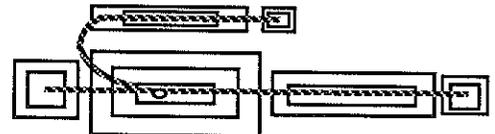
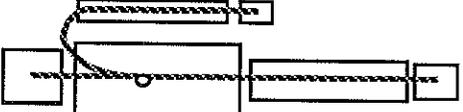
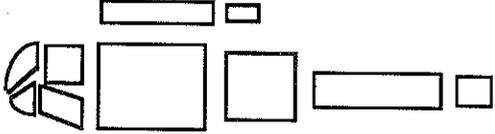
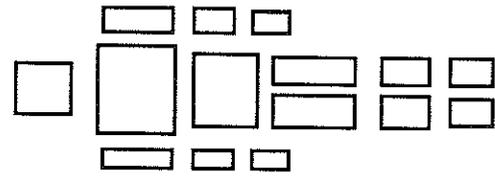
noms de l'auteur et date	Wissler 1963	Stolwijk 1966	Stolwijk 1966	Stolwijk 1970	Gordon 1977	Wissler 1982
Nbre de segments	6 + le sang	3 + le sang	6 + le sang	6 + le sang	10 + le sang	15 + le sang
Nbre de couches	1	2 ou 3	2 ou 3	4	3 ou 5	15 ou 21
Nbre de compartiments	7	8	14	25	44	environ 270
composition des modèles						

Figure I.36 - Evolution des modèles de thermorégulation humaine

I.5.3 . Conclusion sur les modèles

Les modèles de Gagge et de Stolwijk sont les plus utilisés à l'heure actuelle. De nombreuses études ont été réalisées pour affiner les différents paramètres physiologiques.

Les deux modèles ne correspondent pas aux mêmes besoins, ni aux mêmes utilisations. Le modèle de Gagge est global et peut être utilisé pour des ambiances homogènes, afin de calculer des indices de confort. Le but de notre étude est de caractériser les hétérogénéités spatiales et temporelles. Seul un modèle plus complexe peut alors donner les réactions locales d'un individu. Nous avons choisi le modèle de Stolwijk, d'une complexité raisonnable permettant tout de même l'étude d'inconforts locaux.

Dans le chapitre suivant, une description détaillée du modèle choisi sera faite, ainsi que les modifications apportées dans le but d'affiner le calcul des échanges thermiques entre un individu et son environnement.

CHAPITRE II

LE MODELE HABITANT - HABITAT

II.1. LE MODELE DE L'HABITAT

Le modèle d'habitat utilisé dans le laboratoire depuis plusieurs années est le logiciel américain TRNSYS - Transient Simulation program [60]. Il permet d'étudier un système en régime transitoire. La simulation donne à tout instant l'évolution du comportement d'un habitat soumis à une météorologie réelle.

Sa structure modulaire permet de réduire la complexité d'un large problème en le ramenant à un ensemble de problèmes plus restreints. La Figure II.1 est une vue schématique des différentes étapes permettant de passer d'un système réel à sa modélisation dans TRNSYS.

La Figure II.1a représente le système à étudier. Il est composé de divers éléments (capteur, tuyaux, stockage...) qui peuvent être étudiés séparément (Figure II.1b) et transfèrent entre eux des flux de masse (Q_m), des températures (T), etc... (Figure II.1c).

Dans TRNSYS, les composants sont représentés par des modules (Figure II.1d). La modélisation du système est donc déterminée par les modules et la façon dont ils sont interconnectés.

Chaque module est repéré par son numéro de TYPE, (il en existe actuellement une soixantaine). Un type peut être utilisé plusieurs fois dans une même simulation ; il porte alors des numéros d'UNIT différents (dans l'exemple, le tuyau "TYPE 31" est utilisé deux fois ; il est alors repéré par UNIT 3 et UNIT 5).

Les TYPES sont caractérisés par :

- les paramètres (PARAMETERS), qui sont des caractéristiques du composant et restent invariants au cours d'une même simulation ;
- les entrées (INPUTS), qui varient au cours du temps et sont en général des sorties d'autres modules ;
- les sorties (OUTPUTS), qui sont les résultats de calculs effectués dans le module lui-même.

Chaque module correspond à un sous-programme : il peut avoir son propre mode de résolution (équations fondamentales ou empiriques, tableaux de valeurs correspondant aux données constructeur, etc...). Les modules manquants peuvent être créés en respectant certaines règles, afin d'être compatibles avec l'ensemble.

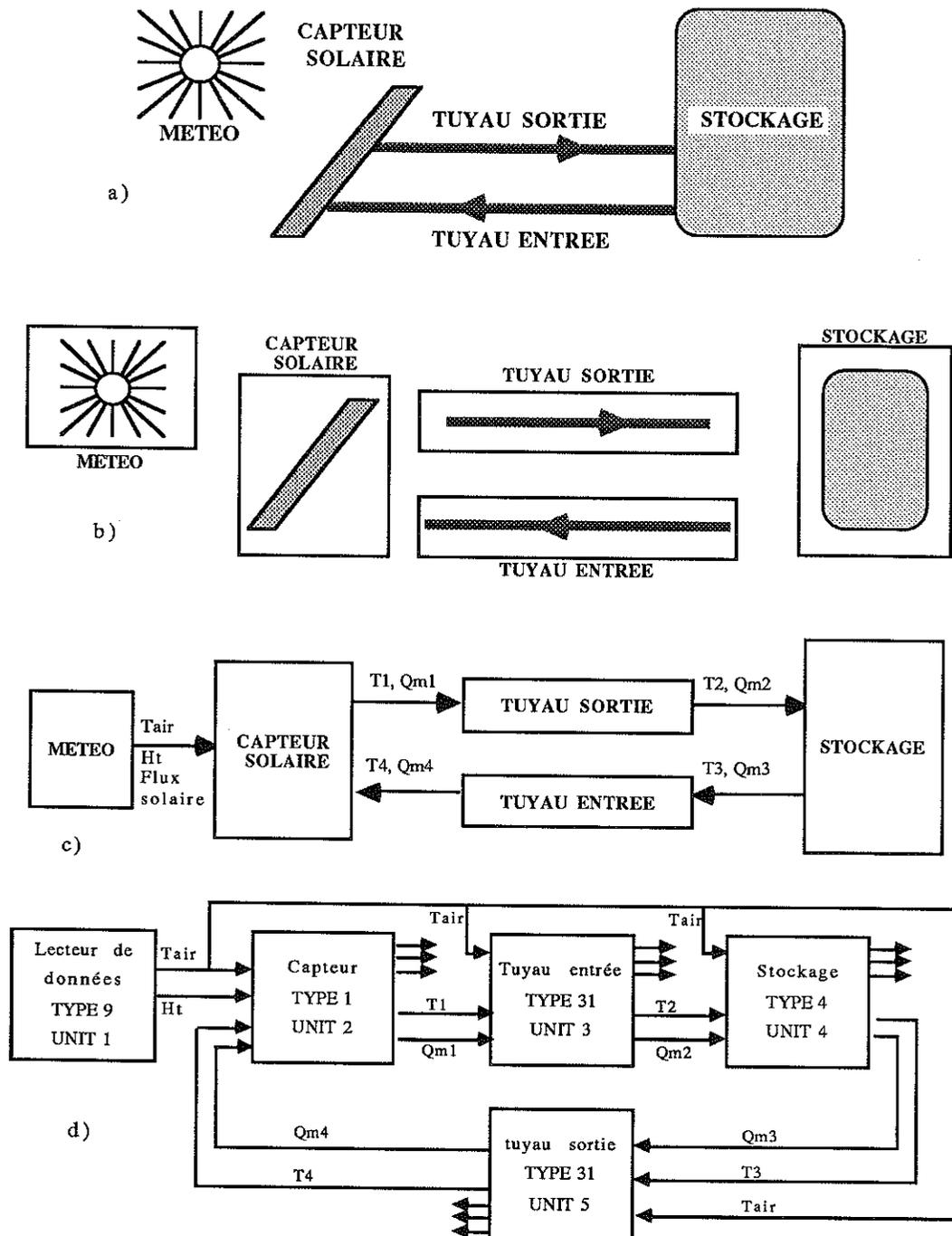


Figure II.1 - Schématisation du passage d'un système réel à sa modélisation dans TRNSYS

De nombreux sous-programmes sont disponibles, tels que :

- des utilitaires d'entrée : lecteurs de données tabulées, possibilité de créer des fonctions dépendantes du temps, etc. ;
- des aides de calcul : résolutions d'équations différentielles ou d'inversions de matrices, diagramme psychrométrique, etc. ;
- des utilitaires de sortie : histogrammes, courbes, tableaux de valeurs, sommations dans le temps, etc.

Pour chaque simulation, on définit l'heure de début et de fin ainsi que le pas de temps. Le mode général de résolution se fait par prédiction-correction. Pour chaque pas de temps, il y a plusieurs itérations jusqu'à ce qu'il y ait convergence des entrées.

La structure modulaire de TRNSYS le rend particulièrement souple d'emploi. De nombreux sous-programmes ont été créés ou modifiés au laboratoire, tels que : le plancher chauffant, la fenêtre, le calcul des échanges radiatifs. Les modules créés pour cette étude seront décrits en détails par la suite.

II.2 . LE MODELE DE L'HABITANT

Nous avons choisi le modèle de thermorégulation humaine à 25 nœuds, créé par J.A.J. Stolwijk et J.D. Hardy, en 1970, pour les programmes Skylab et Appolo de la NASA [95,97,98]. Le programme en Fortran nous a été fourni par P. Lenzi, qui l'a utilisé [61] et a effectué quelques modifications.

Le système peut être décomposé en deux parties :

- le système contrôlé : il est passif et a les caractéristiques physiques et physiologiques réelles du corps humain ; il met en jeu uniquement des transferts de masse et de chaleur ;
- le système de contrôle : il correspond à la partie active du système, c'est le régulateur ; il met en jeu uniquement des transferts d'information et de commande.

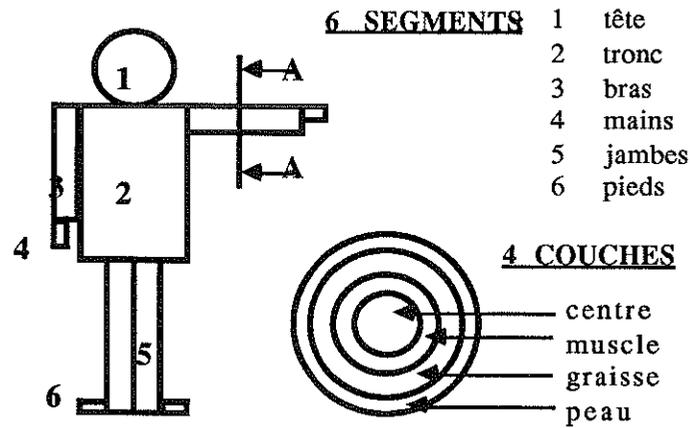
II.2.1 . Le système contrôlé

Le corps est divisé en 6 segments : 1 sphère (la tête) et 5 cylindres (tronc, bras, mains, jambes, pieds). Chaque segment est divisé en 4 couches concentriques (centre, muscle, graisse, peau) ; le flux sanguin relie les compartiments entre eux, ce qui donne un modèle à 25 compartiments, comme l'indique la Figure II.2.

Dans la description qui suit, les notations utilisées correspondent à :

- indice "b" = valeurs basales des variables,
- indice "i" = numéro de segment (i = 1 à 6),
- indice "k" = numéro de couche (k = 1 à 4),
- indice "n" = numéro de compartiment (n = 1 à 25) ; n = 25 est le flux sanguin.

Remarques : Pour faciliter la lecture éventuelle du logiciel écrit en Fortran, nous avons cherché à utiliser dans le texte des noms de variables rappelant ceux du programme.



[(6 segments) * (4 couches)] + flux sanguin = 25 compartiments

Figure II.2 - Décomposition du système contrôlé

Chaque compartiment a les caractéristiques réelles du corps humain ; elles ont été établies de façon expérimentale et correspondent à celles d'un homme standard (taille = 1,75 m ; poids = 74,1 kg ; surface corporelle = $A_{DU} = 1,89 \text{ m}^2$). Le tableau ci-après donne la surface et le poids relatifs de chaque segment.

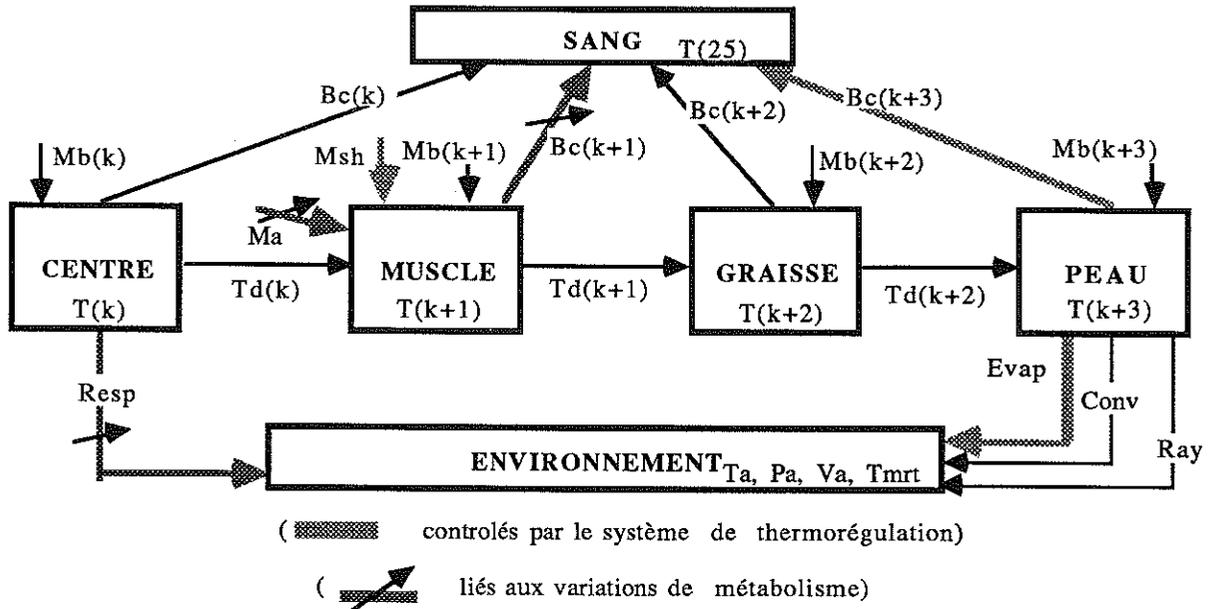
	Tête	Tronc	Bras	Mains	Jambes	Pieds
N° segment	1	2	3	4	5	6
Poids %	5,40	51,70	9,50	0,90	27,80	1,30
Surface %	7,00	36,02	13,41	5,00	31,70	6,57

Tableau II.1 - Numérotation, poids et surface relatifs de chaque segment.

Le rapport (Poids/Surface) correspond au repos, en première approximation, au rapport (production de chaleur/surface d'échange). Par conséquent, les parties du corps pour lesquelles ce rapport est faible auront tendance à se refroidir plus vite.

Chaque couche est à température homogène ; il n'y a donc pas d'échange au sein d'une même couche. Le gradient de température n'a lieu qu'entre deux couches. De plus, les membres sont regroupés ; les deux bras, par exemple, ont la même température et sont traités comme un seul segment dans le modèle. Lors du calcul, tous les segments sont traités de la même façon ; les échanges suivant chaque mode sont évalués séparément. Un bilan thermique de chaque couche est fait, on en déduit une nouvelle température.

Les segments sont reliés entre eux uniquement par le flux sanguin ; les transferts par conduction entre les segments sont négligés. La Figure (II.3) schématise les échanges de chaleur dans un segment.



M_b	métabolisme basal		
M_a	métabolisme d'activité	Evap	échange par évaporation
M_{sh}	métabolisme de frisson	Conv	échange convectif
B_c	convection sanguine	Ray	échange radiatif
T_d	conduction tissulaire	Res	échange respiratoire

Figure II.3 - Schématisation des échanges thermiques dans un segment

a) La production de chaleur

- Le métabolisme basal M_b est réparti dans toutes les couches ; sa valeur totale est :

$$M_b = \sum M_{b(n)} = 80 \text{ W} = 69 \text{ kcal/h}$$

- Le métabolisme d'activité M_a n'a lieu que dans les muscles ; sa répartition a été établie pour une activité de type marche ou bicyclette, à 60 % dans les jambes (pour d'autres activités, il y a lieu de changer ces coefficients de répartition) ;

- L'apport supplémentaire dû aux frissons M_{sh} est déterminé par le système de contrôle et n'est réparti que dans les muscles.

b) Les transferts internes de chaleur

* Les échanges par conduction tissulaire (T_d)

Ils se font de manière radiale d'une couche à l'autre. Ils ont été établis sur un modèle de sphère ou de cylindre. Il n'y a pas de transfert dans le sens longitudinal, car les couches sont à température homogène.

$$T_d(k) = TC(k)(T(k) - T(k+1))$$

$TC(k)$ = conductance tissulaire entre la couche k et $k+1$, paramètres tabulés et invariants,

$T(k)$ et $T(k+1)$ = température des deux couches en contact.

* Les échanges par convection sanguine (BC)

Ils ont lieu entre chaque couche et le sang :

$$BC(k) = BF(k) C_{(25)}(T(k) - T_{(25)})$$

BF = débit sanguin (l/h),

$T_{(25)}$ = température du sang,

$T(k)$ = température de la couche k ,

$C_{(25)}$ = chaleur massique du sang.

Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse. Dans les muscles, il augmente en fonction de la production de chaleur. Dans la couche cutanée, il est fortement contrôlé par le régulateur.

c) Les échanges de chaleur avec l'extérieur

* Les pertes par convection et évaporation respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête (13 %) et du tronc (87 %). Les expressions sont données dans le paragraphe I.1.3a.

* Les échanges par convection et rayonnement ont lieu au niveau de la peau et sont analysés en détail au paragraphe II.3.

* Le calcul des échanges par évaporation a largement été modifié par Lenzi et Libert [62], afin de déterminer, en plus des pertes de chaleur, les mouillures cutanées locales et la quantité d'eau ruisselant sur la peau. L'évaporation est calculée par l'expression :

$$E_{diff} = \text{évaporation diffuse} : E_{diff} = 0,06 (1 - \omega) E_{max}$$

$$E_{vap} = E_{diff} + E_{sw} \quad E_{sw} = \text{évaporation de la sueur} : E_{sw} = \omega E_{max}$$

où E_{max} est le pouvoir évaporatoire de l'ambiance,

La mouillure (ω) est calculée grâce à la comparaison entre la quantité d'eau donnant une mouillure de 1 et la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné. Cette quantité d'eau est fonction de la production de sueur (déterminée par le système de contrôle), de l'eau se trouvant déjà sur la peau au pas de temps précédent et du rendement d'évaporation (lui-même fonction de la mouillure). Ce calcul est

intéressant, car, dans un climat chaud, la mouillure influence énormément la sensation de confort.

On peut donc récapituler les divers modes d'échanges afin de calculer le bilan thermique HF de chaque compartiment (les variables soulignées sont contrôlées par le régulateur ; les variables *italiques* dépendent directement du métabolisme).

$$\underline{\text{Centre}} \quad HF_{(k)} = M_{b(k)} - T_{d(k)} - \textit{RESP}_{(k)} - BC_{(k)}$$

$$\underline{\text{Muscle}} \quad HF_{(k+1)} = M_{b(k+1)} + \underline{M}_{sh(k)} + M_{a(k)} + T_{d(k)} - T_{d(k+1)} - BC_{(k+1)}$$

$$\underline{\text{Graisse}} \quad HF_{(k+2)} = M_{b(k+2)} + T_{d(k+1)} - T_{d(k+2)} - BC_{(k+2)}$$

$$\underline{\text{Peau}} \quad HF_{(k+3)} = M_{b(k+3)} + T_{d(k+2)} - \underline{BC}_{(k+3)} - C_{(k+3)} - R_{(k+3)} - E_{(k+3)}$$

$$\underline{\text{Sang}} \quad HF_{(25)} = \sum_{n=1}^{24} \underline{BC}_{(n)}$$

Après avoir établi le bilan de chaque couche à un instant (t) donné, on peut en déduire sa température à un instant (t+dt), où dt est le pas de temps de calcul du modèle, en général égal à 1 min. :

$$T_{(k)}^{t+dt} = T_{(k)}^t + \frac{HF_{(k)}}{C_{(k)}} dt$$

$C_{(k)}$ est la chaleur massique de la couche k.

II.2.1 . Le système de contrôle

Le système de contrôle détermine les réactions physiologiques internes du corps ; il commande le débit d'eau suée, l'augmentation de production de chaleur due aux frissons et le débit sanguin cutané.

Il peut être décomposé en trois parties schématisées sur la Figure II.4 :

- la première correspond aux thermorécepteurs, qui détectent l'état thermique du système contrôlé,
- le deuxième intègre les signaux et détermine l'amplitude des commandes,
- le troisième effectue la répartition des signaux dans le système contrôlé.

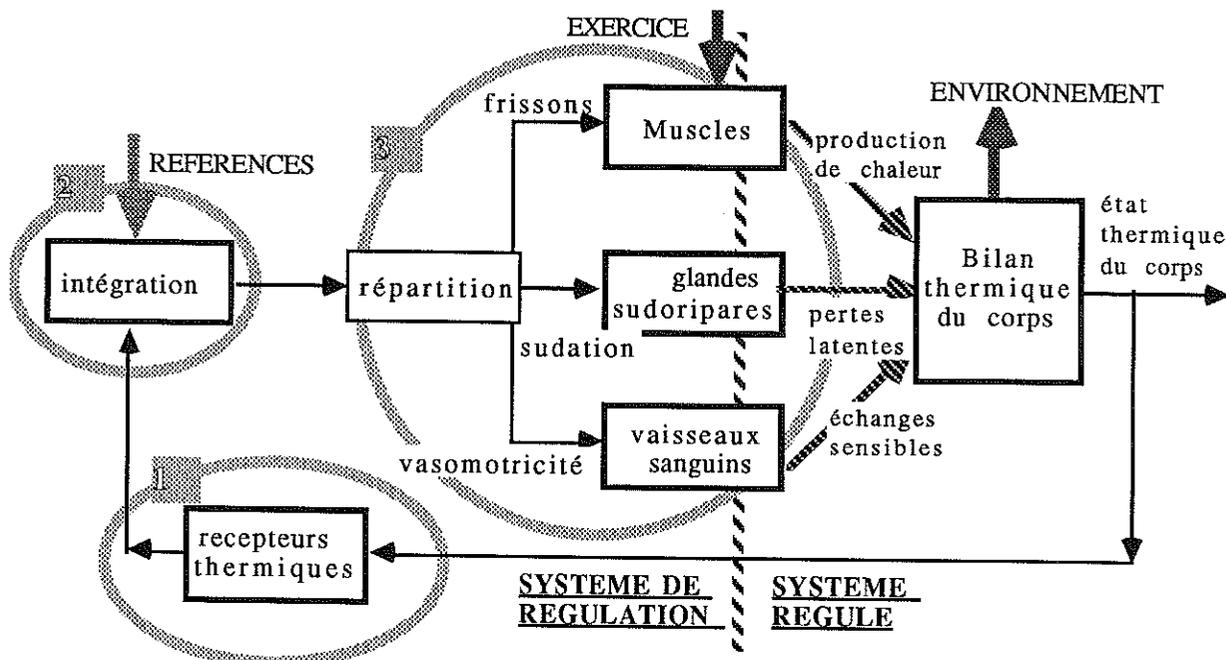


Figure II.4 - Schématisation du système de régulation

a) Les détecteurs

Une comparaison est faite, pour chaque compartiment, entre sa température instantanée (T) et sa température de consigne T_{set} (les T_{set} sont des paramètres fixes qui correspondent aux températures d'un individu nu dans les conditions de neutralité thermique, en régime permanent, c'est-à-dire en l'absence de réactions de thermorégulation). Un "signal d'erreur" en est déduit :

$$ERROR_{(n)} = T_{(n)} - T_{set(n)}$$

Remarque : Un terme dynamique en dT/dt supplémentaire est prévu, mais cet effet n'étant pas pour l'instant mis en évidence de façon concrète, il est négligé.

Si ce signal d'erreur est positif, on considère qu'il vient des thermorécepteurs spécifiques au chaud ; il est noté alors WARM. Inversement, s'il est négatif, il est noté COLD.

$$\begin{array}{ll} \text{Si : } ERROR_{(n)} > 0 & WARM_{(n)} = T_{(n)} - T_{set(n)} \\ ERROR_{(n)} < 0 & COLD_{(n)} = T_{set(n)} - T_{(n)} \end{array}$$

b) L'intégrateur

L'intégrateur reçoit les informations venant des détecteurs et détermine des signaux de commande générale ER_1 , ER_S , ER_P . Les températures qui interviennent alors sont uniquement la température interne de la tête, correspondant à

l'hypothalamus, et une moyenne pondérée des températures cutanées de chaque segment :

$$ER_1 = WARM_{(1)} - COLD_{(1)},$$

$$ER_S = \sum_{i=1.6} SkR_{(i)} WARM_{(i)} - \sum_{i=1.6} SkR_{(i)} COLD_{(i)}$$

$$ER_P = (WARM_{(1)} \sum_{i=1.6} SkR_{(i)} WARM_{(i)}) - (COLD_{(1)} \sum_{i=1.6} SkR_{(i)} COLD_{(i)})$$

Les coefficients $SkR_{(i)}$ sont proportionnels aux nombres de thermorécepteurs cutanés de chaque segment (i). Leur somme est égale à un.

c) L'effecteur

L'effecteur reçoit les signaux de commande générale venant de l'intégrateur et détermine la nature de commande à transmettre au système contrôlé. Les quatre types de la commande (COM) sont :

- SWEAT, qui régule la sudation,
- CHILL, pour les frissons,
- DILAT et STRIC pour la vasodilatation et la vasoconstriction.

Le mode général de calcul est :

$$COM = C.ER_{(1)} + S.ER_S + P.ER_P$$

Ces trois coefficients C, S, P sont très discutés dans la littérature. Un grand nombre d'auteurs considèrent que le terme (ER_P) n'intervient pas et que la température interne du cerveau joue un rôle 6 à 10 fois plus grand que celle de la peau. Dans notre modèle, nous avons $C = 6S = 6P$, [62].

Ces coefficients de commande sont toujours positifs et bornés par des valeurs supérieures, qui correspondent aux limites physiologiques du corps humain.

Les signaux de commande sont répartis aux divers effecteurs dans chaque segment.

* Les frissons (CHILL) provoquent une augmentation de production de chaleur dans les couches musculaires.

$$M_{sh(k+1),i} = chilm_{(i)} CHILL$$

$chilm(i)$ sont des coefficients de répartition proportionnels à la masse musculaire de chaque segment : $\sum_i chilm(i) = 1$.

* La vasomotricité (DILAT, STRIC) provoque une augmentation ou une diminution du débit sanguin. Il intervient en plus en phénomène local lié à la résistance supplémentaire du système veineux de surface, qui est fonction de sa température.

$$BF_{(k+3),(i)} = \left(\frac{BF_{b(k+3)(i)} + SkV(i) DILAT}{1 + SkC(i) STRIC} \right) 2 \left(\frac{ERROR(i)}{10} \right)$$

avec $\sum_i SkV(i) = 1$ et $\sum_i SkC(i) = 1$.

Les coefficients SkV et SkC sont tels que les extrémités, mains et pieds, ont une forte vasoconstriction. Ils auront donc tendance à être plus sensibles au froid. Par contre le tronc et les jambes sont plus sensibles à la vasodilatation, ce qui favorisera l'évacuation de la chaleur, surtout lors d'exercices.

* La sudation (SWEAT) est répartie sur les différents segments, en fonction du nombre de glandes sudoripares. Presque la moitié de la sueur est produite par le tronc.

II.1.3 - Remarques générales sur le programme

Un grand nombre de paramètres est nécessaire. Les caractéristiques physiologiques du système contrôlé ont été établies de façon expérimentale et sont peu contestées. Par contre, les paramètres du système régulateur (températures de consigne et coefficients de contrôle) varient énormément d'un auteur à l'autre et même d'une publication à l'autre [43,56] pour un même auteur [50,51,72,86].

Tous ces paramètres sont donc en fichiers, lus en début de simulation ; ils peuvent être aisément modifiés. Mais beaucoup de précautions sont alors nécessaires, car le système est en boucle fermée et la modification d'un seul paramètre entraîne souvent des conséquences inattendues.

Certaines réactions physiologiques peuvent être assez rapides. Le modèle est prévu pour un pas de temps (dt) de calcul inférieur à 1 minute ; il est réduit si l'augmentation de température d'un compartiment est supérieure à 0,1°C au cours d'un pas de temps.

La minute est bien inférieure au pas de temps habituellement utilisé dans les simulations de l'habitat. Il a donc fallu décomposer le pas de temps (Δt) de TRNSYS en pas de temps plus petits (dt) dans le module Stolwijk.

Un modèle est toujours plus simple que le système qu'il représente, surtout dans le cas de la physiologie humaine où la mise en équation est complexe, étant donné le grand nombre de paramètres et le manque de connaissance de certains phénomènes.

Les réponses du système de thermorégulation ont été établies sur l'observation des phénomènes en régime stable. Pour valider ces réponses en régime transitoire, de nombreuses comparaisons ont été faites, la plupart du temps sur des créneaux de températures ou de métabolisme.

De nombreux auteurs ont comparé le modèle de Stolwijk soit à des résultats d'expériences, soit à d'autres modèles.

* Stolwijk et ses collaborateurs [7,98], lors de la première publication du modèle, l'ont comparé à des expériences de créneaux de température d'air. Ils ont noté, lors d'une baisse de température de l'ambiance, une décroissance trop rapide de la température rectale qui entraîne l'apparition de frissons après une heure d'exposition au froid, alors que ce temps est de deux heures dans les expériences. Ils expliquent ce phénomène par une mauvaise répartition entre les couches centrale et musculaire des quantités de chaleur produites. Pour pallier ceci, il faudrait décomposer ces deux couches en couches plus minces.

* Wissler [111] a comparé le modèle de Stolwijk au sien beaucoup plus complexe. Les différences de résultats sont relativement faibles ; les réactions en régime transitoire semblent être légèrement plus lentes. Ces résultats ne sont pas confirmés par des expériences.

* Haslam & Parsons [52,53] ont fait des comparaisons multiples avec des expériences et le modèle de Gagge (2 nœuds) et celui de Givoni (Température rectale). Il semble que :

- Pour les conditions de neutralité ou de métabolisme modéré ($M < 4$ met), les variations de températures cutanée moyenne et tympanique données par le "Stolwijk" sont les plus proches des valeurs expérimentales, bien que légèrement inférieures.

- Pour un fort métabolisme ($M = 5$ met) ou une ambiance chaude ($T_{op} > 45^{\circ}\text{C}$), la température tympanique est correcte, mais les températures rectale et cutanée moyenne ont tendance à croître trop rapidement ; dans ce cas, le modèle de Gagge semble être plus réaliste. Une des raisons données pour expliquer ce résultat est que le "Stolwijk" ne fait pas intervenir la vitesse relative de l'air et, donc, les échanges convectifs et évaporatoires sont probablement sous-estimés.

- Pour un sujet au repos dans une ambiance froide ($T_{op} = 5^{\circ}\text{C}$), la température rectale a tendance à être trop basse et la température cutanée trop haute par rapport aux expériences ; le "Gagge" réagit de la même façon, mais les écarts sont plus faibles. Ceci est probablement dû à un coefficient de conduction interne ou un débit sanguin trop fort ; la chaleur interne produite est trop vite amenée à la surface.

* Lotens [63] a comparé le modèle de Stolwijk et ceux de Wissler et Givoni à divers types d'expériences dans l'air et l'eau. Il a tiré les mêmes conclusions que celles citées précédemment, et a noté que, lors d'un changement brutal de l'ambiance ou du métabolisme, le "Stolwijk" réagit légèrement trop vite.

Pour des conditions extrêmes (fort métabolisme, climat très chaud ou très froid), il faut être prudent sur l'analyse des résultats donnés par le modèle. Or, notre domaine de travail est l'habitat, donc des conditions proches de la neutralité. Les résultats dans ces conditions sont tout à fait corrects.

Certaines remarques faites sur le modèle portent sur les réactions physiologiques internes ; il nous est difficile de modifier les paramètres mis en cause. Il faut tout de même noter que ces remarques portent sur les modèles d'origine ; or, nous utilisons un modèle envoyé par P. Lenzi, qui a travaillé sur le système de régulation. Nous avons aussi changé certains coefficients du régulateur sur les conseils de physiologistes.

Une critique importante met en cause une estimation trop globale des échanges avec le milieu environnant. Nous nous sommes donc attaché à affiner le mode de calcul de ces échanges.

II.3 . LES MODIFICATIONS APPORTEES

Nous avons donc inséré le modèle de Stolwijk dans la structure de TRNSYS. Nous ne parlerons pas des modifications purement liées à la programmation et permettant la communication avec l'ensemble du système, car elles ne présentent pas d'intérêt majeur.

Notre but est de caractériser l'influence des hétérogénéités spatiales et temporelles de l'habitat sur les réactions thermophysiques d'un individu. Nous avons donc essayé de nous rapprocher le plus possible des échanges thermiques réels auxquels ils sont soumis. En modifiant essentiellement le mode de calcul des échanges radiatifs et convectifs et en ajoutant la présence des vêtements qui n'étaient jusque là pas pris en compte dans ce modèle.

II.3.1 . La convection

Les échanges convectifs sont difficiles à calculer de façon précise, à cause du grand nombre de paramètres intervenant. Les modèles d'écoulement simple sur plaque plane ou cylindre ne sont pas applicables dans le cas d'un sujet. Il est donc impossible d'utiliser des expressions connues ; on doit donc faire appel aux données expérimentales.

Les échanges convectifs (C) dans le modèle d'origine sont calculés sous la forme :

$$C_{(i)} = h_{c(i)}(T_{sk(i)} - T_a)$$

avec :

$$h_{c(i)} = h_{0(i)} V_a^{0.5} \quad (h_{0(i)} : \text{coefficients tabulés})$$

Nous avons fait deux remarques :

- La vitesse et la température de l'air sont des valeurs moyennes dans la pièce. Or, il est rare que, dans un habitat réel, il y ait des conditions aussi homogènes. Il est fréquent qu'un mode de chauffage provoque une stratification de l'air (convecteur, par exemple) [86] ou des vitesses d'air hétérogènes (conditionnement d'air par air pulsé) [85,87].

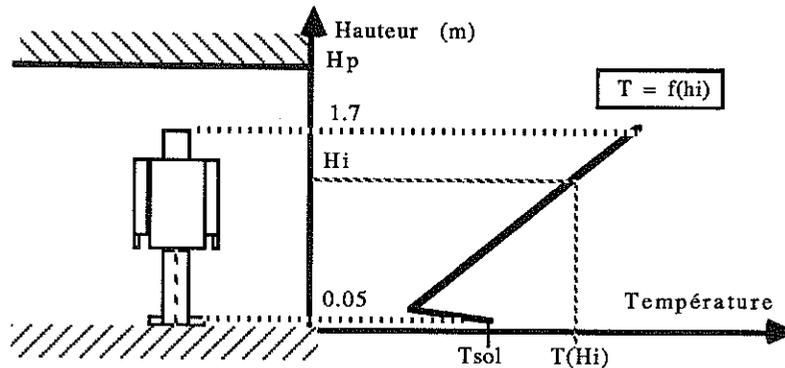
- D'autre part, la vitesse prise en compte dans le calcul est uniquement celle de l'air dans la pièce ; la vitesse relative au sujet n'intervient pas.

Un module permettant de calculer les températures et vitesses d'air sur chaque segment du corps a donc été créé, en supposant que ces variations n'interviennent que sur le sujet et non sur le bâtiment.

a) Stratification

Afin de prendre en compte des variations verticales de température d'air, nous avons fait l'hypothèse que, dans la zone qui nous intéresse (entre 0,05 et 1,7 m au-dessus du sol), la température est une fonction linéaire de la hauteur. Pour chaque segment, elle est calculée à mi-hauteur de celui-ci (Figure II.5).

$$T(H_i) = (\Delta T / \Delta H)(H_i - H_0) + T_a$$



- H_0 mi-hauteur de la pièce ($H_0 = H_p/2$)
- H_p hauteur sous plafond
- H_i mi-hauteur du segment i
- $T(H_i)$ température à la hauteur H_i
- T_a température moyenne de l'air dans la pièce
- $\Delta T / \Delta H$ gradient vertical de température d'air ; il est fonction du type de chauffage utilisé ; les valeurs employées sont expérimentales

Figure II.5 - Modèle de stratification de l'air

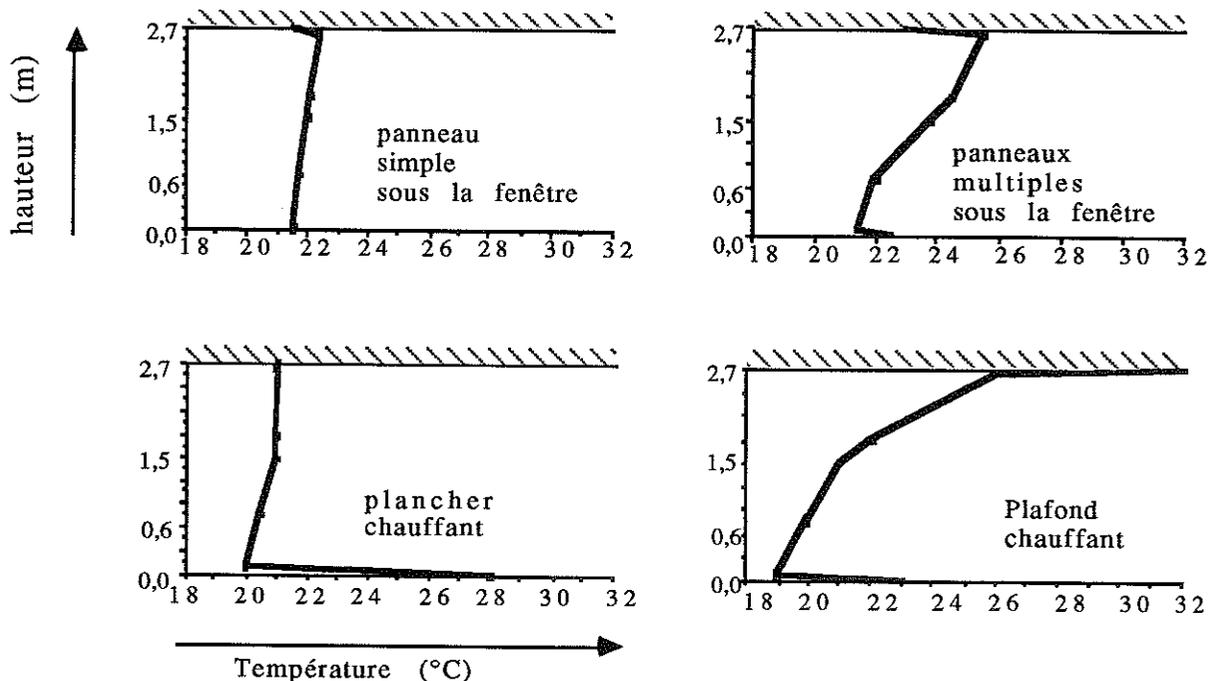


Figure II.6 - Profil vertical de température d'air au milieu de la pièce [117].

On peut constater sur les courbes de la Figure II.6 que, près du sol, la température varie rapidement, surtout dans le cas du plancher chauffant. La température d'air sur les pieds sera prise égale à la moyenne entre la température de surface du plancher (T_{sol}) et celle calculée à hauteur des pieds.

$$T_{(pieds)} = \frac{T_{H(pieds)} + T_{sol}}{2}$$

b) Vitesses d'air locales

La vitesse d'air sur chaque segment du corps dépend de la vitesse d'air moyenne dans la pièce, mais aussi des mouvements du sujet.

Nous avons adapté les résultats d'études réalisées par Nishi [77,80], qui a mesuré les coefficients de convection locaux pour diverses activités par sublimation de la naphthaline et en a déduit les variations de vitesse locales, dont les valeurs sont données dans le Tableau II.2. Ces résultats ont été établis pour une vitesse d'air dans le local de 0,15 à 0,2 m/s. Nous noterons V_M les vitesses dues à l'activité du sujet.

endroit du corps Activités	tête	poitrine	dos	biceps	avant-bras	mains	cuisse	mollets	Moy.
Debout	0,15	0,18	0,20	0,12	0,11	0,14	0,17	0,22	0,18
Assis	0,20	0,18	0,18	0,18	0,17	0,23	0,16	0,15	0,17
Marche tapis roulant									
0,89 m/s	0,34	0,36	0,29	0,41	0,43	0,32	0,46	1,04	0,42
1,35 m/s	0,40	0,40	0,37	0,52	0,82	1,38	0,77	1,46	0,76
1,80 m/s	0,54	0,55	0,50	0,66	1,07	2,05	1,02	1,82	1,06
Marche libre									
0,90 m/s	0,90	0,62	0,60	1,31	1,16	1,22	1,28	1,26	1,00
1,35 m/s	0,98	0,75	0,67	1,57	1,40	1,54	1,65	1,59	1,25
1,80 m/s	1,51	1,11	1,10	2,46	2,27	2,50	2,48	2,45	1,98
ergocycle									
0 tr/min	0,24	0,25	0,25	0,25	0,27	0,24	0,27	0,29	0,25
50 tr/min	0,25	0,28	0,24	0,26	0,24	0,22	0,66	0,95	0,40
60 tr/min	0,38	0,31	0,28	0,29	0,28	0,24	0,84	1,15	0,62

Tableau II.2 - Vitesse d'air en divers endroits du corps pour plusieurs activités

Sur la Figure II.7, nous avons tracé l'évolution des coefficients de convection en fonction des vitesses locales pour chaque endroit du corps. Les points correspondent aux données expérimentales de Nishi. Les courbes passant par ces

points sont de la forme : $h_c = h_0 V^\alpha$. On constate que $\alpha = 0,54$ ou $0,55$ pour tous les segments. Par contre, h_0 varie.

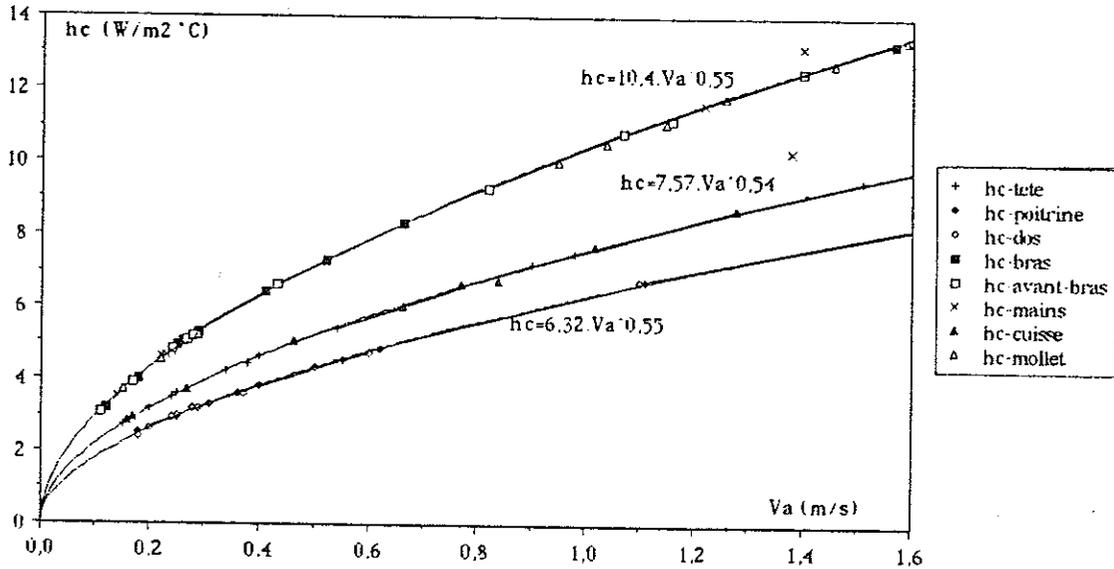


Figure II.7 - Variations de h_c en fonction de la vitesse d'air locale pour diverses parties du corps

Pour ces expériences, la division du corps ne correspond pas à celle du modèle. Par exemple, on distingue les cuisses et les mollets. Nous avons donc pris une valeur moyenne pour h_0 et pour la vitesse sur les jambes. Le Tableau II.3 est le récapitulatif des valeurs de $h_{0(i)}$ et $V_{M(i)}$ utilisées dans le modèle.

	Tête	Tronc	bras	mains	jambes	pieds	moyenne
$h_{0(i)}$	7,57	6,30	10,35	10,28	8,95	10,34	8,24
$V_{M(i)}$ 1	0,15	0,19	0,11	0,14	0,19	0,20	0,18
2	0,20	0,18	0,17	0,23	0,15	0,15	0,1
3	0,34	0,32	0,42	0,52	0,75	1,04	0,53
4	0,40	0,38	0,67	1,38	1,11	1,46	0,77
5	0,54	0,52	0,86	2,05	1,42	1,82	1,02
6	0,90	0,61	1,23	1,22	1,27	1,26	1,00
7	0,98	0,71	1,48	1,54	1,62	1,59	1,22
8	1,51	1,11	2,36	2,50	2,46	2,45	1,89
9	0,24	0,25	0,26	0,24	0,28	0,29	0,26
10	0,25	0,26	0,25	0,22	0,80	0,95	0,47
11	0,38	0,30	0,29	0,24	1,00	1,15	0,59

1 : Debout	marche tapis roulant	marche libre	ergo-cycle
2 : Assis	3 : 0,90 m/s	6 : 0,90 m/s	9 : 0 tr/min
	4 : 1,35 m/s	7 : 1,35 m/s	10 : 50 tr/min
	5 : 1,80 m/s	8 : 1,80 m/s	11 : 60 tr/min

Tableau II.3 - Coefficients h_0 et vitesses d'air locales $V_{M(i)}$ pour divers types d'activités

D'autre part, ces valeurs ont été établies pour une vitesse moyenne de 0,15 à 0,2 m/s. Nous avons donc suivi l'hypothèse donnée par Clark [18], qui considère que les vitesses sont additives, c'est-à-dire que la vitesse d'air relative sur un segment ($V_{rel(i)}$) est la somme de la vitesse moyenne dans le local V_a et de la vitesse due au mouvement $V_{M(i)}$:

$$V_{rel(i)} = V_a + V_{M(i)}$$

Dans le cas où le sujet a une activité non répertoriée dans le tableau ci-dessus, l'expression globale la plus courante [47,113] de la vitesse relative en fonction du métabolisme sera utilisée :

$$V_{rel} = V_a + 0,0052 (M - 58)$$

(M : métabolisme en W/m^2).

Après modification, l'expression des échanges convectifs est plus complète ; elle est de la forme :

$$C_{(i)} = h_{c(i)} (T_{sk(i)} - T_{a(i)}) \quad \text{avec } T_{a(i)} = f(T_a, H_i, \frac{\Delta T}{\Delta H})$$

et

$$h_{c(i)} = h_{0(i)} V_{rel(i)}^{0.55} \quad \text{avec } V_{rel(i)} = f(V_a, V_{M(i)}, M)$$

Cette décomposition de vitesse et température d'air peut permettre d'étudier l'effet d'un courant d'air local sur une partie du corps.

L'intérêt de cette modification sera mise en évidence au Chapitre III. et IV

II.3.2 . Le rayonnement

Les échanges radiatifs sont généralement calculés de manière globale, en prenant en compte dans les calculs la température moyenne de rayonnement (T_{mrt}), le plus souvent égale à la température de l'air ou à la température opérative.

Ceci ne peut être qu'une approximation valable pour un bilan global ou une ambiance très homogène. Il est peu probable qu'à température moyenne radiante égales, un logement comprenant un plancher ou un plafond chauffant ait le même effet sur le corps humain, surtout au niveau local.

Dans le modèle d'origine, le rayonnement était calculé sur chaque segment sous la forme linéaire:

$$R_{(i)} = h_{r(i)} (T_{sk(i)} - T_{mrt})$$

Les coefficients équivalents $h_{r(i)}$ de rayonnement ont été estimés dans des conditions proches de la neutralité. Dès que l'on s'en éloigne, l'erreur peut devenir importante.

Afin d'élargir la zone de validité du modèle et de prendre en compte les effets de parois non isothermes, le mode de calcul des échanges radiatifs a été changé. Pour cela, il a fallu adapter un programme déjà existant, créé au laboratoire, de calcul de rayonnement dans une enceinte fermée et vide [3,11]. Le sujet faisant "écran" entre les murs, nous avons modifié le programme en conséquence.

a) Description de la méthode de calcul

La méthode utilisée est celle de Monte-Carlo. Elle permet de calculer les facteurs de vue F_{ij} qui représentent la fraction de flux hémisphérique émis par une surface S_i et atteignent une surface S_j .

Il s'agit d'une méthode statistique où l'on considère que la surface S_i émet un nombre de photons N dans des directions aléatoires. Un nombre n_{ij} atteint alors la surface S_j .

Le nombre de photons émis N est le même pour chaque surface, mais une pondération proportionnelle à l'aire de la surface émettrice est appliquée à chaque photon engendré.

Certaines hypothèses sont faites lors du calcul :

- le milieu traversé est transparent, ne participe donc pas aux échanges ;
- les surfaces sont isothermes, opaques, grises, diffusantes en émission et réflexion ; leurs propriétés sont indépendantes de la direction des rayons et de leur longueur d'onde ;
- le flux incident est uniformément réparti sur la surface ;
- la distribution angulaire des photons suit la loi de Lambert.

On estime alors les facteurs de forme par la formule suivante, qui permet de respecter leurs propriétés :

$$(II.1) \quad F_{ij} = \frac{S_i n_{ij} + S_j n_{ji}}{S_i N + \sum_k S_k n_{ki}}$$

l'erreur absolue est :

$$(II.2) \quad \sigma_{ij} = \left(\frac{F_{ij}}{4N} \left(1 + \frac{S_i}{S_j} - 2F_{ij} \right) \right)^{1/2}$$

b) Description du sujet

Le programme existant ne permettant de traiter que des échanges entre surfaces planes, le sujet est assimilé à deux plans parallèles dos à dos, composés de 9 éléments chacun, comme l'indique la Figure II.8. Cette approximation est valable pour un homme debout, car on peut considérer qu'il est symétrique [58].

Le sujet est repéré dans la pièce par ses coordonnées x_0 et y_0 et l'angle qu'il fait avec l'axe des x . Il peut se déplacer et tourner au cours du temps lors des simulations.

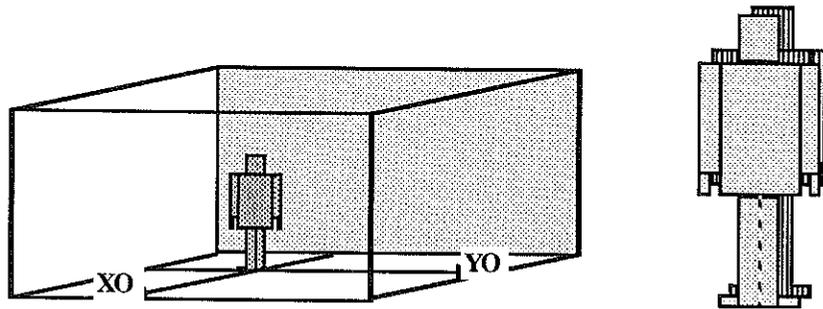


Figure II.8 - Schématisation de l'individu dans la pièce pour le calcul d'échanges radiatifs

La surface totale des deux plans représente 75 % de la surface réelle du corps, pour prendre en compte l'effet des parties du corps qui rayonnent vers d'autres; le facteur de surface effective rayonnante (voir paragraphe I.1.3.d).

Toutes les données géométriques du corps sont dans des fichiers qui peuvent être modifiés si le sujet change de posture.

Le calcul de rayonnement étant effectué sur 18 surfaces, il faut faire la somme des flux émis par chaque surface composant un même segment, afin d'avoir des données compatibles avec le modèle de Stolwijk. Les bras, par exemple, sont décomposés en 4 surfaces ayant la même température de surface, mais n'échangeant pas forcément le même flux avec l'ensemble du local. On a donc :

$$R_{\text{bras}} = R_{\text{bras1}} + R_{\text{bras2}} + R_{\text{bras3}} + R_{\text{bras4}} = \sum_{l=1}^4 R_{\text{bras}(l)}$$

c) Influence du sujet sur la pièce

Dans un premier temps, en vue de limiter la complexité des calculs et les temps de simulation, le bilan radiatif était effectué pour la pièce vide, puis un module calculait le flux intercepté par le sujet. L'influence du sujet sur la pièce n'était alors pas prise en compte.

Cette méthode ne s'est pas avérée satisfaisante pour plusieurs raisons [23,103] :

- d'une part, le bilan radiatif de l'ensemble n'était plus nul ; afin de conserver l'équilibre, il nous fallait ajouter les apports par rayonnement dus au sujet dans le bilan thermique global de la pièce ;

- d'autre part, dans le cas des ambiances froides où le sujet perd par rayonnement environ 50 % de la quantité de chaleur qu'il produit, cet apport sur les parois, même s'il est faible, suffit à en modifier les températures.

Cette méthode a donc été abandonnée au profit du mode de calcul complet, plus précis, prenant en compte toutes les influences réciproques.

d) Précision de la méthode

On peut remarquer, d'après l'équation (II.2) que l'erreur absolue varie en fonction du nombre de photons émis (N), mais aussi du rapport des surfaces S_j/S_i .

Dans notre cas, les mains, par exemple, ont une surface très petite par rapport aux murs : l'erreur peut être grande. L'estimation du facteur de vue converge vers la vraie valeur quand le nombre de photons émis tend vers l'infini. Il faut trouver un compromis entre la précision des résultats et un temps de calcul raisonnable.

En effet, si on place l'individu dans une position symétrique par rapport à une pièce ayant tous les murs à la même température, les flux échangés par les deux faces d'un même segment devraient être égaux.

Le Tableau II.4 donne les valeurs des flux nets échangés par les deux mains, en fonction du nombre de photons émis.

Nombre de photons émis	flux rayonné par chaque main		temps de calcul Mac II (h)
	(W)		
300	0,522	0,157	1/4
6 000	0,225	0,345	1
100 000	0,347	0,334	20

Tableau II.4 - Flux rayonné et temps de calcul pour différents nombres de photons émis

On constate que, pour 300 photons émis, les résultats sont très dissymétriques, donc l'erreur est grande. Par contre, pour 100 000 photons, on obtient des valeurs tout à fait comparables, mais le temps de calcul est très long.

Les facteurs de vue ne sont calculés qu'une fois par configuration géométrique, puis stockés dans un fichier ; on peut donc se permettre une bonne précision de calcul sans avoir des coûts de simulation trop élevés.

Par contre, si, au cours d'une même simulation, le sujet se déplace, à chaque position correspond une nouvelle configuration géométrique. Les calculs deviennent alors excessivement longs.

Il faudra donc limiter les déplacements et déterminer dans chaque pièce des positions caractéristiques de la zone d'occupation, où les zones critiques peuvent être particulièrement intéressantes : proximité de la surface froide ou chaude par exemple.

e) Influence de l'orientation du sujet

Afin d'avoir confirmation de la validité de la méthode, une comparaison a été faite entre les facteurs de forme calculés par le module et ceux lus dans les abaques établies expérimentalement par Fanger en 1970 [33].

La pièce utilisée mesure 5 m de long, 2,8 m de large et 2,6 m de haut. Deux orientations du sujet par rapport à la pièce ont été étudiées :

- perpendiculaire au grand mur (position 1),
- parallèle au grand mur (position 2).

Pour obtenir le facteur de vue (F_{sm}) sujet-mur, il a fallu utiliser les propriétés générales des facteurs de forme, car les calculs ne donnent que les facteurs segments corporels (i) - murs (F_{im}).

Si on considère que le sujet s est composé de n éléments, on obtient :

$$S_s = \sum_{i=1}^n S_i \quad F_{ms} = \sum_{i=1}^n F_{im}$$

$$S_s F_{sm} = S_m F_{ms} = \sum_{i=1}^n S_m F_{mi} = \sum_{i=1}^n S_i F_{im}$$

$$F_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i F_{im}}{S_s}$$

La Figure II.9 donne les orientations du sujet. La numérotation des murs, les facteurs de forme (F_{sm}) sont donnés dans le Tableau II.5.

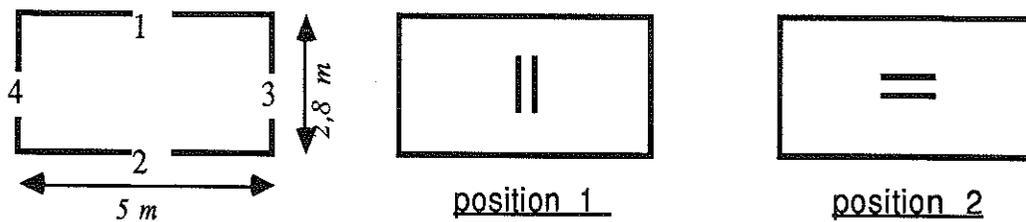


Figure II.9 - Orientation du sujet par rapport à la pièce

Surfaces de la pièce (m ²)		Mur 1 13	Mur 2 13	Mur3 7,28	Mur 4 7,28	Plancher 14	Plafond 14
Position 1	Abaques	0,20	0,20	0,10	0,10	0,24	0,16
	Monte-Carlo	0,179	0,164	0,117	0,116	0,279	0,145
Position 2	Abaques	0,25	0,25	0,07	0,07	0,22	0,14
	Monte-Carlo	0,242	0,280	0,053	0,035	0,240	0,150

Tableau II.5 - Comparaison des résultats de simulation avec les résultats expérimentaux.

On peut faire plusieurs remarques sur ces résultats :

* Si on compare les résultats murs 1 et 2, puis 3 et 4, on constate un manque de symétrie qui est dû au fait que les calculs ont été effectués avec 6000 tirages. L'erreur est donc assez importante.

* On constate, en comparant les résultats lus et calculés, dans les deux cas, que le calcul a tendance à favoriser les murs parallèles aux plans représentant le sujet, ce qui est normal, l'individu étant plat.

* Par contre, les facteurs de vue lus et calculés varient bien dans le même sens en fonction de l'orientation ; ceci apparaît nettement sur les facteurs sujet-mur. Il est plus difficile de tirer une conclusion pour le plafond et le plancher, car les variations entre les deux positions sont faibles par rapport aux incertitudes de calcul.

Bien que le facteur de forme entre un élément du corps et un mur ne puisse pas être vérifié, en l'absence totale de résultats expérimentaux, nous considérerons par la suite que la méthode de calcul utilisée offre une représentation correcte des phénomènes réels.

f) Influence de la position du sujet par rapport à une surface froide

Dans une même pièce ayant des murs à des températures différentes, il est évident que les flux échangés par un sujet varieront en fonction de sa position.

Une simulation a été effectuée au cours de laquelle l'individu se déplace. La pièce utilisée est en régime stable, avec 5 parois chaudes à 20°C et 1 paroi froide à 10°C (fenêtre) ; pour pouvoir comparer plus aisément les résultats, La température cutanée est maintenue uniforme à 33°C sur tout le corps.

La Figure II.10 donne les densités de flux émis par chaque segment corporel, pour trois positions du sujet par rapport à la fenêtre à laquelle il est parallèle.

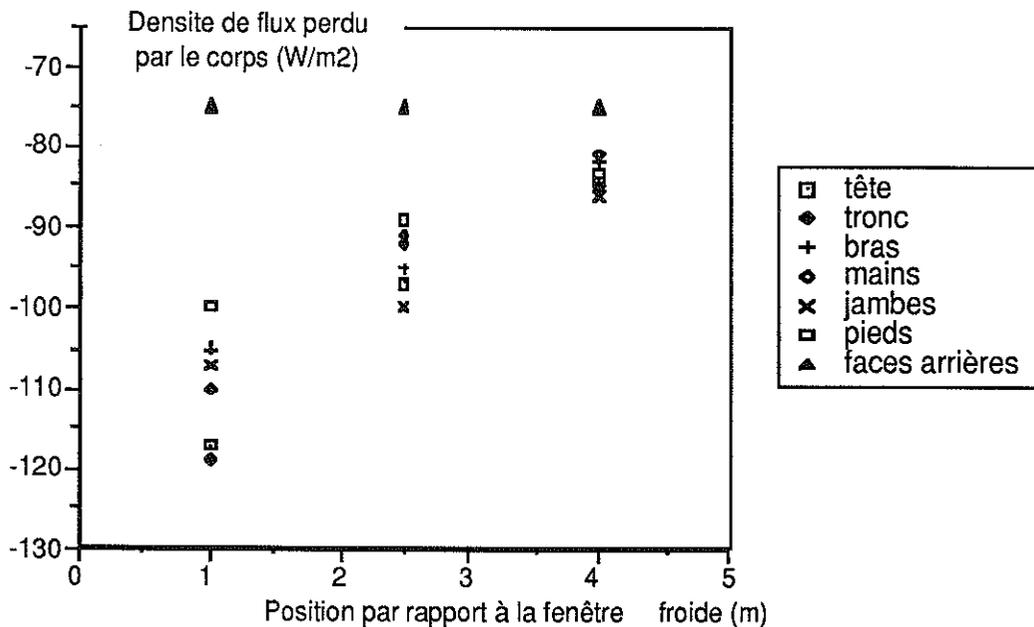


Figure II.10 - Flux rayonnés par les différentes surfaces composant le sujet (les faces avant sont celles faisant face à la fenêtre, les faces arrières ne voient que les murs)

On constate que, plus l'individu est près de la surface froide, plus l'écart entre les flux émis par les diverses parties du corps est grand. Ceci est dû au fait que, pour le tronc par exemple, le facteur de vue tronc-fenêtre croît quand le sujet se rapproche de la fenêtre. Par contre, pour les pieds, la différence est moins importante, car ils "voient" surtout le plancher.

Les faces arrières émettent le même flux quelle que soit la position du sujet, car elles ne "voient" que les murs chauds.

L'écart de flux émis par les deux faces d'un même segment est aussi à prendre en considération : en effet, à 1 m de la fenêtre, le tronc émet 118 W/m² vers la

fenêtre et 75 W/m^2 de l'autre côté. Dans ce cas, l'asymétrie de température de rayonnement ΔT_{mrt} (cf. Chap I.3.4a) est de 8°C , ce qui peut être ressenti comme désagréable par un certain nombre de personnes. Quand l'individu est au fond de la pièce, cette asymétrie n'est plus que de 2°C et ne sera, en principe, pas perçue.

Le module de rayonnement calcule ΔT_{mrt} au niveau de la tête, du tronc et des jambes. Il est important d'en tenir compte lors de la qualification des ambiances, car cette asymétrie est souvent une cause d'inconfort.

En ce qui concerne la pièce, les variations des flux échangés par les parois sont du même ordre de grandeur. L'effet est surtout marqué sur les deux faces parallèles à celle du sujet.

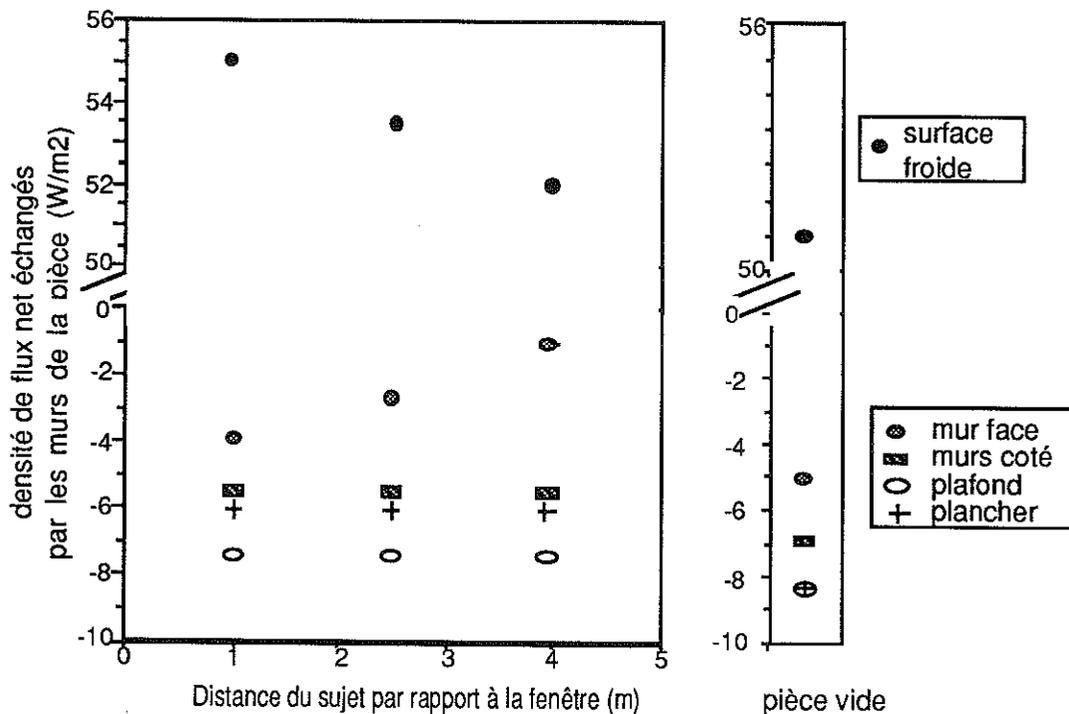


Figure II.11 - Flux rayonnés par les parois de la pièce.

(Les valeurs portées sur l'axe de droite correspondent à une pièce vide)

Sur la Figure II.11, les flux rayonnés par les différents murs sont reportés en fonction de la position du sujet. Ils sont comparés à ceux d'une pièce vide (sur l'axe de droite).

On note que la position du sujet n'a aucune influence sur les flux échangés par les murs latéraux ; par contre, sur la surface froide et celle lui faisant face, l'effet est plus marqué.

En conclusion, on peut noter que, dans le cas d'une pièce avec des murs non isothermes, la position du sujet par rapport aux parois a une influence non négligeable sur les flux qu'il échange avec celles-ci. Le sujet peut être à la neutralité dans certaines positions par rapport à la pièce, mais ressentir des inconforts locaux s'il se déplace vers la fenêtre.

II.3.3 . Les vêtements

Afin de pouvoir utiliser le modèle dans le domaine de l'habitat, où les sujets sont rarement nus, les vêtements ont été ajoutés de façon simplifiée. Nous avons supposé qu'il n'y a pas de couche d'air entre la peau et le tissu et que les transferts de masse et de chaleur sont découplés. Nous avons utilisé les équations de transfert en régime permanent décrites dans le Chapitre I.

De nombreux problèmes sont apparus, car toutes les caractéristiques des vêtements que l'on trouve dans la littérature sont globales ; elles ont en général été établies sur mannequin calorimétrique, avec l'hypothèse qu'un habit, quel qu'il soit, modifie le bilan thermo-hygrométrique global de l'individu. Or, nous nous intéressons aux bilans locaux. Les données partielles n'existent pas et nous avons dû faire diverses hypothèses afin de les déterminer.

Pour le facteur d'accroissement de surface (f_{cl}), qui est le plus souvent déterminé par des analyses photographiques de façon totalement empirique, il nous est impossible de déterminer sa valeur locale. Nous avons donc préféré faire l'hypothèse qu'il est toujours égal à un.

a) Les transferts de chaleur

Le vêtement se comporte comme une simple résistance thermique. On peut alors calculer la densité de flux de chaleur ϕ passant à travers les habits de façon locale.

$$\phi = \frac{T_{skl} - T_{c1l}}{R_{cl}} = C + R = h_c (T_{c1l} - T_a) + h_r (T_{c1l} - T_{mrt})$$

R_{cl} Résistance thermique locale des habits

T_{skl} Température cutanée locale

T_{c1l} Température locale de surface des habits.

Dans les simulations, le flux rayonné (R) est calculé par le module rayonnement ; on a alors:

$$\phi = \frac{h_c (T_{skl} - T_a) + R}{1 + R_{cl} h_c} \qquad T_{c1l} = \frac{T_{skl} + R_{cl} (h_c T_a - R)}{1 + R_{cl} h_c}$$

Il nous a fallu déterminer R_{cl} , car, l'isolation du vêtement est le plus souvent exprimée en Clo et représente une résistance équivalente répartie de façon homogène sur tout le corps.

Pour les chaussettes, par exemple, la variation du bilan thermique global du sujet est négligeable : la valeur de I_{cl} en Clo est donc faible (0,03 clo), car la surface recouverts est petite. Par contre, la modification du flux sur les pieds est importante ; la résistance locale R_{cl} est grande.

Afin de déterminer R_{cl} , diverses hypothèses ont dû être faites :

- le facteur d'augmentation de surface f_{cl} est égal à 1 ;
- le flux perdu par tout le corps recouvert d'une couche de vêtement uniforme de résistance thermique I_{cl} (Figure II.12, cas {1}) est égale au flux perdu à travers une portion μ recouverte d'un vêtement de résistance R_{cl} et une portion $(1-\mu)$ découverte (Figure II.12, cas{2}) ;
- la température cutanée est uniforme dans les deux cas : $T_{sk} = T_{skl}$

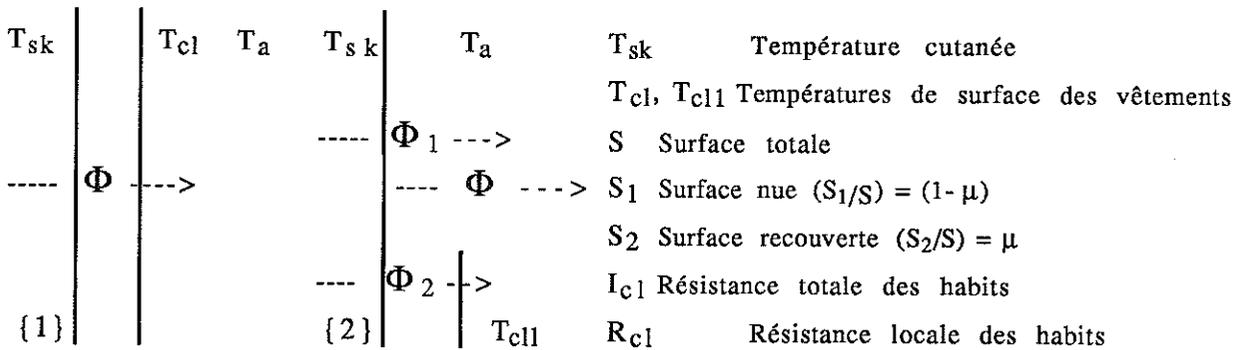


Figure II.12 - Schématisation de l'équivalence des échanges thermiques à travers les habits

$$\Phi S = \Phi_1 S_1 + \Phi_2 S_2 \quad \text{ou} \quad \Phi = \frac{\Phi_1 S_1}{S} + \frac{\Phi_2 S_2}{S} = (1 - \mu) \Phi_1 + \mu \Phi_2$$

$$\left| \begin{aligned} \Phi &= \frac{T_{sk} - T_{cl}}{I_{cl}} = \frac{T_{cl} - T_{op}}{I_a} = \frac{T_{sk} - T_{op}}{I_{cl} + I_a} \\ \Phi_1 &= \frac{T_{sk} - T_{op}}{I_a} \\ \Phi_2 &= \frac{T_{skl} - T_{c1l}}{R_{cl}} = \frac{T_{c1l} - T_{op}}{I_a} = \frac{T_{skl} - T_{op}}{R_{cl} + I_a} \end{aligned} \right.$$

avec : $I_a = 1/(h_c + h_r)$

On peut en déduire :

$$R_{cl} = \frac{I_{cl} I_a}{\mu I_a - (1 - \mu) I_{cl}} = \frac{I_{cl}}{\mu - (1 - \mu) \frac{I_{cl}}{I_a}}$$

Si on trace les variations de R_{cl} en fonction de I_{cl} pour diverses valeurs de μ , (avec I_{cl} et R_{cl} en clo avec $I_a = 0,7$ clo [88]), on obtient un réseau de courbes donné sur la Figure II.13. Afin de connaître le domaine de variation de R_{cl} , nous avons reporté dans ce diagramme des valeurs calculées de R_{cl} pour des couples de données (I_{cl}, μ) expérimentales établies par McCullough [65] pour divers vêtements.

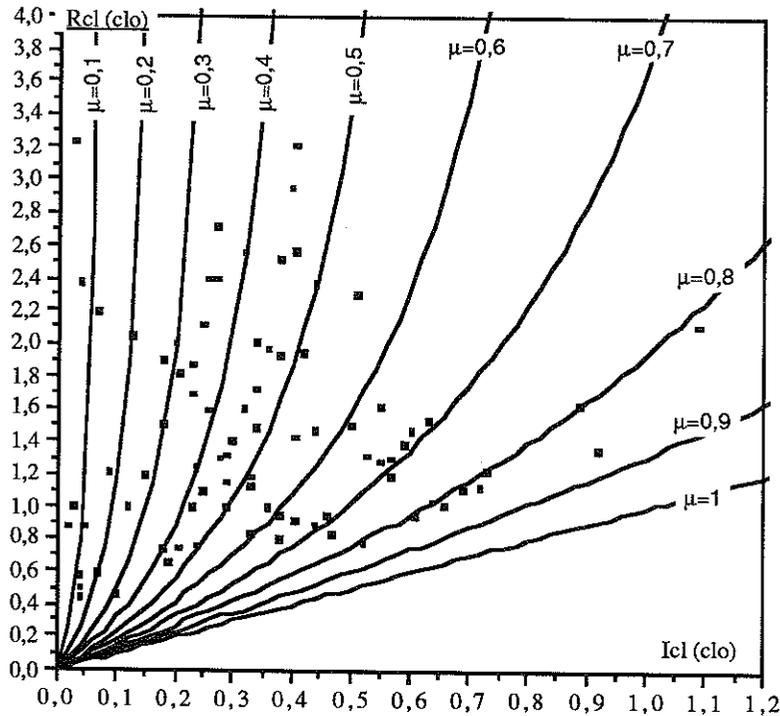


Figure II.13 - R_{cl} en fonction de I_{cl} pour diverses valeurs de μ
(Les courbes correspondent à l'expression théorique $R_{cl} = f(I_{cl}, \mu)$,
les points correspondent à des valeurs expérimentales de I_{cl} et μ)

Les points sont très dispersés ; ceci est dû au fait que les vêtements testés sont composés de matériaux différents. On peut tout de même remarquer que, pour la plupart des vêtements, R_{cl} est comprise entre 0,5 et 2,5 clo (0,08 et 0,4 $m^2 \cdot C/W$).

On peut remarquer que pour des valeurs élevées de I_{cl} et μ , l'incertitude sur la détermination de I_{cl} n'entraîne pas des variations importantes sur la valeur de R_{cl} . Par contre pour des faibles valeurs de I_{cl} ou μ , une très petite erreur sur I_{cl} peut entraîner de grandes incertitudes sur R_{cl} , car plus μ tend vers 0 plus la pente des courbes augmente.

Cette méthode permettant de déterminer la résistance locale R_{cl} peut donc être utilisée pour des vêtements assez isolants et recouvrant une partie importante du corps, (au moins 20%). Pour des faibles valeurs de I_{cl} ou μ , les résultats sont plus discutables.

L'étude détaillée des vêtements reste à faire. Quelques valeurs locales ont été établies par Nishi [81] et Berglund [6]. Par la suite, les valeurs de résistance locale utilisées dans les simulations seront données pour chaque cas.

b) Les transferts de masse

Le comportement des habits face à l'humidité est mal connu. Nous avons supposé que les propriétés des vêtements ne varient pas avec leur teneur en eau et celle de l'air extérieur ou sous-vestimental. L'habit se comporte comme une simple résistance à l'évaporation. Le cas des vêtements imperméables n'est pas pris en compte.

La présence des habits modifie l'évaporation maximum au niveau de la peau, qui devient alors :

$$E_{\max} = F_{pcl} h_e (P_{skl} - P_a) = \frac{L_w h_c (P_{skl} - P_a)}{1 + \frac{R_{cl} h_c}{i_L}}$$

P_{skl} Pression de vapeur saturante à la température T_{skl}

i_L perméabilité à la vapeur d'eau : est la même pour la plupart des habits ; nous l'avons fixée égale à 0.5 [6].

Il faut être conscient que cette représentation des vêtements est probablement loin de la réalité. Mais peu d'études locales existent actuellement. Ceci est dû au fait qu'un très grand nombre de paramètres interviennent dans la caractérisation des habits et que la plupart est difficile à cerner (taille des mailles de tissu lui-même, composition des fibres, forme du vêtement, ampleur par rapport au corps, etc.). D'autre part, une grande partie des études réalisées sur le confort thermique fait appel à un bilan global. Les études sur les inconforts locaux sont le plus souvent qualitatives et le besoin de connaître l'influence locale exacte des vêtements ne s'est, pour l'instant, pas fait sentir.

II.3.4 . Synthèse du modèle

Après modifications, nous avons rebaptisé le modèle MARCL (Modèle Ajustable pour la Recherche du Confort Local).

a) Vue d'ensemble

Le modèle est conçu pour pouvoir fonctionner en deux modes différents :

- soit dans sa forme d'origine, où l'environnement est caractérisé par des valeurs uniques de chaque variable (T_a , P_a , V_a , T_{mrt}) ; les calculs sont alors plus rapides, mais il faut supposer que l'environnement est homogène ;

- soit avec les données fournies par les autres modules de TRNSYS ; dans ce cas, l'ambiance peut être hétérogène. Les entrées sont alors plus nombreuses, car, pour chacun des six segments, il faut : la température et la vitesse de l'air, le flux rayonné ou la température moyenne de rayonnement. Nous avons fait l'hypothèse que la pression de vapeur était invariante dans l'espace.

On peut résumer, en donnant les paramètres et les entrées nécessaires à TRNSYS

Les Paramètres, qui sont constants au cours d'une simulation :

- | | | | |
|----------|--|--------|------------------|
| n° 1 | Mode de calcul : | 0 | modèle d'origine |
| | | 1 ou 2 | modèle modifié |
| n° 2 | Travail externe | | |
| n° 3 à 8 | Résistances thermiques locales des habits sur les 6 segments | | |
| n° 9 | Perméabilité des habits à la vapeur d'eau | | |

Les Entrées, qui varient au cours du temps :

- | | | | |
|------|-------------------------------|---|-------------------------|
| n° 1 | Métabolisme total | | |
| n° 2 | Pression de vapeur dans l'air | | |
| n° 3 | habillement : | 0 | si le sujet est nu |
| | | 1 | si le sujet est habillé |

** mode 0*

- | | | | |
|------|------------------------------------|--|--|
| n° 4 | Température moyenne de rayonnement | | |
| n° 5 | Température d'air | | |
| n° 6 | Vitesse d'air | | |

** mode 1 ou 2*

- | | | |
|------------|---------------|--|
| n° 4 à 9 | <i>mode 1</i> | Température de rayonnement pour les 6 segments |
| | <i>mode 2</i> | Flux net rayonné par les 6 segments |
| n° 10 à 15 | | Température d'air sur les 6 segments |
| n° 16 à 21 | | Vitesse d'air sur les 6 segments |

Les sorties : Toutes les grandeurs thermophysiques sont accessibles. A l'heure actuelle il y en a plus de trente, car le modèle est encore en phase d'étude : les températures locales et moyenne de la peau et des habits, les mouillures, les flux de chaleur échangés avec l'ambiance, les quantités d'eau évaporées, suées, instantanées et cumulées dans le temps.

b) Hypothèses et limites de validité des simulations

La simulation ne peut pas remplacer les expériences sur des sujets réels, mais elle permet de les compléter ou d'en limiter le nombre, en mettant en évidence de façon rapide les conditions pour lesquelles il risque d'y avoir des problèmes particuliers.

D'autre part, elle permet d'atteindre une meilleure compréhension des phénomènes locaux, tels que les transferts de chaleur de chaque partie du corps, qui ne sont pas mesurables au cours des expériences.

Pour utiliser correctement un modèle, il faut connaître les hypothèses sur lesquelles il a été bâti et les limites de sa validité. Certaines sont spécifiques aux modes de calcul et ont déjà été citées précédemment. Mais il est nécessaire de les rappeler et de les compléter.

* Le sujet

- L'individu est un homme moyen : 1.75 m, 74 Kg.
- Il ne présente pas de problèmes pathologiques
- Sa température interne n'a pas de variations circadiennes.
- Il ne s'alimente pas et n'a pas d'émotion forte.
- Il n'est pas acclimaté aux conditions auxquelles on le soumet.
- Il n'a pas de réaction de régulation comportementale donc ne change pas de posture ou de vêtements progressivement.
- Il peut passer de l'état nu à celui de vêtu de façon instantanée.
- Ses vêtements n'absorbent pas d'humidité et ne sont pas imperméables.
- Il est sur des semelles parfaitement isolantes.
- Il peut se déplacer au cours du temps d'un pas de temps sur l'autre
- Il n'est pas soumis directement au rayonnement solaire.
- Il se tient à une distance minimum de 5 cm de toutes les parois environnantes.

* L'habitat

- Chaque surface est à température homogène.
- L'air est en permanence parfaitement brassé et les apports de chaleur ou d'humidité sont immédiatement répartis dans le volume total de la pièce.
- Le soleil entrant dans la pièce est réparti uniformément sur le sol, le phénomène de tache solaire n'est pas pris en compte.

Un organigramme simplifié du modèle est donné sur la Figure II.14.

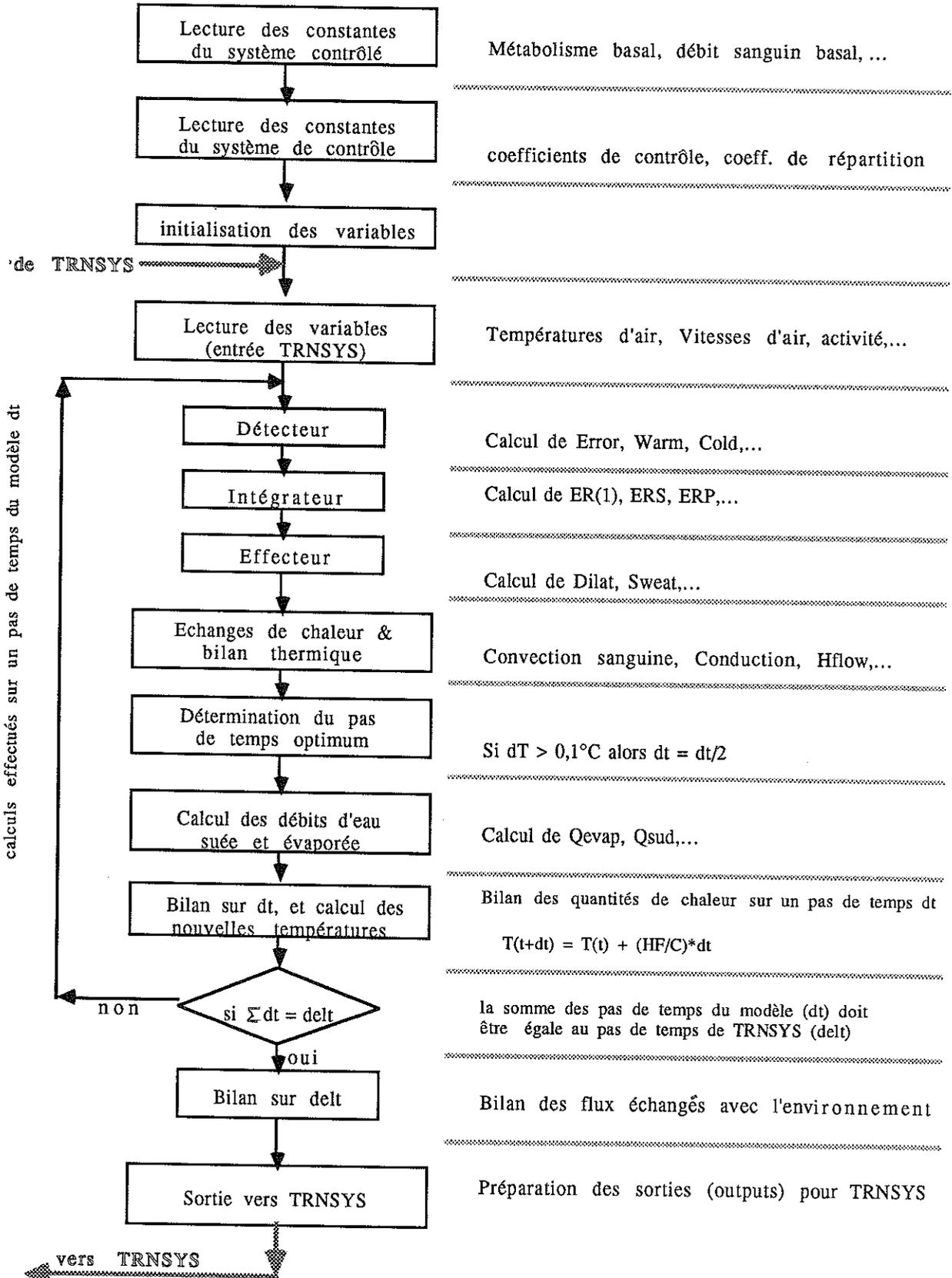


Figure II.14 - Organigramme simplifié du modèle.

Il s'agit là d'hypothèses et de limites générales, dues pour certaines au manque de connaissances (effet de l'acclimatement, par exemple) ou à des simplifications de modélisation. Par exemple, on pourrait parfaitement envisager un système dans lequel l'individu enlève progressivement ses vêtements.

On peut schématiser le couplage entre l'individu et son environnement thermique comme l'indique la Figure II.15.

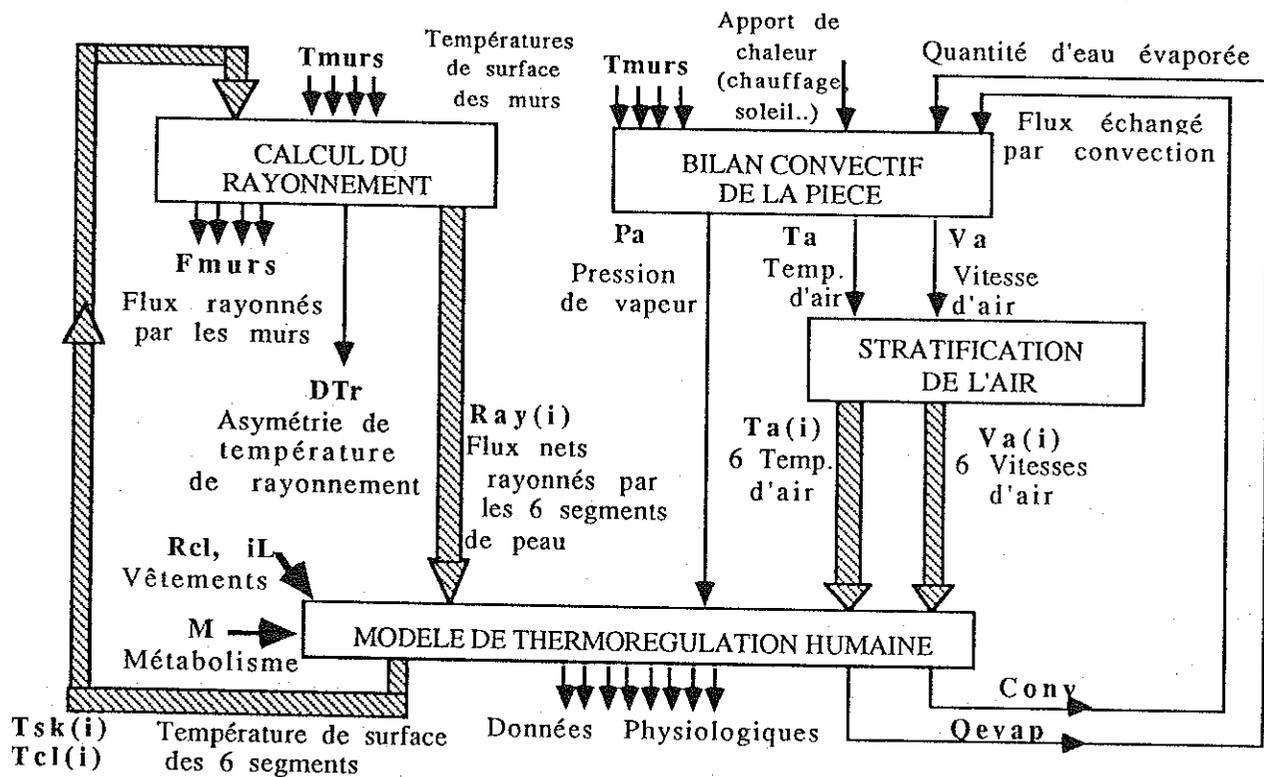


Figure II.15 - Schématisation du couplage entre MARCL et les autres modules de TRNSYS

D'après ce schéma, on peut voir que l'habitat a une influence directe évidente sur l'individu, et que, en retour, celui-ci intervient dans le bilan hygrothermique de la pièce.

CHAPITRE III

VALIDATION DU MODELE

III.1 . VALIDATION GLOBALE

Nous avons, tout d'abord, fait des comparaisons avec des résultats expérimentaux trouvés dans la littérature concernant le comportement thermique global d'un individu.

Le plus souvent, les résultats publiés ne sont pas exploitables, car le manque de précisions concernant le protocole expérimental ne nous permet pas de modéliser avec certitude la même configuration. On peut faire des hypothèses sur les valeurs des variables non connues, mais les comparaisons sont alors uniquement qualitatives.

III.1.1 . Variations des températures cutanées

De nombreux auteurs ont relié la température moyenne cutanée (T_{sk}) aux conditions ambiantes par des relations simples. La plupart d'entre eux donne une variation linéaire de T_{sk} en fonction de la température opérative. Le Tableau III.1. est un récapitulatif des principales expressions.

Auteurs	Equations	Domaine
Winslow & Gagge (1937)	$T_{sk} = 0,29 T_a + 0,15T_w + 21,5 (\pm 0,4)$	15-31°C
Fanger (1967)	$T_{sk} = 35,7 - 0,027 M$	-
Gagge, Stolwijk & Nishi (1969)	$T_{sk} = 24,85 + 0,32T_a - 0,00165T_a^{-2} (\pm 0,5)$	10-40°C, repos
	$T_{sk} = 25,5 + 0,25 T_a (\pm 0,8)$	10-40°C, repos
	$T_{sk} = 25,8 + 0,27 T_{op} (\pm 0,5)$	20-34°C, repos
Saltin, Gagge & Stolwijk (1970)	$T_{sk} = 22,2 + 0,39 T_a$	10-30°C, exercice
Houdas (1971)	$T_{sk} = 36,9 - 1,2 e^{(T_{op} - 35)/6,1}$	35-45°C, repos
Saltin & Gagge (1971)	$T_{sk} = 26,7 + 0,215 T_a (\pm 0,5)$	10-30°C, repos,
Saltin, Gagge, Stolwijk (1972)	$T_{sk} = 26,6 + 0,215 T_a (\pm 0,5)$	10-40°C
Candas (1974)	$T_{sk} = 27,0 + 0,208 T_a$	10-30°C, travail
Rublack & Schultz (1974)	$T_{sk} = 24,8 + 0,28 T_a$	10-50
Gonzalez, Nishi & Gagge (1975)	$T_{sk} = 29,55 + 0,196 T_{op} - 0,0183 M$	15-30°C, nu
	si $M = 58W/m^2$ $T_{sk} = 28,5 + 0,197 T_{op}$	
Davies (1979)	$T_{sk} = 21,7 + 0,30 T_a$	travail faible
	$T_{sk} = 19,6 + 0,37 T_a$	travail fort
Meyer (1981)	$T_{sk} = 28,65 + 0,18 T_a$	-

Tableau III.1. - Récapitulatif des principales expressions de la température moyenne cutanée

Nous avons fait une simulation afin de voir si le modèle fournit bien la même corrélation. La température de l'air et des murs varie lentement et simultanément, de manière linéaire de 1°C par heure ; la vitesse d'air est constante à 0,15m/s. La pression de vapeur correspond à une humidité relative de 50% à 28°C et ne varie pas.

Les résultats du calcul sont portés sur la Figure III.1 et comparés aux expressions données dans le tableau III.1 pour les conditions de repos.

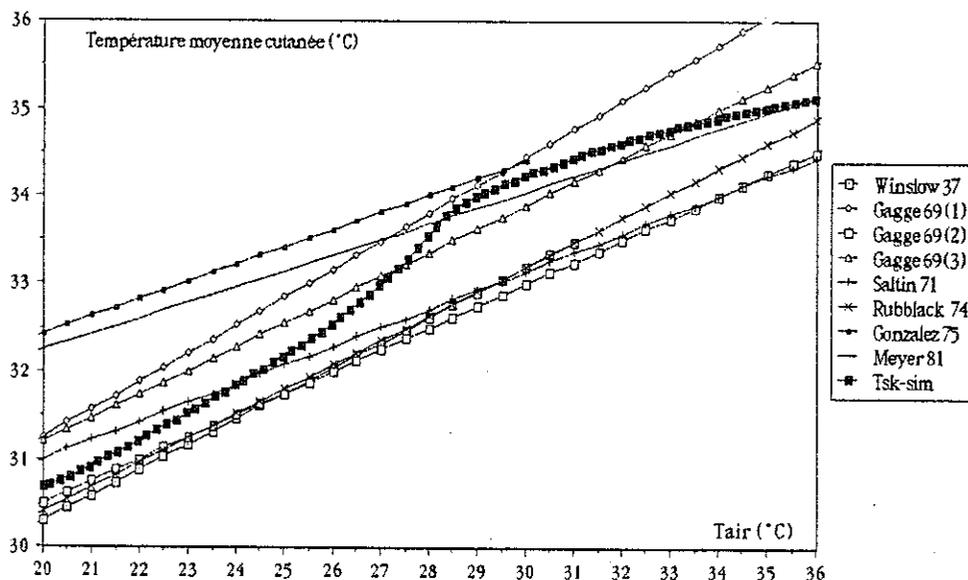


Figure III.1 - Variation de T_{sk} en fonction de la température opérative (T_{Op})

Nous avons déterminé la droite passant au mieux par nos résultats. L'expression obtenue est :

$$T_{sk} = 24,52 + 0,31T_a.$$

On constate un bon accord, compte tenu de la dispersion des résultats expérimentaux. Il faut noter que ces expressions sont valables pour un domaine très large, en général de 10 à 40°C, et qu'il faut plutôt les considérer comme donnant la variation globale de T_{sk} et non sa valeur ponctuellement exacte. De plus, les conditions dans lesquelles elles ont été établies ne sont pas toujours connues (métabolisme, vêtements, vitesse d'air, etc.)

Comme il a déjà été signalé, les auteurs n'utilisent pas tous la même expression pour calculer T_{sk} à partir des températures cutanées locales, ce qui peut modifier les résultats. Pour les températures d'ambiance basses, on a pu constater que les extrémités ont des températures beaucoup plus faibles que le reste du corps (cf. paragraphe I 1.5), et, si elles ne sont pas incluses dans le calcul, T_{sk} sera alors plus élevée.

En comparant les évolutions des températures cutanées locales données sur la Figure I.22 avec nos résultats, on peut noter sur la Figure III.2 que, pour la tête, les courbes sont confondues. Pour les autres segments, les évolutions sont comparables, mais les écarts de température atteignent dans certains cas 2°C. Nous verrons par la suite que cette différence est de l'ordre de grandeur des écarts entre individus, et qu'elle n'est donc pas forcément significative.

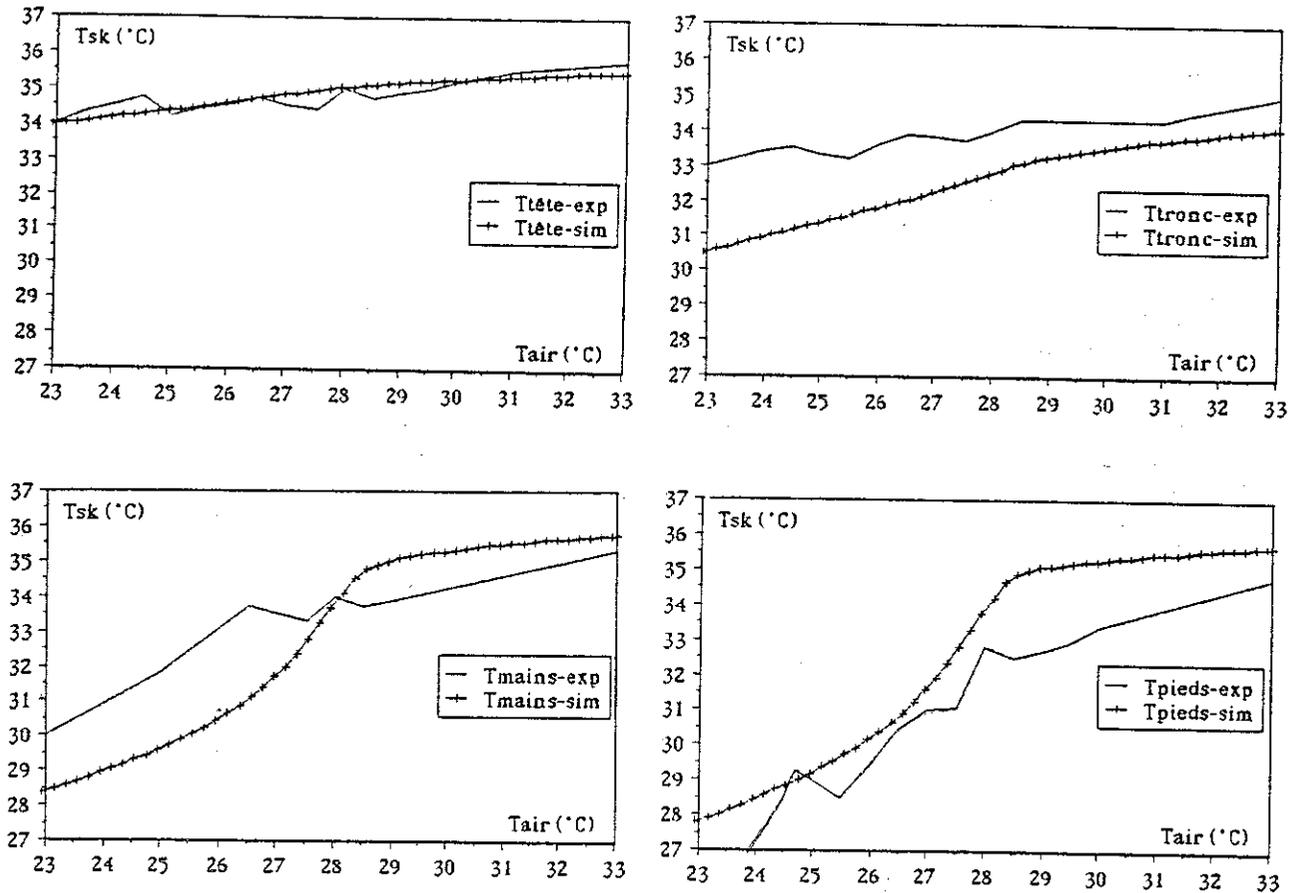


Figure III.2 - Comparaison des températures cutanées données par Hardy et le modèle, concernant la tête, le tronc, les mains et les pieds.

On remarque, sur les Figures III.1 et 2, que les courbes données par le modèle ont un point d'inflexion au voisinage de 28°C ; il s'agit de la neutralité qui marque le passage de l'état de lutte contre le froid à celui de lutte contre le chaud. Ce phénomène est mis en évidence si on observe les variations de flux échangés par le corps (voir Figure III.3).

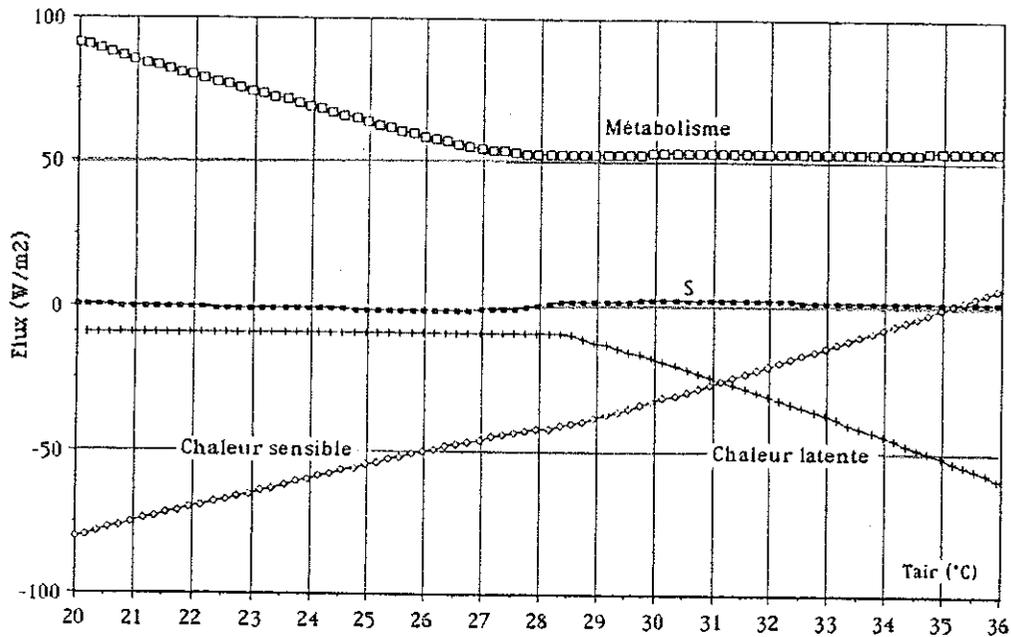


Figure III.3 - Quantités de chaleur échangées par tout le corps en fonction de la température d'air (T_{air})

Pour les ambiances froides, le métabolisme est élevé, car le sujet frissonne tant que T_{air} est inférieure à environ $27,5^{\circ}\text{C}$. L'évaporation, qui était basale jusqu'à $28,5^{\circ}\text{C}$, commence à augmenter lorsque T_{air} dépasse cette valeur. Entre ces deux températures, $27,5$ et $28,5^{\circ}\text{C}$ il n'y a pas de réactions thermophysiologiques ; il s'agit bien de la zone de neutralité. On peut noter que le bilan thermique (S) reste proche de 0, car les variations de température d'air sont très lente; le sujet est proche de l'état stable en permanence, et il est dans les conditions d'équilibre thermique où la régulation est possible.

III.1.2 . Différence verticale (tête-pied) de température d'air

Tanaka [101] a réalisé une série de 5 expériences, où les sujets sont soumis à des écarts de température d'air entre la tête et les pieds de -10 , -5 , $0,5$ et 10°C .

a) Conditions expérimentales

Après 40 minutes de repos dans une pièce à 25°C , les sujets entrent dans la chambre climatique. Ils sont assis dans une "boîte", séparant le corps en deux parties au niveau du ventre (Figure III.4).

Dans la partie haute, la température T_{ah} est égale à 15, 20, 25, 30 ou 35°C, selon les cas, et ne varie pas durant 90 minutes. La partie basse est toujours à la même température, correspondant à la neutralité. Au cours de toutes les expériences, les autres paramètres restent constants :

- métabolisme au repos : 41 W/m² (mesuré),
- vitesse d'air : $V_a = 0,45$ m/s,
- vêtements : $I_{cl} = 0,69$ clo,
- température d'air dans la partie basse :
 $T_{ab} = 25^\circ\text{C}$.

Le métabolisme, les températures rectale, tympanique et 10 cutanées locales (front, abdomen, bras, avant-bras, main, cuisse, mollet, cheville, doigt, orteil) sont relevés toutes les cinq minutes.

La température cutanée moyenne est calculée par l'expression de Dubois (cf. Chapitre I.1.5) en 7 points, sans tenir compte des températures des extrémités (doigts et orteils).

Les buts de cette expérience sont de déterminer les réactions physiologiques et psychologiques d'un sujet soumis à des températures différentes sur le haut et le bas du corps et de connaître la variation de température des parties non exposées lors de changements de climats sur d'autres endroits du corps. L'évolution dans le temps de la température du cou-de-pied est la seule à être donnée.

b) Conditions de simulation

Certains paramètres ne sont pas donnés. Nous avons supposé que :

- La température humide reste constante et égale à 17°C (soit, environ 50 % d'humidité relative à 25°C),
- Le tronc est partagé en deux ; on considère alors que la température d'air à ce niveau est égale à la moyenne entre la température en partie basse et haute :

$$T_{a(\text{tronc})} = \frac{T_{ah} + T_{ab}}{2}$$

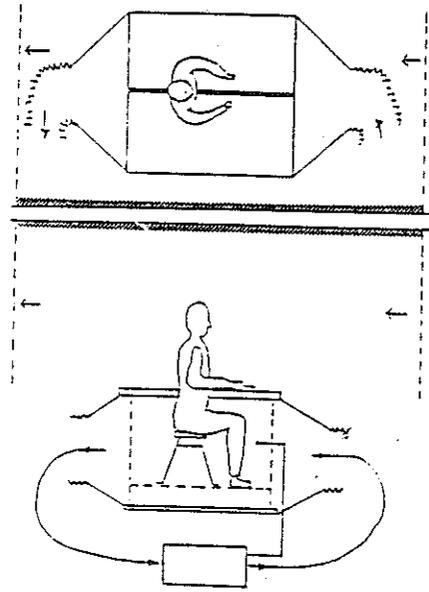


Figure III.4 - Position des sujets dans la "boîte" expérimentale

- La température de rayonnement sur chaque segment est égale à la température de l'air.
- Pour les résistances thermiques des vêtements, nous avons pris :
 $R_{cl}(\text{tronc}) = 0,155 \text{ m}^2\text{C/W}$; $R_{cl}(\text{bras}) = 0,14 \text{ m}^2\text{C/W}$; $R_{cl}(\text{jambes}) = 0,057 \text{ m}^2\text{C/W}$.

La tête, les mains et les pieds ne sont pas couverts.

c) Les résultats

* L'évolution dans le temps de la température cutanée des pieds est donnée sur la Figure III.5, où a) correspond aux résultats d'expériences et b) aux résultats de simulation.

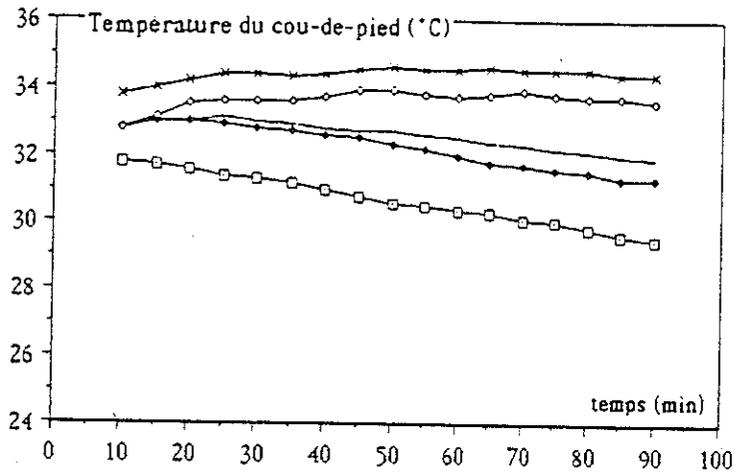
Pour T_{ah} égale à 30 et 35°C, nos résultats sont proches des courbes expérimentales ; par contre, pour T_{ah} égale à 15, 20 et 25°C, les différences sont importantes.

Ces écarts constatés pour les basses températures d'air sont dus, d'une part au fait que nous calculons la température moyenne des pieds, alors que les mesures correspondent au cou-de-pied qui est plus chaud que les orteils ; d'autre part, nos résultats montrent que, pour $T_{ah} = 15^\circ\text{C}$, le métabolisme a presque doublé par rapport au métabolisme basal, alors que les résultats expérimentaux donnent une augmentation de 20 à 25 %.

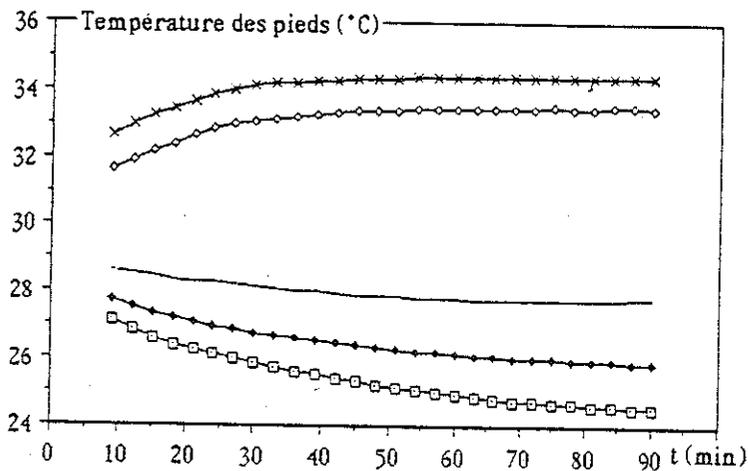
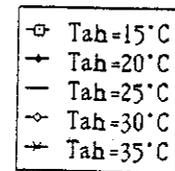
L'augmentation de métabolisme due aux frissons et la vasoconstriction sont commandées par les mêmes signaux d'erreur. La répartition des frissons est faible dans les pieds ; par contre, la vasoconstriction y est importante. Ces deux phénomènes ne font qu'accroître la baisse de température cutanée des pieds.

Sur la Figure III.5, on peut noter que les températures des pieds ne varient plus en fin d'exposition, dans le cas où $T_{ah} = 30$ et 35°C ; on peut donc supposer que le sujet a atteint le régime stable. Par contre, pour $T_{ah} = 15, 20$ et 25°C, les températures continuent à décroître ; le sujet n'a pas atteint l'équilibre thermique.

On retrouve ces deux phénomènes sur les courbes b) données par le modèle.



a) Résultats d'expériences



b) Résultats du modèle

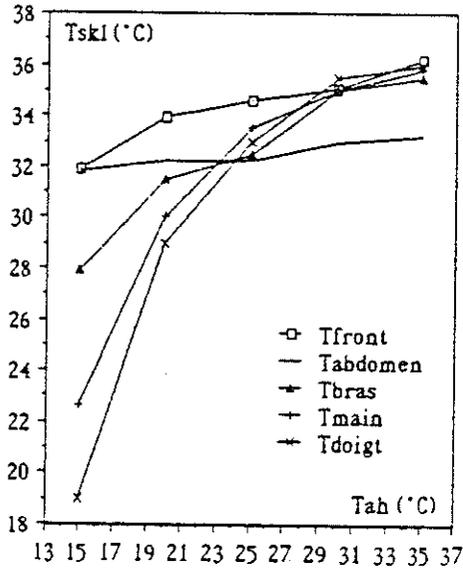
Figure III.5 - Evolution de la température des pieds au cours du temps

* En fin d'exposition, après 90 minutes, on peut représenter les températures cutanées locales des diverses parties du corps en fonction de la température d'air en partie haute (Figures III.6 et III.7).

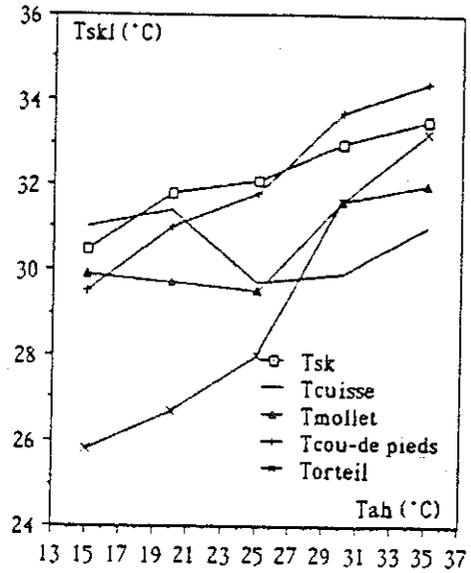
Il apparaît nettement sur la Figure III.6 des différences entre les température des divers points d'un même segment. Pour $T_{ah} = 15^{\circ}\text{C}$, il y a plus de 3°C d'écart entre le cou-de-pied et les orteils. Il en est de même pour les mains et les doigts.

Etant donné que le domaine de variation des températures est assez large, nos résultats de calculs sont tout-à-fait comparables aux expressions, compte tenu des remarques précédentes. Les écarts entre les températures moyennes cutanées sont d'environ 1°C , ce qui n'est pas significatif.

Seules les températures des jambes calculées et expérimentales diffèrent.

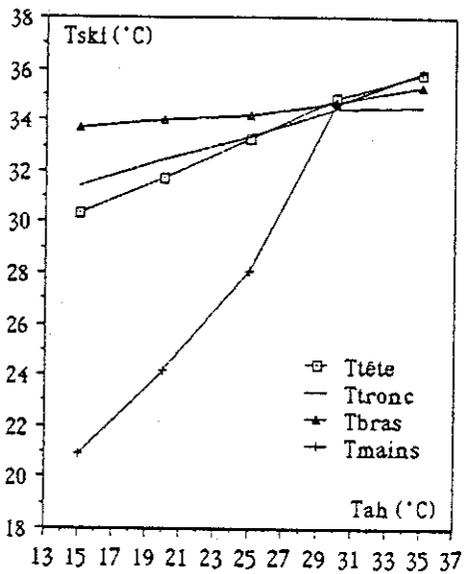


a) Parties hautes du corps

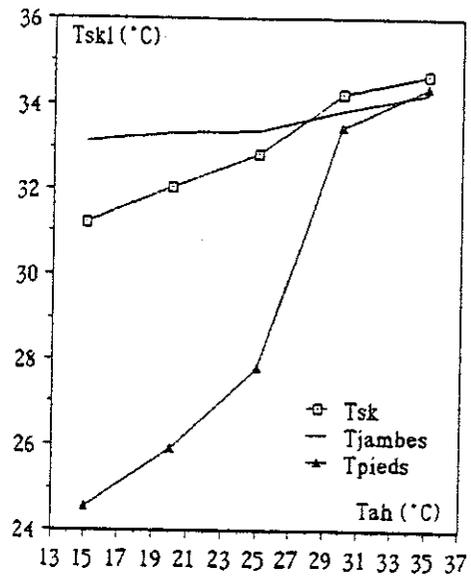


b) Parties basses du corps

Figure III.6 - Températures cutanées en fonction de T_{ah} (Résultats d'expériences)



a) Parties hautes du corps



b) Parties basses du corps

Figure III.7 - Températures cutanées locales en fonction de T_{ah} (Résultats de simulation)

Il faut noter que ces conditions sont très particulières et que nous avons dû faire des suppositions sur les variables non connues. Par exemple, nous avons pris une température moyenne de rayonnement égale à celle de l'air, mais, en fait, il est peu probable que la partie supérieure de la "boîte" ait une face à 15°C et l'autre à 25°C. Il existe donc des erreurs importantes au niveau du calcul des échanges radiatifs, qui représentent environ 40 % des pertes totales de chaleur dans le cas où $T_{ah} = 15^\circ\text{C}$. Ces incertitudes peuvent expliquer les différences observées.

III.1.3 . Inertie thermique et régime transitoire

Afin de mettre en évidence l'inertie thermique du corps, nous avons fait les simulations suivantes : le sujet subit une augmentation, puis une diminution progressive de température.

Les températures de l'air et des murs varient simultanément de 1°C/h, 4°C/h et 16°C/h, entre 20 et 36°C, les autres paramètres restant constants :

$$V_a = 0,1 \text{ m/s} ; T_a = T_{\text{murs}} = T_{\text{mrt}} = T_{\text{Op}} = 15^\circ\text{C} ; M = 58 \text{ W/m}^2 ; I_{\text{cl}} = 0 \text{ clo.}$$

La température de rosée T_{dp} choisie est basse, afin de ne pas limiter l'évaporation.

La Figure III.8 donne l'évolution des températures cutanées moyennes dans les trois cas (les flèches indiquent le sens de parcours). Plus dT_{Op}/dt est élevé, plus les valeurs de T_{sk} s'éloignent des valeurs correspondant à l'état d'équilibre.

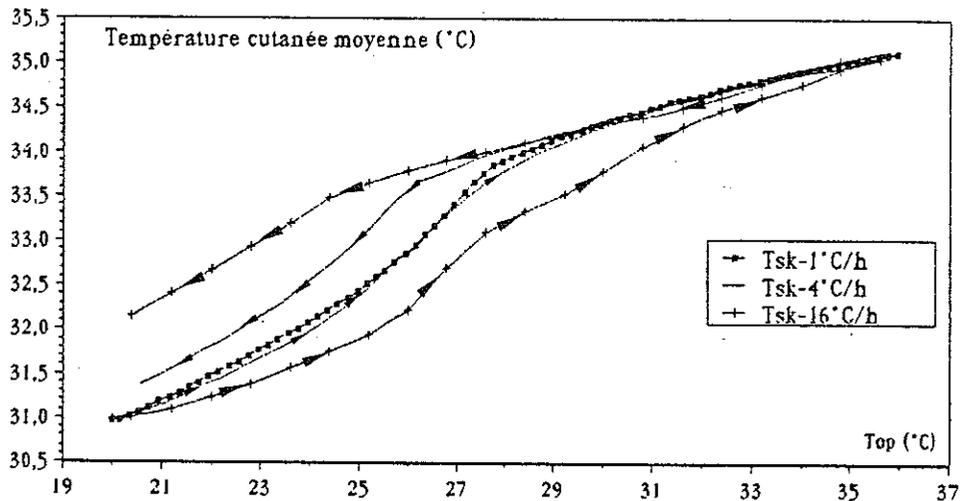


Figure III.8 - Températures cutanées moyennes T_{sk} en fonction de la température opérative pour différentes vitesses de variation de T_{Op} ($dT_{\text{Op}}/dt = 1^\circ\text{C/h} ; 4^\circ\text{C/h} ; 16^\circ\text{C/h}$)

Au début de la simulation, avant de faire varier la température opérative, le sujet est resté 1 heure à 20°C pour atteindre la stabilité. La vasoconstriction au niveau de la peau se traduit par un apport de chaleur faible en surface, d'où une température cutanée basse. D'autre part, les frissons provoquent une augmentation de la production de chaleur et du débit sanguin dans les muscles. Ces deux phénomènes entraînent une différence de température importante entre le centre et la surface du corps.

Lorsque la température opérative augmente, la peau se réchauffe progressivement et les frissons diminuent ; puis, après un passage à la neutralité, la sudation commence. Plus l'évolution de T_{Op} est rapide, plus les réactions requises pour faire face à l'ambiance se déclenchent tardivement. On peut constater cet effet sur les quantités de chaleur produites et échangées par le corps sur la Figure III.9. On constate que le bilan thermique S est toujours positif lors de la montée de T_{Op} . Les échanges sensibles ne sont pas montrés, car ils sont uniquement liés à l'écart de température entre l'ambiance et la peau et non aux réactions physiologiques.

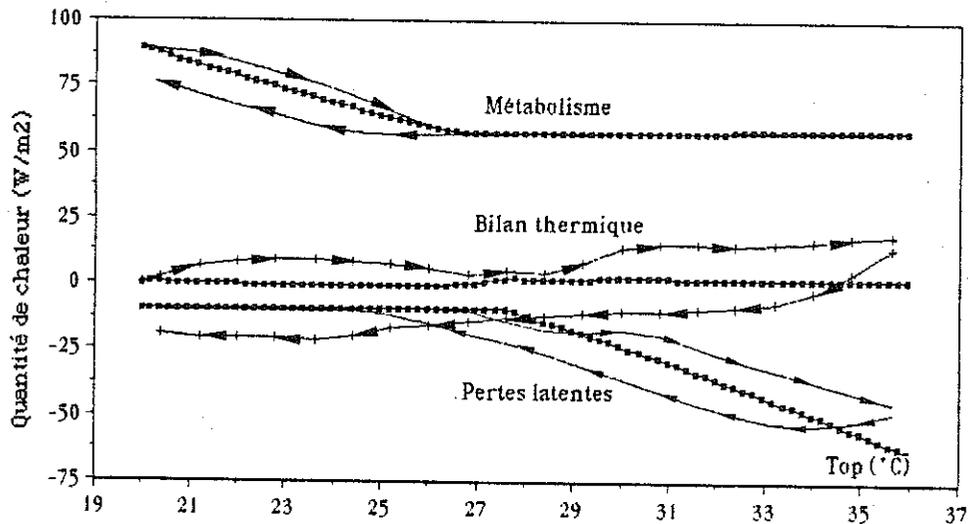


Figure III.9 - Quantités de chaleur produites et échangées par le corps en fonction de la température opérative

Lorsque T_{Op} décroît, on peut observer les mêmes phénomènes de retard de variation des températures cutanées et de quantités de chaleur. Ceci apparaît nettement sur la Figure III.9 : on peut constater que les frissons, pour $dT_{Op}/dt=16^{\circ}C/h$ apparaissent pour une température opérative de $1,5^{\circ}C$ plus basse que lorsque $dT_{Op}/dt = 1^{\circ}C/h$. Un autre phénomène vient s'ajouter dans ce cas : bien que le pouvoir évaporatoire de l'air soit élevé, la quantité d'eau suée n'est pas évaporée instantanément en totalité.

La Figure III.10 montre les légers décalages dans le temps entre les maxima des courbes représentant T_{Op} , la sudation et l'évaporation. Il faut noter que les réactions ne se déclenchent pas pour des températures cutanées égales, car, dans la régulation, la température interne joue un rôle important et elle ne varie pas aussi rapidement que les températures cutanées.

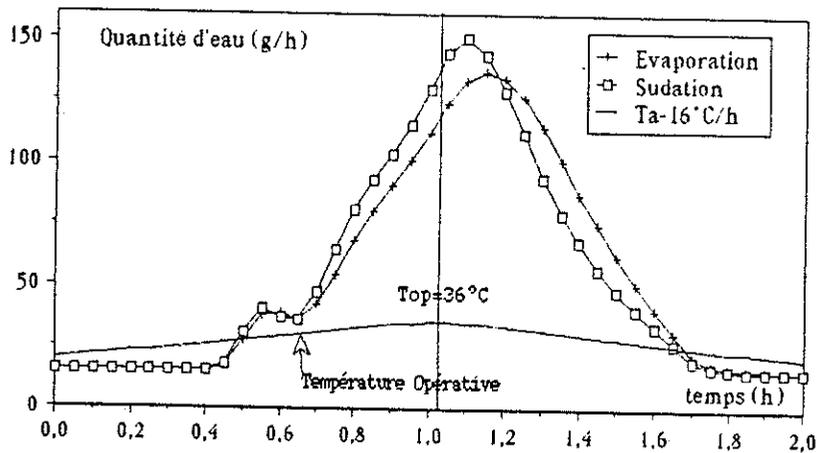


Figure III.10 - Evolution des quantités d'eau suée et évaporée au cours du temps

Dans le cas où la température opérative varie lentement, le sujet est en permanence proche de l'état stable. Dans ce cas, il existe une zone de neutralité où il n'y a pas de réaction physiologique. Par contre, lorsque T_{OP} varie rapidement, le sujet est en permanence en régime dynamique. Il n'y a pas réellement de zone de neutralité ; il est probable qu'un individu soumis à ce type de variations n'aura jamais une sensation de confort.

III.2 . VALIDATION FINE

Dans le cadre d'un contrat sur le confort thermique liant notre Laboratoire au Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales (L.P.P.E.) de Strasbourg, ce dernier a réalisé une étude bibliographique pour déterminer les valeurs des paramètres physiologiques associés à la sensation de confort ou d'inconfort. Un récapitulatif de ces résultats est donné dans l'Annexe I.

Afin de valider de façon plus fine notre modèle, nous l'avons comparé à des expériences réalisées au L.P.P.E., pour lesquelles il était possible d'avoir des données plus précises.

Nous analyserons les deux groupes d'expériences suivants :

- des conditions proches de la neutralité,
- des conditions extrêmes.

Toutes les expériences ont eu lieu dans des chambres climatiques, où le climat est parfaitement contrôlé. Il existe deux chambres de tailles différentes, mais dont le principe de fonctionnement est le même :

chambre 1 : $L = 3,9 \text{ m}$; $l = 1,6 \text{ m}$; $h = 2,5 \text{ m}$

chambre 2 : $L = 5,0 \text{ m}$; $l = 2,8 \text{ m}$; $h = 2,6 \text{ m}$

En régime stable, les conditions sont réglables dans les gammes de valeurs suivantes :

- température de l'air de 7°C à 55°C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$),
- température de rosée de 4°C à 35°C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$),
- vitesse d'air de 0,2 à 1,2 m/s ($\pm 1\%$),
- température des parois de 4°C à 75 °C ($\pm 1^\circ\text{C}$).

En régime dynamique, la température d'air peut varier de $\pm 20^\circ\text{C}$ en moins de 6 minutes.

La vitesse d'air est assez élevée pour permettre un bon contrôle des températures et l'homogénéité des températures dans la pièce. L'air est soufflé et extrait par les deux parois opposées ayant la plus petite surface, composées d'un matériau fibreux.

La température des murs et celle de l'air peuvent varier indépendamment l'une de l'autre dans la chambre 2. Il faut noter que les deux murs de soufflage et d'extraction sont toujours à la température de l'air ; lorsqu'on parle de température des murs, il s'agit uniquement des deux parois latérales les plus grandes, du plancher et du plafond.

Les chambres sont équipées d'une balance permettant d'enregistrer en permanence le poids des sujets, afin de calculer les pertes d'eau par évaporation.

Les conditions et les résultats d'expériences seront décrits de façon détaillée dans chaque cas, en ce qui concerne les paramètres physiques et physiologiques. Nous parlerons peu des conclusions psychologiques auxquelles elles ont abouti, car cette analyse n'est plus de notre domaine.

III.2.1 . Les conditions proches de la neutralité

Ces expériences ont été réalisées par le groupe Psychologie, il y a quelques années. Le but de cette étude était donc différent du notre, ce qui explique le peu de relevés physiologiques. Ils s'agit de quatre expériences, chacune ayant été réalisée sur six sujets.

a) Conditions expérimentales

Les sujets sont par groupes de trois dans la chambre climatique 1. La vitesse d'air, la température de rosée et l'activité restent les mêmes pour les quatre expériences. Pour les deux premières, les sujets sont nus ; pour les deux autres, ils sont habillés ($I_{cl} = 0.6 \text{ clo}$).

Après une période de neutralité thermophysique à température T_{neu} , la température de l'air et des parois varie simultanément toutes les 8 minutes par palier de 2°C, durant 160 minutes, suivant le schéma A ou B représenté sur la Figure III.11.

Le Tableau III.1 donne les conditions vestimentaires, les températures de neutralité, ainsi que les températures du maximum (T_{max}) et du minimum (T_{min}).

nom de l'expérience	habits clo	Type de variation	T_{neu}	T_{max}	T_{min}	T_{dp}
NU-A	0	A	28,8	36,8	20,8	17
NU-B	0	B	28,8	36,8	20,8	17
VET-A	0,6	A	25,3	33,3	17,3	14
VET-B	0,6	B	25,3	33,3	17,3	14

$T_a = T_{murs}$
 Vitesse d'air constante
 $V_a = 0.25\text{m/s}$
 Sujets assis au repos
 $M = 60\text{ W/m}^2$

Tableau III.1 - Noms et conditions d'expériences

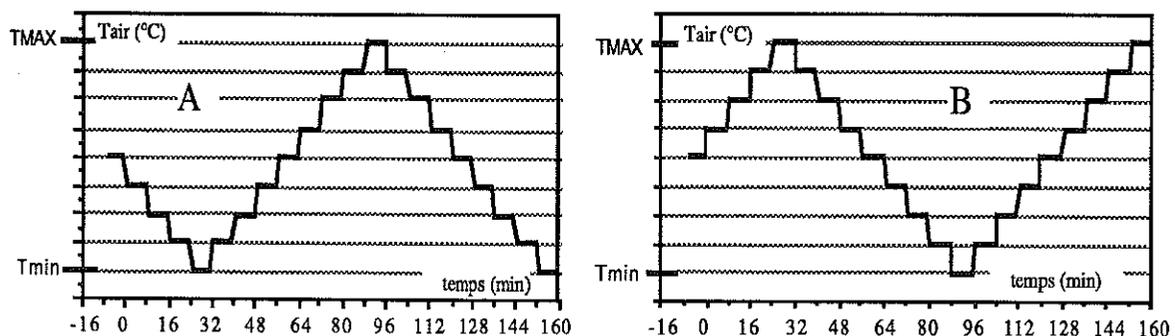


Figure III.11 - Types de variation des températures opératives

La température rectale et quatre températures cutanées locales (bras (1), tronc (2), cuisse (3), mollet (4)) ont été enregistrées. La température moyenne cutanée calculée d'après la formule de Ramanathan :

$$T_{sk} = 0,3 T_{tronc} + 0,3 T_{bras} + 0,2 T_{cuisse} + 0,2 T_{mollet}$$

Les sujets portent un jugement sur le climat en répondant à des questionnaires selon deux échelles :

- thermosensoriel en 7 points : très chaud,, très froid
- affective en 7 points : très agréable,, très désagréable.

Toutes les paramètres sont relevés en fin de chaque palier, c'est-à-dire toutes les 8 minutes.

La Figure III.12 donne la température de l'air mesurée au cours des expériences. On peut constater que, entre deux paliers la variation de température est très rapide, de l'ordre de la minute.

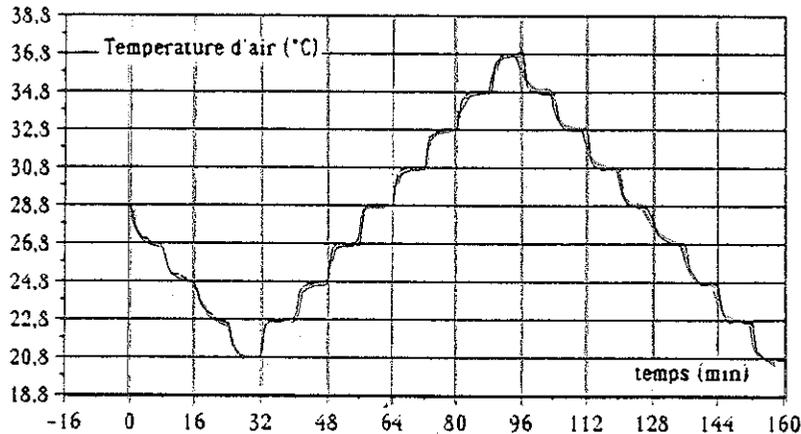


Figure III.12 - Température d'air au cours du temps mesurée lors des expériences

Nous avons donc reproduit les mêmes conditions ambiantes. Afin de nous rapprocher le plus possible des conditions d'expérience, nous avons considéré que les changements de température entre deux paliers ne sont pas immédiats, mais que, durant 1 minute, la température varie linéairement avant de se stabiliser durant 7 minutes. Le pas de temps de calcul est de 1 minute, mais nous n'avons sorti les résultats que toutes les 4 minutes.

Dans les expériences, les sujets sont par groupes de trois, mais le modèle ne permet de s'intéresser de façon précise qu'à un sujet. Il est nécessaire de vérifier que la présence de deux autres personnes ne modifie pas les échanges avec le milieu ambiant.

Influence de la présence de plusieurs occupants

Deux simulations ont été effectuées avec respectivement 1 et 3 sujets dans le local, afin de comparer les pertes radiatives. Le sujet B au centre du local est composé de 18 surfaces, telles qu'elles ont été décrites dans le chapitre précédent. Les sujets A et C sont alignés sur une diagonale de part et d'autre de B. Nous les avons représentés chacun par trois surfaces planes comme l'indique la Figure III.13. La température de surface des trois sujets est homogène, constante et égale à 33°C.

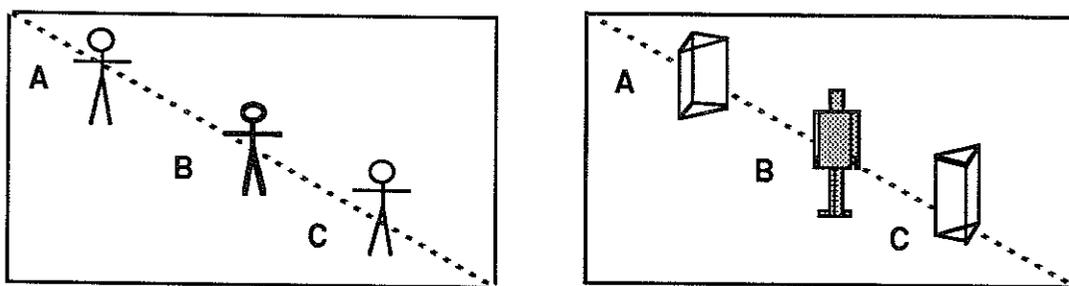


Figure III.13 - Position des sujets lors des expériences et schématisation lors de la modélisation.

En considérant le sujet central B, on constate que sa température moyenne de rayonnement augmente de 0,3 degré avec la présence des sujets A et C, alors que ses pertes radiatives diminuent d'environ 6 %. Ces variations sont de l'ordre de grandeur des incertitudes liées à la méthode de calcul utilisée et ne sont donc pas significatives.

Il faut noter que les sujets ont la même température de surface, donc les flux nets échangés entre eux par rayonnement sont nuls. La variation de flux est uniquement due au fait que les sujets A et C font "écran" ; ils cachent partiellement les murs pour le sujet B.

La température des murs est régulée : le renouvellement d'air élevé permet de contrôler l'humidité et la température de l'air et d'éliminer les quantités d'eau et de chaleur dégagées par les trois individus.

L'augmentation du nombre de surfaces accroît considérablement les temps de calcul. Par la suite, le sujet étudié est donc supposé être seul dans le local. Cependant, cette approximation n'est valable que dans ce cas d'expérience. Il faut noter que, dans le cas d'une pièce moins ventilée, ou moins bien régulée, la présence de deux personnes supplémentaires influencerait davantage l'évolution thermique et hygrométrique de l'ensemble du local.

b) Comparaison des résultats

Nous n'analyserons pas en détail tous les résultats des quatre expériences, mais il est tout de même intéressant d'en observer une de façon plus approfondie. Nous nous attacherons à l'expérience NU-A, qui est décrite en détail dans l'Annexe II.

Il faut bien noter que les différences inter et intra-individuelles sont importantes et que, trop souvent, les résultats sont donnés sous forme de moyenne sur plusieurs individus des températures cutanées moyennes. On s'aperçoit que ce type de présentation est commode, mais elle peut masquer totalement la réalité de certains phénomènes.

On peut alors donner deux types de représentation, soit comme l'indique la Figure III.14, où les résultats de tous les individus sont donnés, soit comme l'indique la Figure III.15 où on donne uniquement la moyenne des températures de tous les individus, encadrée par les écarts inter-individuels maximums.

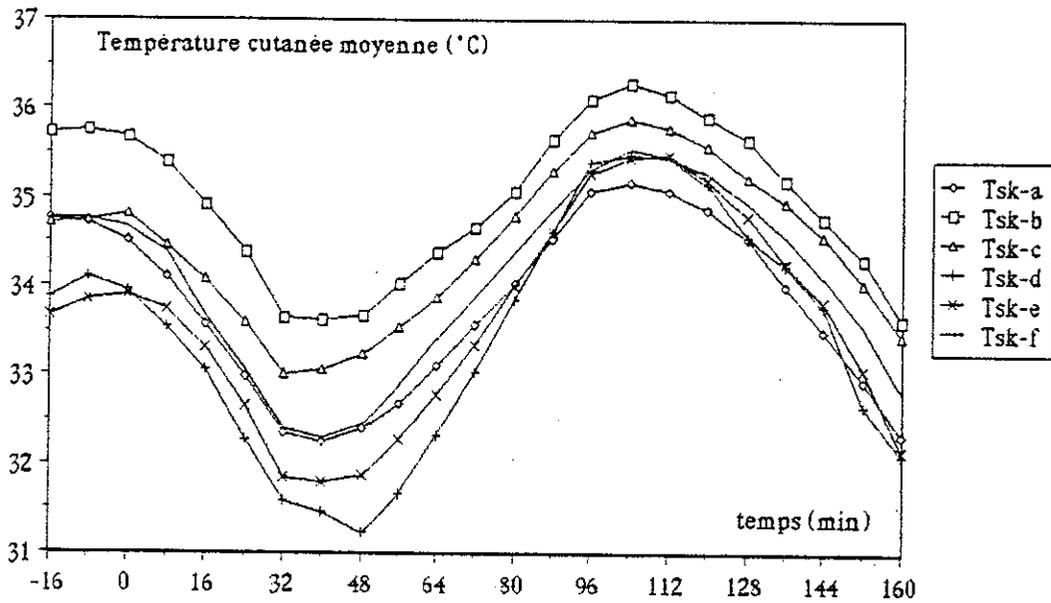


Figure III.14 - Température cutanée moyenne des 6 sujets

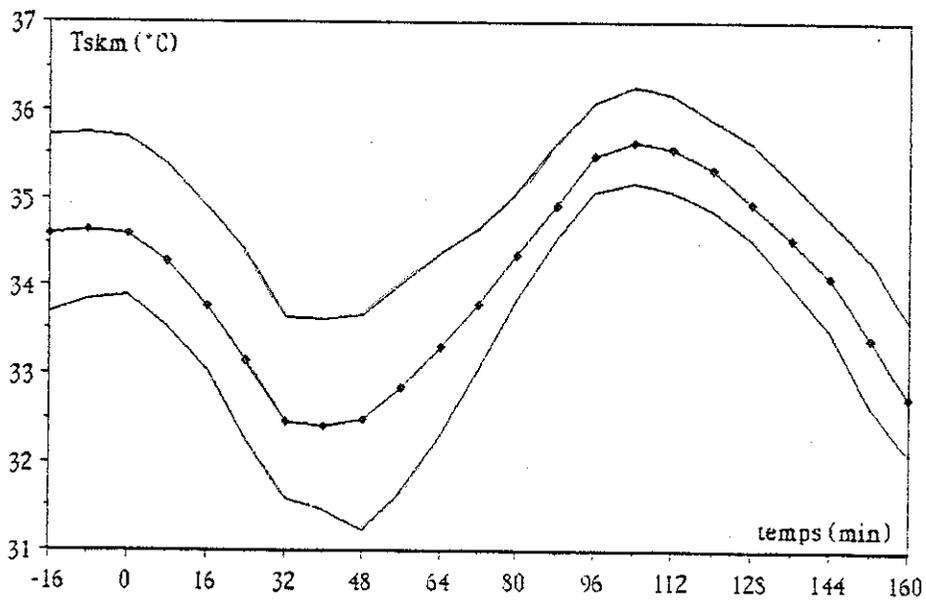


Figure III.15 - Moyenne des températures cutanées et écart inter-individuel maximal

Lors des comparaisons de nos résultats de simulation avec les expériences, nous pouvons choisir de considérer le modèle comme représentatif soit de la moyenne des individus, soit d'un individu moyen.

Pour pouvoir utiliser le deuxième type de représentation, il faudrait choisir un sujet et être sûr qu'il s'agisse du même pour toutes les expériences, ce qui n'est pas envisageable. La comparaison modèle-expérience sera faite en utilisant la représentation de la Figure III.15.

Expériences portant sur le sujet nu

Sur la Figure III.16, nous avons reporté la température cutanée moyenne expérimentale (T_{skm}) et l'écart inter-individuel correspondant ($T_{sk(max)}$ et $T_{sk(min)}$), ainsi que les températures données pour le modèle, d'après deux expressions : T_{sk} valeur calculée avec toutes les températures locales et T_{sk-ram} , qui est calculée d'après l'expression de Ramanathan sans tenir compte des extrémités.

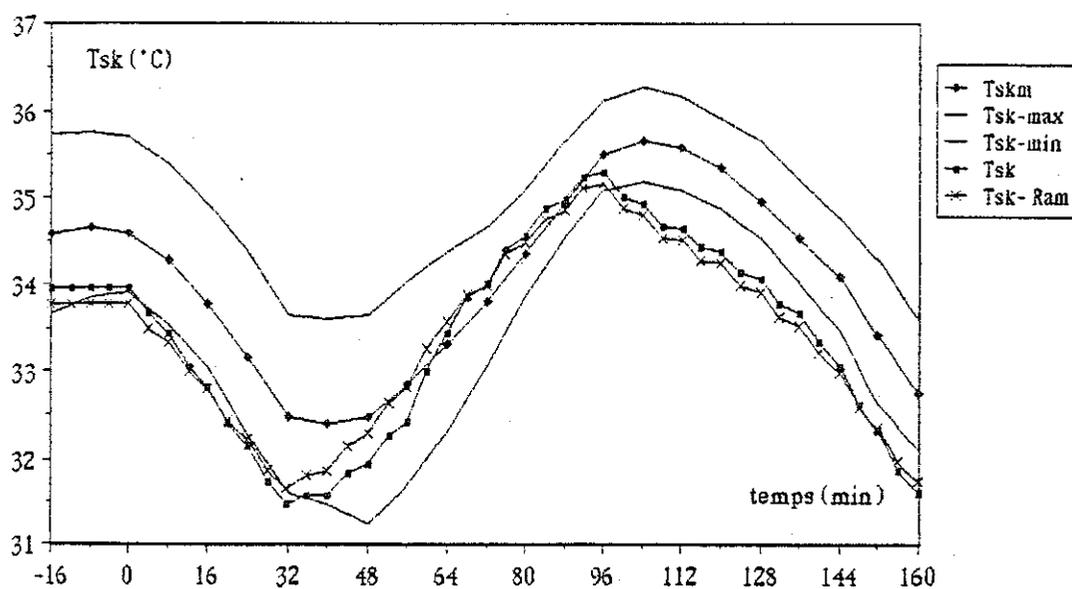


Figure III.16 - Comparaison entre les températures cutanées moyennes, expérimentales et calculée ; sujet nu

Les courbes données par le modèle sont proches des courbes expérimentales ; les pentes et le domaine de variation sont tout-à-fait comparables.

Le modèle a tendance à réagir "trop vite" aux variations de climat. La température cutanée passe par les extrema en même temps que la température opérative, alors que les expériences indiquent un décalage de 8 minutes ou plus. Ce phénomène a déjà été remarqué par la plupart des gens ayant travaillé sur le modèle de Stolwijk (cf. paragraphe II;1.3).

Si on compare T_{sk} et T_{sk-ram} , on peut noter que, pour des températures basses, il y a jusqu'à 0,5°C d'écart entre les deux valeurs, alors que, pour les plus hautes

températures, l'écart est négligeable. Ceci est dû au fait que la T_{sk-ram} ne tient pas compte des températures de la tête des pieds et des mains. Or, comme l'indique la Figure III.17, la température des pieds et des mains accuse de fortes variations, surtout dans les ambiances froides.

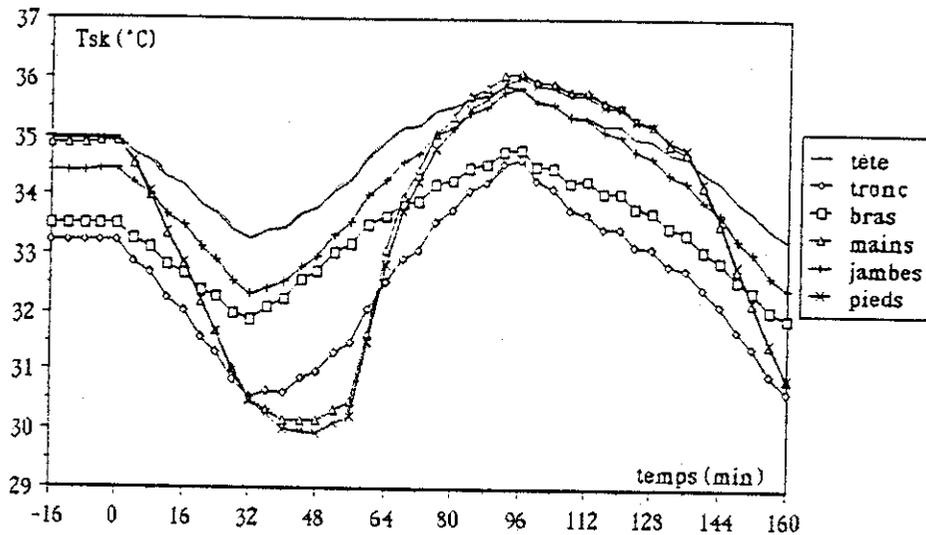
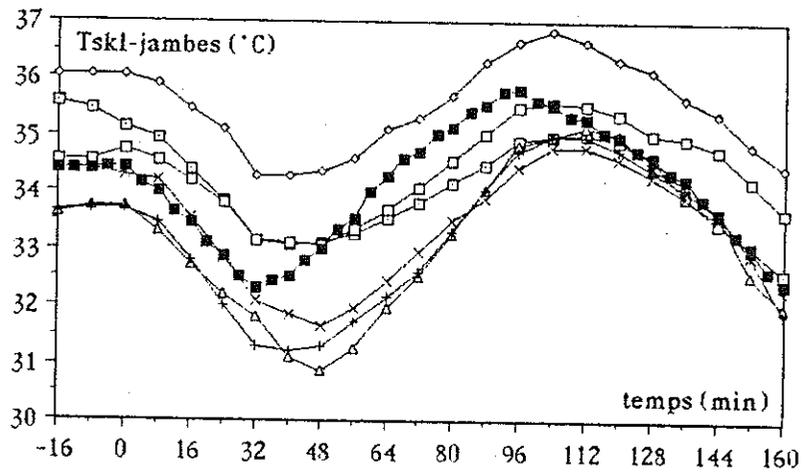
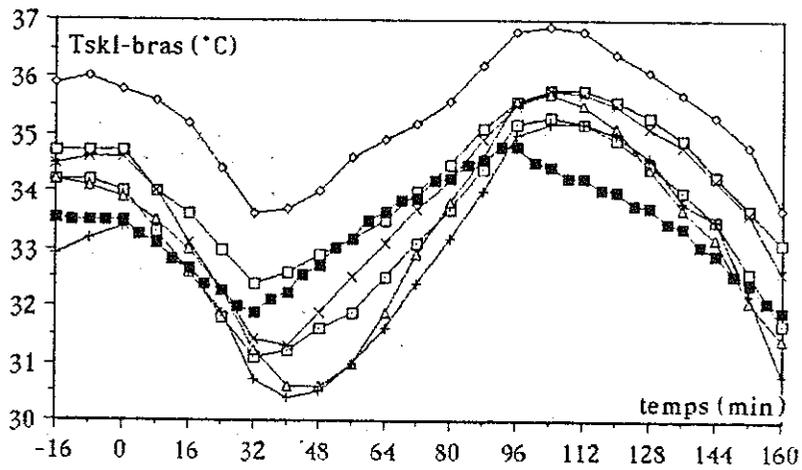
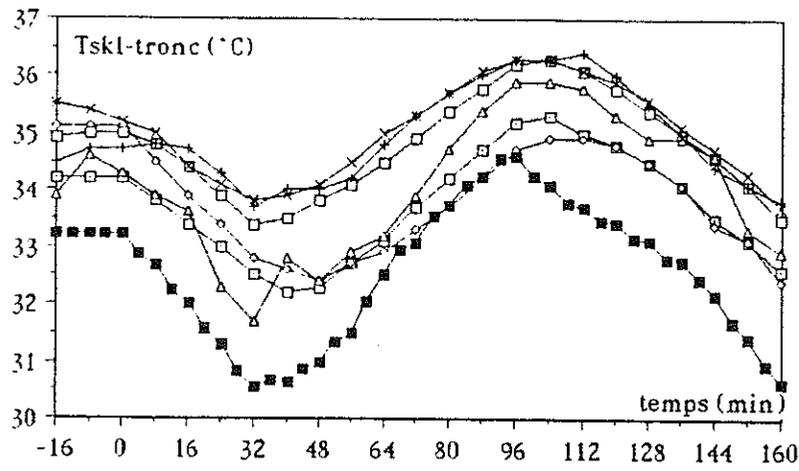


Figure III.17 - Températures cutanées locales données par le modèle

La comparaison des températures cutanées locales (Figure III.18) fournies par le modèle (T_{sk-moy}) avec les résultats d'expériences ($T_{sk-a..f}$) montre que le tronc a une température calculée nettement plus basse que dans le cas réel. Ceci explique que la température cutanée moyenne calculée est inférieure à celle mesurée.

Pour les jambes, nous avons fait la moyenne des températures relevées sur les cuisses et les mollets. Il faut remarquer que, lors des expériences de Tanaka (cf. paragraphe III.1.2), la température des jambes était la plus éloignée des résultats expérimentaux ; or, ici, elle est totalement confondue.



- ⊕ Tsk-a
- Tsk-b
- Tsk-c
- ✱ Tsk-d
- + Tsk-e
- * Tsk-f
- Tsk-moy

Figure III.18 - Températures cutanées locales du tronc, des bras et des jambes

La Figure III.19 donne les flux échangés par le corps. Avant le temps 0, le sujet est bien à l'équilibre, le bilan thermique est nul et le métabolisme est basal et constant.

Par la suite, le bilan thermique présente des petites oscillations dues au fait qu'au cours de chaque palier, le sujet modifie ses réactions pour s'adapter au nouveau climat et ramener son bilan à 0 en fin de palier.

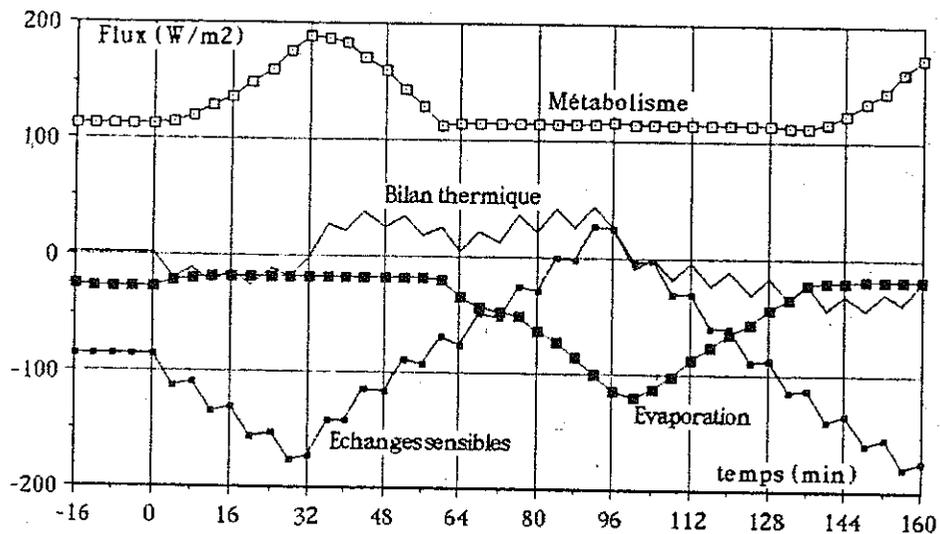


Figure III.19 - Quantités de chaleur produites et échangées par le corps (modèle)

Pour les températures d'air en-dessous de la neutralité, le sujet frissonne ; pour les températures supérieures, il transpire. L'humidité étant faible, il peut évaporer la presque totalité de la quantité d'eau qu'il produit, mais sa mouillure moyenne augmente, comme l'indique la Figure III.20.

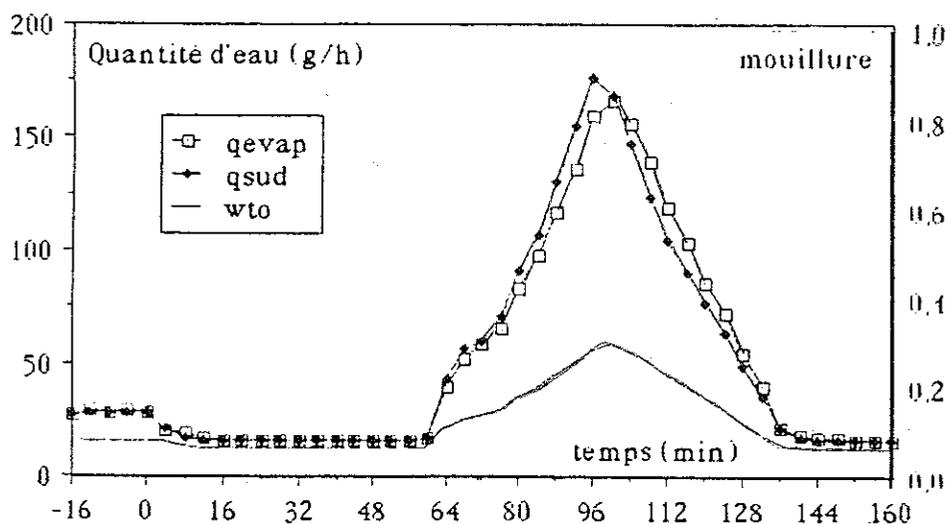
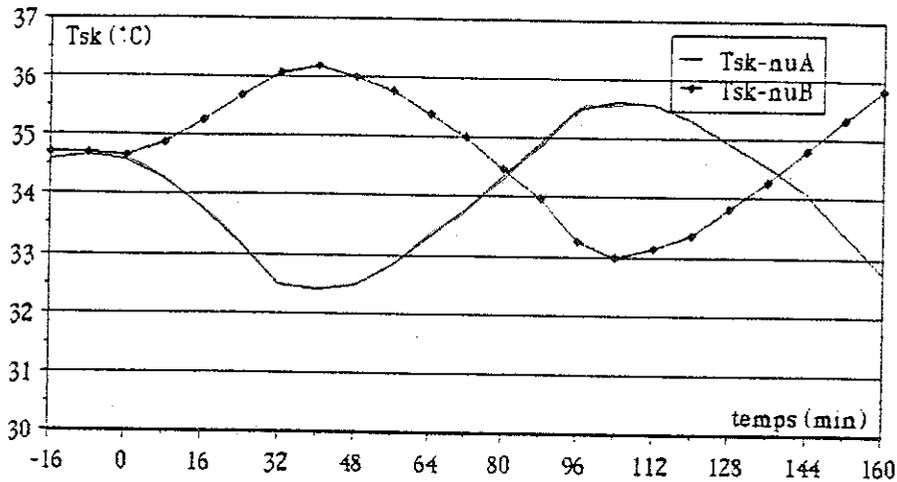


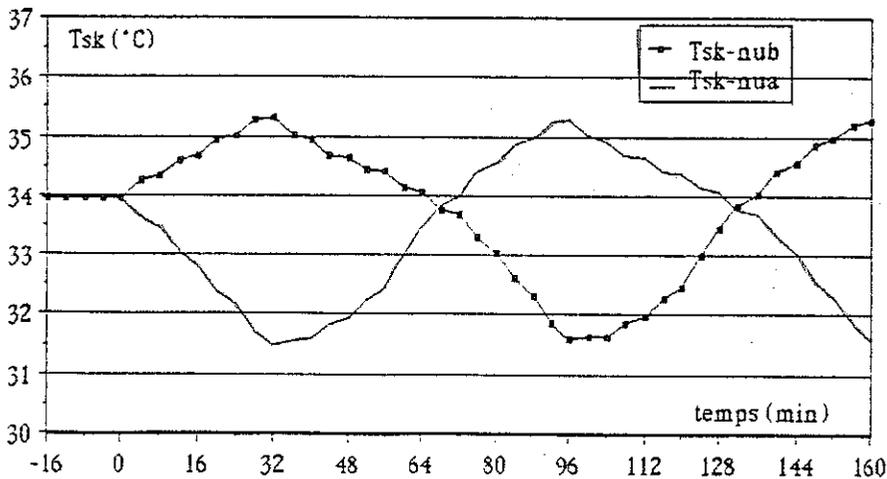
Figure III.20 - Quantités d'eau suée, évaporée et mouillure totale, au cours du temps

Comparons l'évolution des températures cutanées moyennes dans les cas nu-A et nu-B. La Figure III.21a) correspond aux expériences, la 21b) aux simulations.

Sur les courbes expérimentales (a), on constate que le maximum de T_{sk} est plus élevé pour l'expérience B que pour l'expérience A. Cette remarque doit être reliée au fait que, dans l'expérience A, les sujets étaient précédemment soumis à une ambiance plus froide. Dans ce schéma expérimental, l'inertie thermique du corps l'empêche d'atteindre la même valeur qu'en B. Il n'en est pas de même sur les courbes calculées (b). Cet écart à la réalité provient de la trop grande rapidité de réaction du modèle et de son manque d'inertie.



a) résultats expérimentaux



b) résultats du modèle.

Figure III.21 - T_{sk} donnée par le modèle et les expériences dans le cas nu-A et nu-B

On retrouve cet effet sur les courbes de la Figure III.22, où l'on a porté les températures cutanées mesurées et calculées, en fonction de la température de l'air.

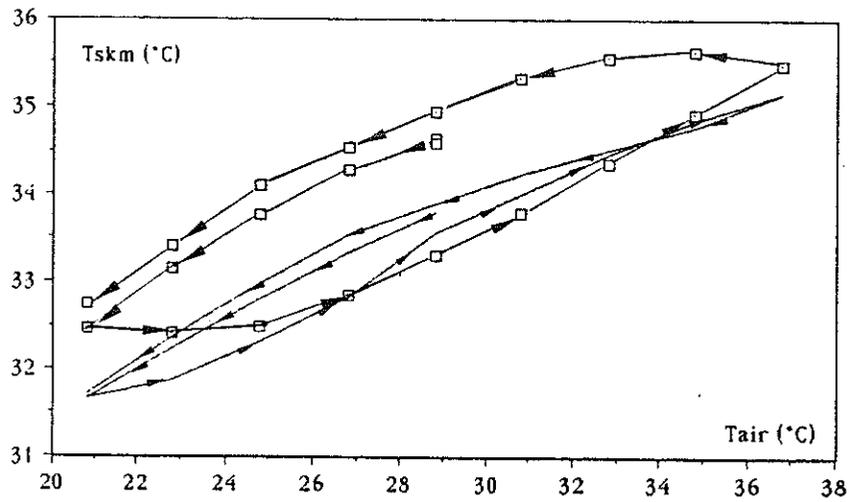


Figure III.22 - T_{sk} en fonction de la température de l'air
(les points correspondent à l'expérience, les traits au modèle,
les flèches indiquent le sens du parcours)

L'hystérésis du modèle est plus faible que dans la réalité ; l'écart de T_{sk} lors des deux passages par la neutralité est de $1,5^{\circ}\text{C}$ dans le cas expérimental et $0,5^{\circ}\text{C}$ pour le modèle.

Expérience portant sur le sujet vêtu

Lorsque les sujets sont vêtus (Figure III.23), la courbe T_{sk} donnée par le modèle passe entre les limites des écarts inter-individuels, qui peuvent atteindre ici 3°C (voir Annexe II).

On peut remarquer que les différences entre T_{sk} et T_{sk-ram} sont accrues, car les parties du corps qui ne sont pas couvertes se refroidissent beaucoup plus.

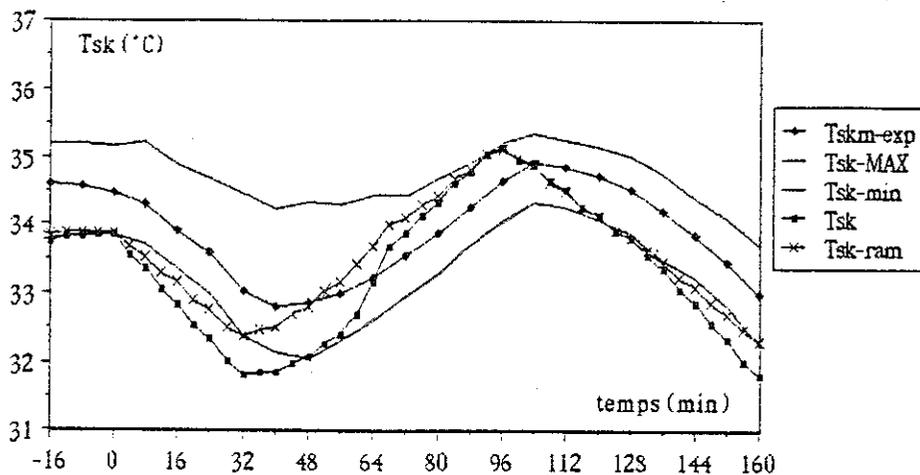
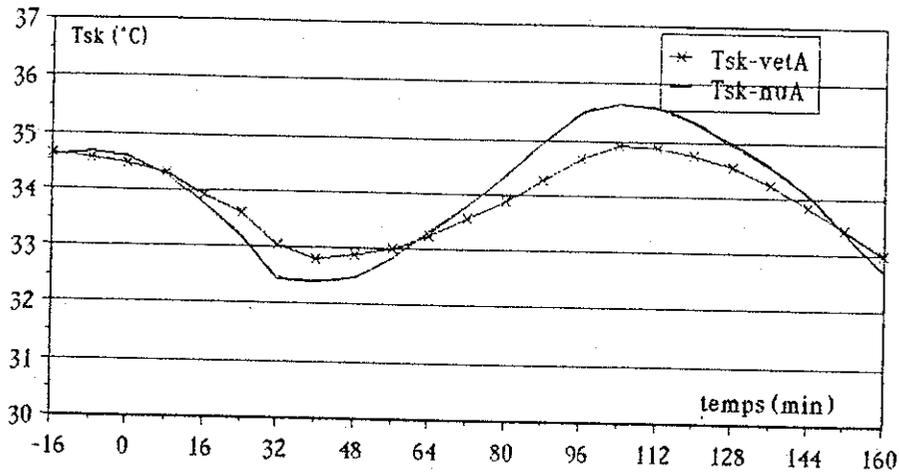


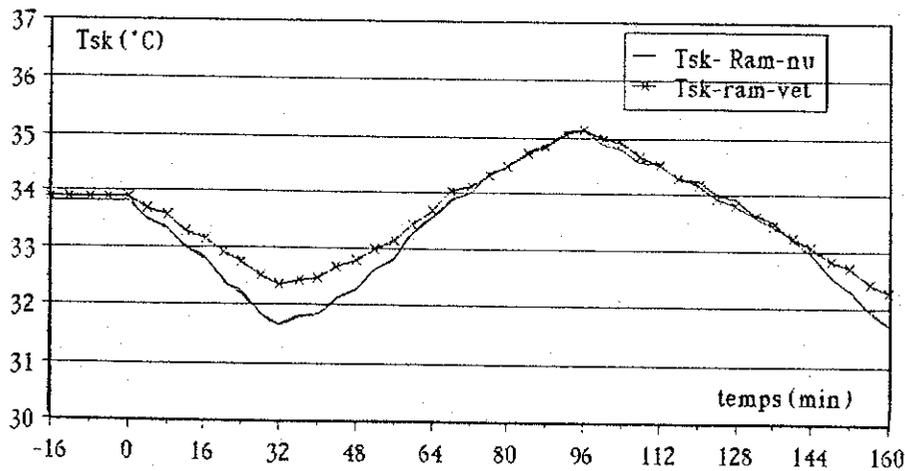
Figure III.23 - Comparaison des températures cutanées moyennes données
par le modèle et par les expériences; sujet vêtu

* Comparaison des expériences "nu" et "vêtu"

On peut comparer les évolutions des températures cutanées dans le cas de la variation A, pour un sujet vêtu (vetA) et dévêtu (nuA). Sur la Figure III.24, a) correspond aux résultats d'expérience, b) aux courbes données par le modèle.



a) Résultats expérimentaux



b) Résultats de simulation.

Figure III.24 - Température cutanée moyenne pour des sujets vêtus et dévêtus

Tout d'abord, il faut noter que, les sujets partant bien de la neutralité, pour l'expérience et le modèle, alors que la température d'air de neutralité T_{neu} n'est pas la même dans les deux cas : pour nuA, $T_{neu} = 28,8^{\circ}\text{C}$; pour vet-A, $T_{neu} = 25,3^{\circ}\text{C}$.

Une baisse de 8°C de la température de l'air provoque une chute de la température cutanée plus faible dans le cas d'un sujet vêtu que dévêtu : les expériences montrent une différence de $0,5^{\circ}\text{C}$ et le modèle de 1°C , ce qui est tout-à-fait comparable.

Par contre, dans le cas où la température d'air augmente de 8°C, la température cutanée expérimentale du sujet vêtu reste inférieure de presque 1°C à celle du sujet dévêtu, ce que n'indique pas le modèle. Cet écart à la réalité, provient vraisemblablement du fait que, dans les climats chauds, la perméabilité des vêtements et le taux de reprise jouent un rôle important. Or, les équations que nous avons utilisées sont très simplifiées dans ce domaine.

c) Conclusion sur les expériences proches de la neutralité

Les conditions de neutralité thermophysique du modèle correspondent bien aux conditions de neutralité expérimentale. Les courbes de température cutanées calculées se placent bien par rapport aux courbes expérimentales, compte tenu des différences inter-individuelles constatées expérimentalement.

En ce qui concerne la trop grande rapidité de réaction du modèle, il nous est difficile de savoir d'où elle provient. Nous n'avons aucun moyen de contrôler si les quantités d'eau et de chaleur échangées sont correctes ou si les réactions internes mises en jeu sont trop fortes.

Les vêtements qui ont été ajoutés donnent de bon résultats pour les climats froids, mais semblent être trop simplifiés pour les climats chauds, où les transferts d'humidité prennent de l'importance. Il est donc nécessaire d'étudier plus finement les vêtements dans ce domaine.

III.2.2 . Les conditions extrêmes

Les expériences ont été réalisées par le groupe Physiologie dans le but de mettre en évidence "l'effet de pompage" des vêtements [109].

a) Conditions expérimentales

Cinq sujets ont été soumis à cinq conditions expérimentales différentes, d'une durée de 180 minutes, dans la chambre 2. Après une période de 30 minutes, dans des conditions proches de la neutralité thermique, où ils sont assis, nus et au repos, les sujets pédalent sur une bicyclette ergométrique, à 60 trs/min. Ils fournissent un travail de 40 W durant 150 minutes, séparées en deux phases de 75 minutes. Entre les deux phases, ils s'habillent. Les températures de l'air et des murs varient indépendamment. Le Tableau III.2 est un récapitulatif des conditions expérimentales et leurs notations correspondantes.

Conditions	NRC	Co ⁺	Co ⁻	Ra ⁺	Ra ⁻
T _a	35,9	47,0	20,9	36,6	35,0
T _{murs}	35,9	31,4	36,5	63,8	7,8

Tableau III.2 - Conditions expérimentales

(T_a Température d'air en °C T_{murs} Température des murs en °C)

- La température de rosée est basse : $T_{dp} = 5 \pm 0,1^\circ\text{C}$ pour éviter la condensation sur les parois dans le cas Ra⁻.
- La vitesse d'air est constante : $V_a = 0,6 \pm 0,03$ m/s.
- Isolation thermique intrinsèque totale des vêtements : $I_{cl} = 1$ clo.

La température rectale et dix températures cutanées locales sont mesurées (1 - front ; 2 - omoplate ; 3 - sein droit ; 4 - abdomen ; 5 - rein droit ; 6 - main gauche ; 7 - bras droit ; 8 - pied droit ; 9 - mollet droit ; 10 - cuisse droite). La température cutanée moyenne est calculée avec l'expression de Dubois en 10 points. Le poids est enregistré en continu, après déduction des pertes métaboliques (voir paragraphe I.1.1), on a accès aux pertes d'eau.

On peut remarquer, dans le Tableau III.2, que la température, soit de l'air soit des murs, est proche de la température cutanée, l'intention des expérimentateurs étant d'annuler soit les échanges radiatifs {Co⁺, Co⁻}, (afin d'obtenir une ambiance dite "convective chaude" Co⁺ ou froide Co⁻) ou convectifs {Ra⁺, Ra⁻}, soit les deux simultanément (NRC).

Les résultats qui nous ont été communiqués sont des moyennes sur les cinq sujets. Ils sont donnés en Annexe III.

Pour les simulations, nous avons considéré que :

- le sujet est seul au centre de la pièce ;
- le métabolisme est de 58 W/m^2 dans la phase de repos; dans la phase d'exercice, nous avons supposé que le rendement mécanique est de 0,15 %, ce qui nous donne un métabolisme total : $M = 140 \text{ W/m}^2$;
- les résistances thermiques des vêtements sont respectivement :
 $R_{cl}(\text{tronc}) = 0,28 \text{ m}^2\text{C/W}$; $R_{cl}(\text{bras}) = 0,23 \text{ m}^2\text{C/W}$; $R_{cl}(\text{jambes}) = 0,09 \text{ m}^2\text{C/W}$;
les autres parties du corps (tête, mains, pieds) ne sont pas couvertes.
- la perméabilité des vêtements à la vapeur d'eau est $i_L = 0,6$;

- puisque les sujets pédalent, la vitesse de l'air sur les jambes est augmentée ; nous avons donc utilisé le module de décomposition des vitesses décrit dans le Chapitre II.3.1.a, avec l'activité n°1 en phase de repos et n°11 par la suite ;

- la température moyenne de surface des sujets vêtus est calculée avec la même expression que dans le cas expérimental (cf. Annexe III) :

$$T_{cl} = 0,39 T_{cl}(\text{jambes}) + 0,35 T_{cl}(\text{tronc}) + 0,14 T_{cl}(\text{bras}) + 0,05 T_{sk}(\text{mains}) + 0,07 T_{sk}(\text{tête})$$

b) Comparaison des résultats pour les ambiances chaudes

Dans un premier temps, nous avons étudié l'expérience Ra⁺. La Figure III.25 montre l'évolution des températures cutanées moyennes du modèle (T_{sk-s}) et des expériences (T_{sk-ex}):

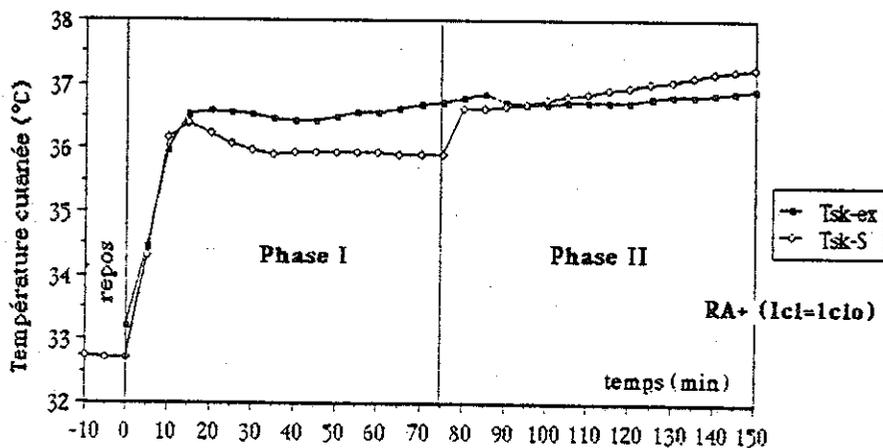


Figure III.25 - Température cutanée moyenne dans l'expérience Ra⁺.
Comparaison des résultats expérimentaux et du modèle. (avec I_{cl} = I_{clo})

Au début de l'expérience, en fin de phase de repos, le modèle a une température cutanée légèrement plus basse, ce qui est probablement dû au fait que, ne connaissant pas les conditions exactes, nous avons supposé que la vitesse de l'air était de 0,6 m/s. Mais il est possible qu'elle soit plus basse, auquel cas nous avons surestimé les échanges convectifs.

Phase I : les résultats sont comparables, mis à part un léger "overshoot" (décroissance en début de palier de la température cutanée du modèle). Les montées de température ont la même pente. Le modèle atteint l'équilibre thermique, par contre, lors des expériences, les sujets ne semblent pas l'avoir tout à fait atteint. Après les 75 minutes d'exposition les différences de températures sont inférieures à 1°C, qui est de l'ordre de grandeur des différences inter-individuelles.

Phase II : on remarque que la présence des vêtements modifie la température cutanée du modèle de presque 1°C au cours des premières minutes, puis continue d'augmenter ; l'individu n'atteint pas l'équilibre thermique.

D'autre part, si on compare des quantités d'eau évaporée, suée et ruisselante ($q_{\text{evap-s}}$, $q_{\text{sud-s}}$, $q_{\text{drip-s}}$) données par le modèle et la variation de perte de poids expérimentale ($q_{\text{evap-ex}}$) (Figure III.26), on obtient:

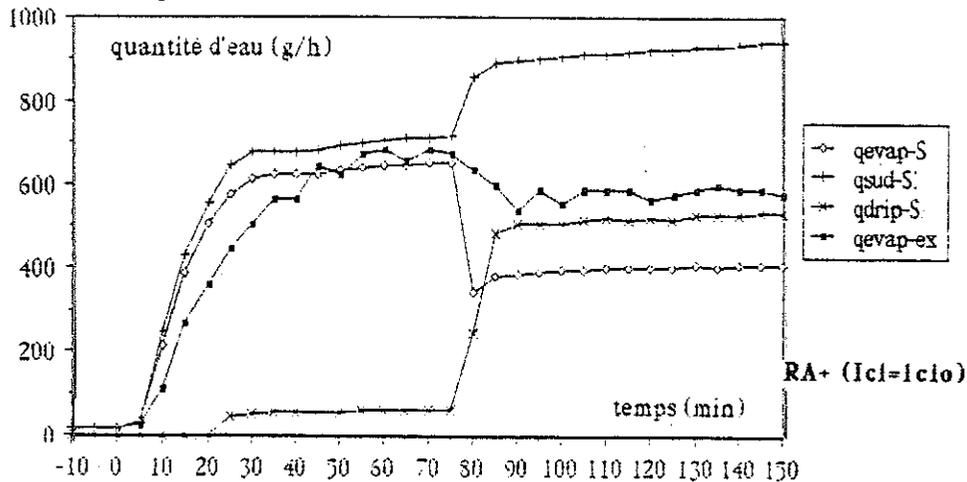


Figure III.26 - Quantité d'eau perdue au cours du temps ($I_{cl} = 1clo$)

$q_{\text{evap-s}}$: quantité d'eau évaporée ; $q_{\text{sud-s}}$: quantité d'eau suée ; $q_{\text{drip-s}}$: quantité d'eau ruisselante (résultats de simulation) $q_{\text{evap-ex}}$: résultats d'expériences

Phase I : les résultats sont compatibles, mise à part une montée légèrement plus rapide pour le modèle.

Phase II : $q_{\text{evap-s}}$ est inférieure à la perte de poids donnée dans les expériences; par contre, $q_{\text{sud-s}}$ est très supérieure ; dans ce cas, le sujet sue plus qu'il ne peut évaporer et la quantité d'eau ruisselante ($q_{\text{drip-s}}$) est importante.

Bien que dans les expériences aucun ruissellement n'ait été observé, Il faut noter que le modèle montre que la quantité d'eau ruisselle uniquement sur les parties couvertes du corps, et est peut être absorbée par le tissu. La tête, les mains et les pieds ont une mouillure nulle.

La seule différence entre ces deux phases est la présence d'habits. On peut donc conclure que les réactions thermophysiologiques données par le modèle sont correctes, mais que les équations ou les résistances thermiques des vêtements ne le sont pas. L'effet de pompage lié au mouvement modifie la valeur de I_{cl} .

Lors de l'analyse des résultats, le LPPE est arrivé aux conclusions que, dans ce cas d'expérience Ra^+ , l'isolation résultante des habits est : $I_{clr} = 0,021 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$, soit

0,14 clo. Nous avons donc refait une simulation avec cette isolation vestimentaire qui est beaucoup plus faible que précédemment. Les résultats, présentés ci-dessous, sont bien plus satisfaisants. Les températures cutanées sont représentées sur la Figure III.27. Il n'y a aucune modification dans la phase I.

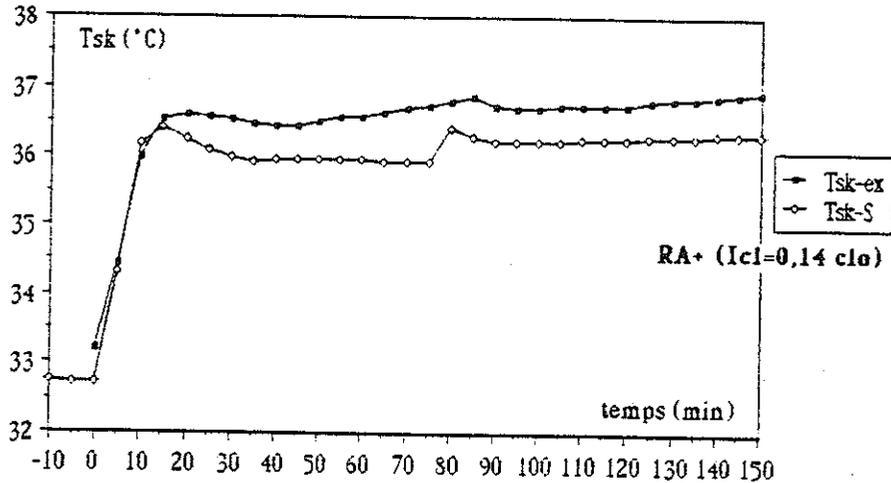


Figure III.27 - Température cutanée moyenne dans l'expérience Ra+. comparaison des résultats expérimentaux et du modèle (avec $I_{cl} = 0,14\text{clo}$)

Phase II : la T_{sk} augmente moins et se stabilise rapidement. Par ailleurs si on compare les quantités d'eau perdues (Figure III.28), q_{evap-S} fournie par le modèle est confondue avec les résultats expérimentaux. La quantité d'eau suée est légèrement inférieure au cas précédent, mais l'évaporation est plus importante, et la quantité d'eau ruisselante est beaucoup plus faible.

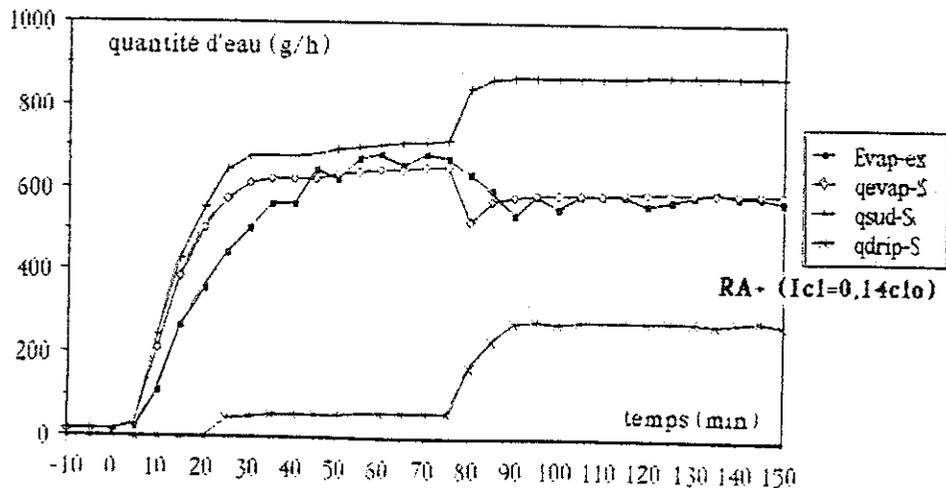


Figure III.28 - Quantités d'eau perdues au cours du temps (avec $I_{cl} = 0,14\text{clo}$)

Si on calcule le coefficient d'échange radiatif moyen pour tout le corps en fin de phase I, en utilisant l'expression linéarisée des échanges radiatifs :

$$R = h_r (T_{sk} - T_{mrt})$$

Le modèle nous donne : $R = 113,5 \text{ W/m}^2$; $T_{sk} = 35,92^\circ\text{C}$; $T_{mrt} = 57,16^\circ\text{C}$

On obtient: $h_r = 5,34 \text{ W/m}^2\text{C}$

Cette valeur est en bon accord avec la valeur expérimentale :

$$h_r = (5,97 \pm 0,79) \text{ W/m}^2\text{C}.$$

Il faut noter que la température moyenne de rayonnement au niveau du tronc est de $57,16^\circ\text{C}$ et $58,97^\circ\text{C}$ au niveau des pieds, alors que le calcul simplifié (cf. annexe III) donne $T_{mrt} = 54,6^\circ\text{C}$, ce qui explique que notre coefficient h_r est plus faible et probablement plus proche de la réalité.

D'autre part, les échanges convectifs ne sont pas réellement nuls, le calcul nous donne : $C = 5,82 \text{ W/m}^2$.

On s'intéresse maintenant à l'expérience Co^+ , où l'effet de pompage est important. Nous avons, dans un premier temps pris $I_{cl} = 1 \text{ clo}$. La Figure III.29 donne les températures cutanées du modèle (T_{sk-s}) et des expériences (T_{sk-ex}).

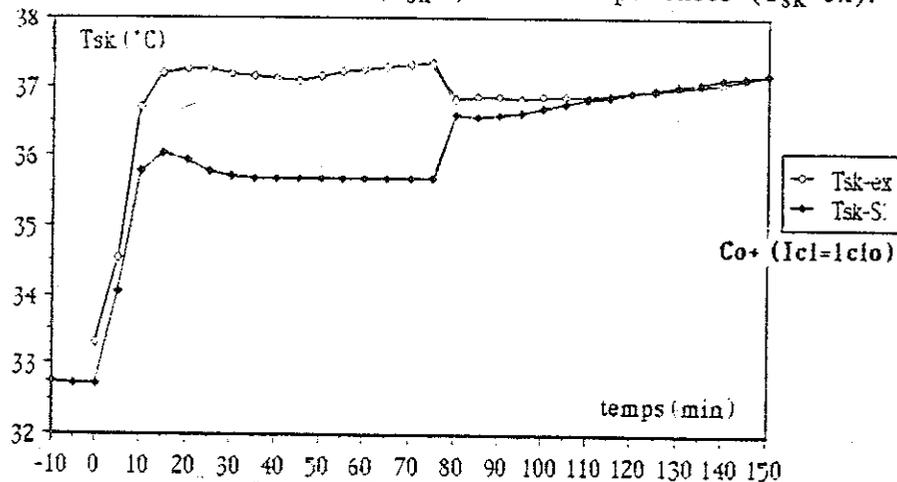


Figure III.29 - Températures cutanées moyennes ($I_{cl} = 1 \text{ clo}$)

Phase I : les montées de températures sont comparables, malgré un "overshoot" de T_{sk-s} , moins important que dans le cas radiatif (Ra^+). Par contre T_{sk-s} se stabilise $1,6^\circ\text{C}$ plus bas que T_{sk-ex} .

Nous avons pensé qu'il s'agissait d'une sous-estimation des apports convectifs, due à des vitesses d'air relatives trop faibles. Si on calcule le coefficient d'échange moyen h_c avec l'expression globale des échanges convectifs :

$$C = h_c (T_{sk} - T_a)$$

pour les données suivantes : $C = 95 \text{ W/m}^2$; $T_{sk} = 35,7^\circ\text{C}$; $T_a = 47^\circ\text{C}$

on obtient $h_c = 8,41 \text{ W/m}^2\text{C}$, qui est inférieur à la valeur trouvée lors des expériences qui est : $h_c = (10,96 \pm 0,42) \text{ W/m}^2\text{C}$.

Si on augmente la vitesse d'air de $0,15 \text{ m/s}$, les apports convectifs augmentent, h_c vaut alors $9,5 \text{ W/m}^2\text{C}$. L'accroissement de h_c entraîne des pertes par évaporation plus importantes, le bilan thermique reste le même et la température cutanée aussi.

D'autre part, si on observe les quantités d'eau perdues (Figure III.30), les résultats dans la phase I sont satisfaisants.

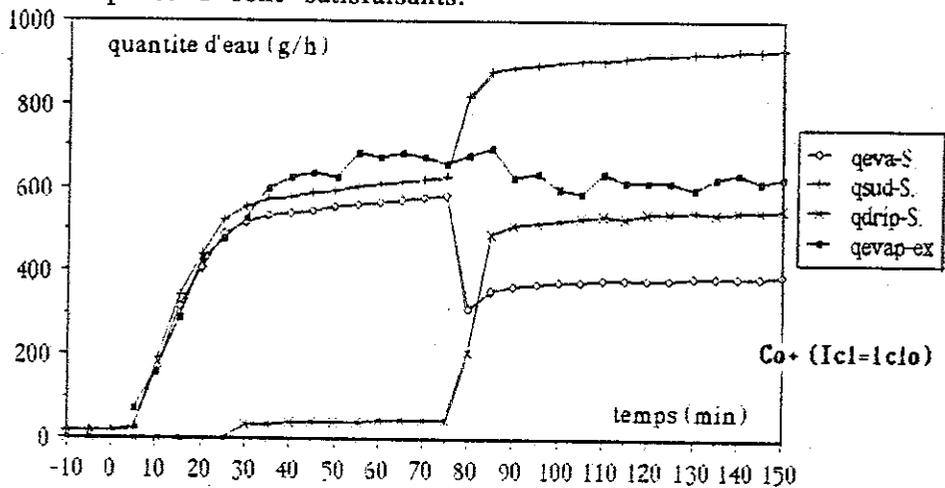


Figure III.30 - Quantité d'eau perdue par le corps ($I_{cl} = 1,1clo$)

Phase II : après habillage du sujet, la T_{sk} donnée par le modèle réagit différemment des résultats expérimentaux, la quantité d'eau évaporée chute considérablement.

Nous avons donc refait une simulation avec la valeur de I_{clr} déterminée par le LPPE : $I_{clr} = 0,12clo$. On obtient une montée de T_{sk} -s beaucoup moins importante (Figure III.31)

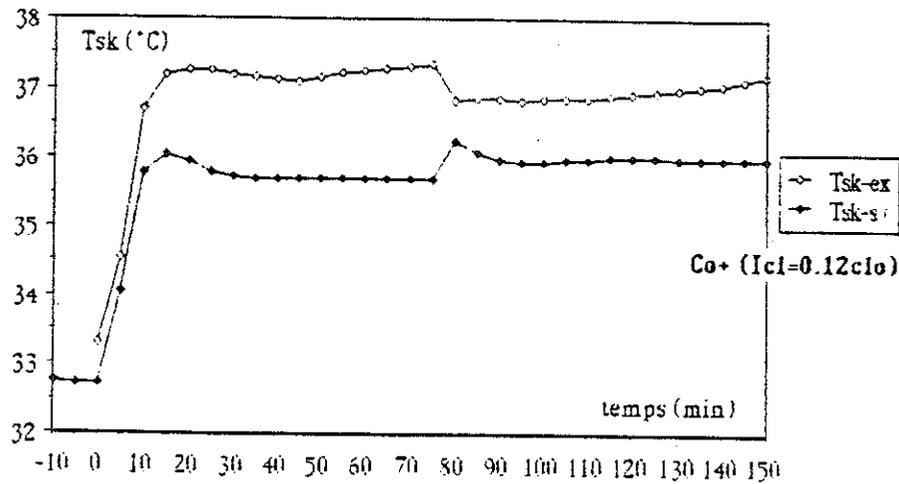


Figure III.31 - Température cutanée moyenne ($I_{cl} = 0,12 \text{ clo}$)

En fin de phase II, la T_{sk} est, de quelques dixièmes de degrés, supérieure à celle de la phase I, alors que l'expérience montre qu'elle devrait être très légèrement inférieure. Ces différences ne sont pas très importantes. Il faut noter que l'effet de pompage modifie les échanges thermiques, mais aussi, très probablement, les transferts de masse. Cet effet n'a pas été mis en évidence lors des expériences et il ne nous est pas possible de modifier les équations dans ce domaine. D'autre part, les pertes d'eau semblent dans ce cas être tout à fait correctes, bien que légèrement sous-estimées, comme l'indique la Figure III.32,

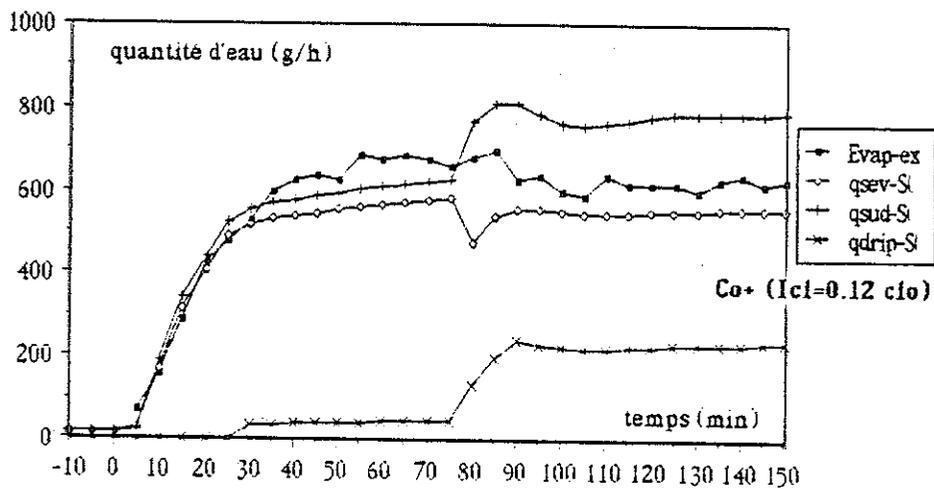


Figure III.32 - Quantités d'eau perdue par le corps ($I_{cl} = 0,12 \text{ clo}$)

Par la suite nous avons choisi les valeurs expérimentales de I_{clr} .

Sur la Figure III.33, ont été reportées les T_{sk} données par le modèle (-s) et les expériences (-ex) pour les conditions chaudes Ra^+ et Co^+ .

Le modèle réagit de la même façon dans les deux cas, alors que pour les expériences, les courbes n'ont pas la même allure. Il faut noter que les différences

entre le modèle et les expériences sont en grande partie dues aux équations utilisées pour les vêtements

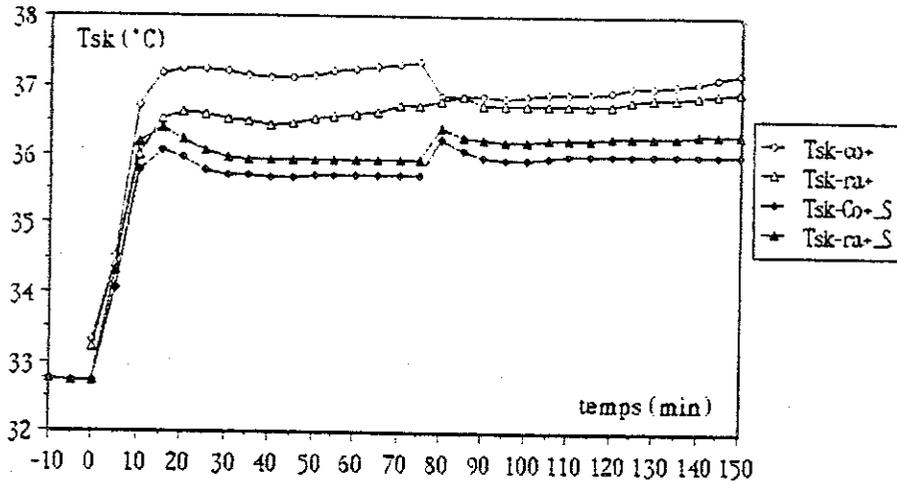


Figure III.33 - Températures cutanées moyennes pour les ambiances chaudes Co+ et Ra+

L'effet de pompage tient compte du fait qu'une partie des transferts de chaleur se fait par convection sous-vestimentale et non à travers le tissu. En réduisant I_{cl} , nous avons supposé que la résistance thermique chute pour les échanges radiatifs et convectifs. Or, l'effet de pompage intervient essentiellement sur les échanges convectifs.

On peut schématiser l'équivalence électrique comme l'indique la Figure III.34.

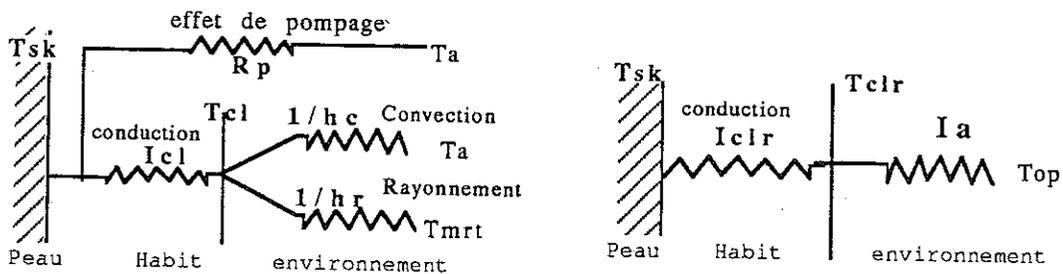


Figure III 34 - Equivalence électrique des échanges de chaleur pour l'effet de pompage.

R_p Résistance thermique due à l'effet de pompage

I_{clr} Résistance thermique équivalente totale.

T_{clr} Température équivalente des vêtements

En choisissant I_{clr} comme résistance thermique du vêtement, on obtient des quantités de chaleur sensible échangées au niveau de la peau comparables aux expériences, mais la totalité du flux échangé passe à travers le tissu ; la température de surface des vêtements est alors plus faible. Dans le cas Ra+, le modèle donne $T_{cl} = 39,4^\circ\text{C}$, pour $I_{cl} = 1$ clo et $T_{clr} = 37,07^\circ\text{C}$ pour $I_{clr} = 0,14$ clo, alors que, pour les expériences, $T_{clr} = 37,74^\circ\text{C}$.

On peut comparer les flux échangés par le corps donnés par le modèle. La Figure III.35 donne les échanges par convection (C_{conv}), rayonnement (R_{ray}) et évaporation (F_{evap}) dans les cas Co^+ et Ra^+ .

Il apparaît que les bilans thermiques globaux, dans ces deux cas, sont proches. Les échanges sensibles sont presque égaux. Les pertes par évaporation sont légèrement plus faibles dans le cas Co^+ : ceci est dû aux apports sensibles plus faibles

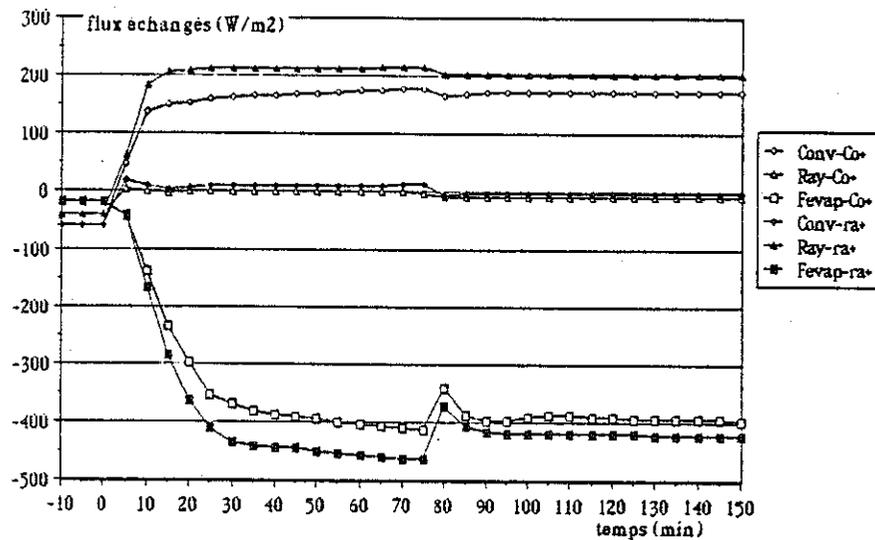


Figure III.35 - Quantités de chaleur échangées par le corps dans les ambiances chaudes

En observant la quantité d'eau suee (Figure III.36), on peut noter que, dans le cas Ra^+ , elle est supérieure. On peut prédire que le sujet aura probablement une impression d'inconfort plus grand, car la mouillure cutanée est plus forte.

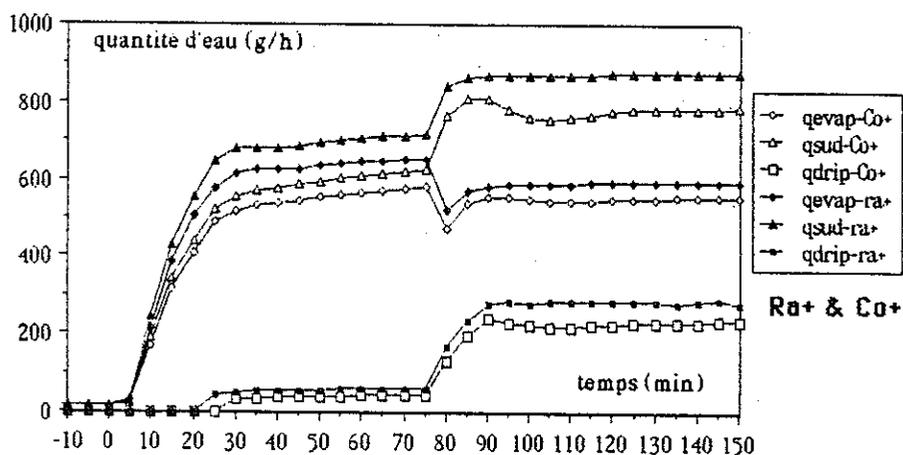


Figure III.36 - Quantités d'eau perdue dans les ambiances chaudes

D'autre part les températures cutanées locales ne réagissent pas de la même façon dans les deux cas (Figure III.37).

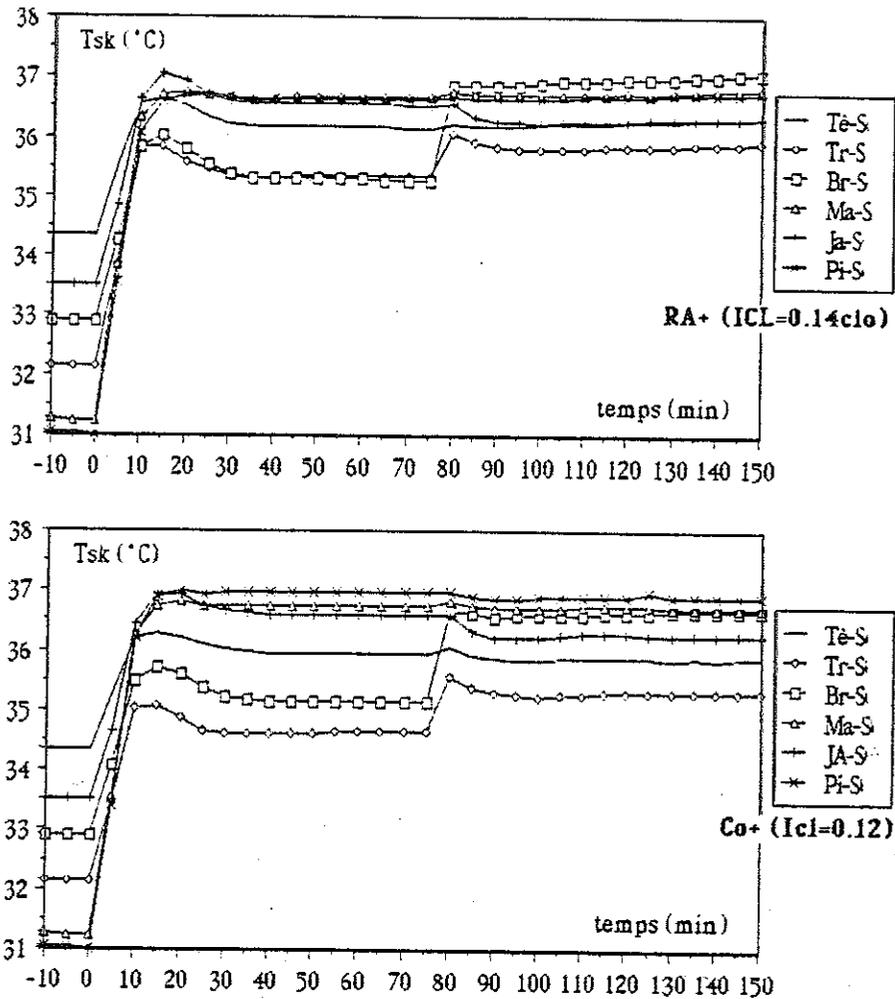


Figure III.37 - Températures cutanées locales dans les cas Ra^+ et Co^+ (simulation)

Dans le cas Co^+ , la dispersion des températures est beaucoup plus forte. On peut aussi remarquer que les parties non couvertes ne varient presque pas entre les phases I et II, contrairement aux parties vêtues. Ces phénomènes apparaissent aussi sur les courbes expérimentales.

c) Comparaison des résultats pour les ambiances froides

Pour les ambiances froides Co^- et Ra^- , nous ne présenterons pas une étude détaillée. La Figure III.38 montre la comparaison entre les températures moyennes cutanées données par les expériences et le modèle. Nous avons utilisé l'isolation thermique du vêtement (I_{clr}) donné par le L.P.P.E.

Pour Co^- , les résultats sont proches. Le modèle réagit de la même façon que dans le cas réel. Par contre, pour Ra^- , les habits provoquent une augmentation de la T_{sk} du modèle qui n'apparaît pas sur les expériences.

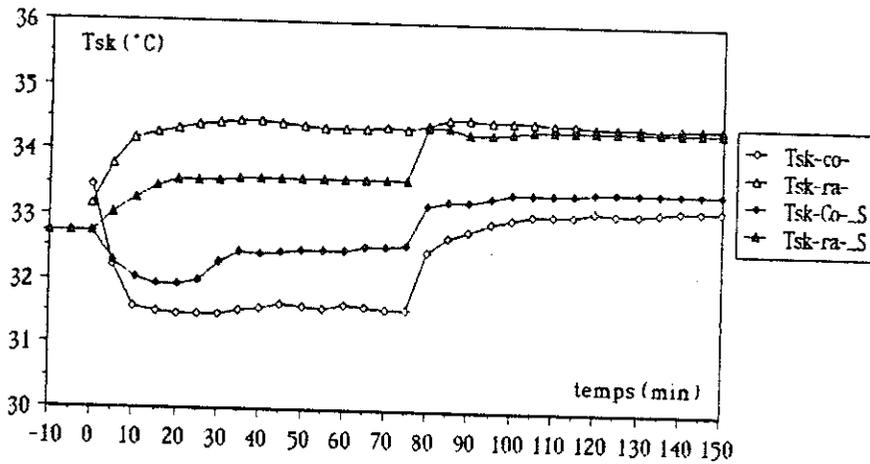


Figure III.38 - Tsk du modèle et des expériences dans les cas Ra' & Co'

Les courbes donnant les pertes d'eau (Figure III.39) montrent que le modèle les sous-estime.

Dans le cas Ra', ($R = 76 \text{ W/m}^2$, $T_{sk} = 35,6^\circ\text{C}$, $T_{mrt} = 15,9^\circ\text{C}$), on trouve un coefficient d'échange moyen $h_r = 3,86 \text{ W/m}^2\text{°C}$ qui est proche du résultat expérimental: $h_r = (4,09 \pm 0,49) \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Il faut noter que la température moyenne de rayonnement calculée, $T_{mrt} = 15,9^\circ\text{C}$, est plus basse que la valeur estimée lors des expériences, $T_{mrt} = 17,37^\circ\text{C}$. De plus, le flux convectif calculé pour le modèle dans ce cas est: $C = 9,57 \text{ W/m}^2$

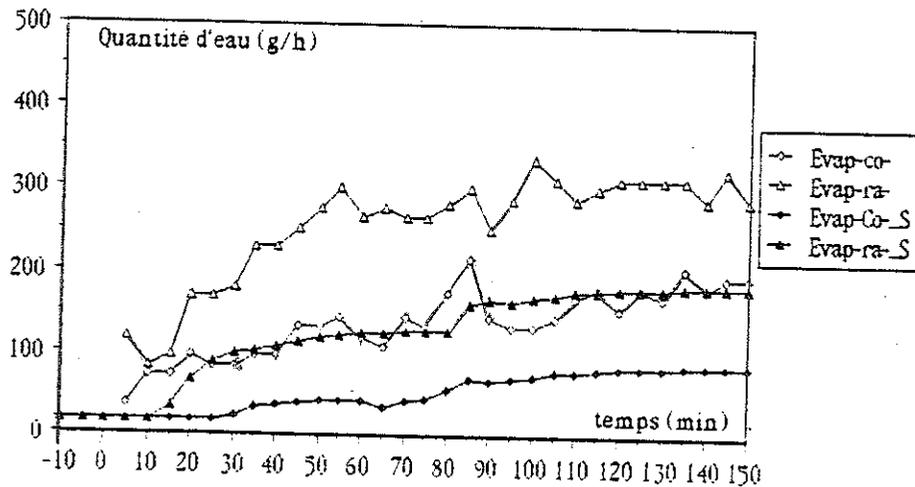


Figure III.39 - Quantité d'eau perdue dans les conditions froides.

d) Comparaison des résultats pour les ambiances neutres

Pour l'expérience NRC, les températures de l'air et des murs sont proches de celle de la peau. Les échanges convectifs et radiatifs sont supposés nuls. On peut voir les conséquences de l'effet de pompage sur les échanges par évaporation. La valeur de I_{clr} n'a pas été déterminée dans le cas expérimental: nous avons donc utilisé une valeur moyenne des autres cas. La Figure III.40 montre la comparaison des températures cutanées expérimentales et données par le modèle. Les courbes sont presque confondues, mise à part une légère augmentation de T_{sk-s} entre les deux phases.

Le modèle montre que les échanges sensibles ne sont pas réellement nuls car $C = 12,16 \text{ W/m}^2$ et $R = 8,1 \text{ W/m}^2$.

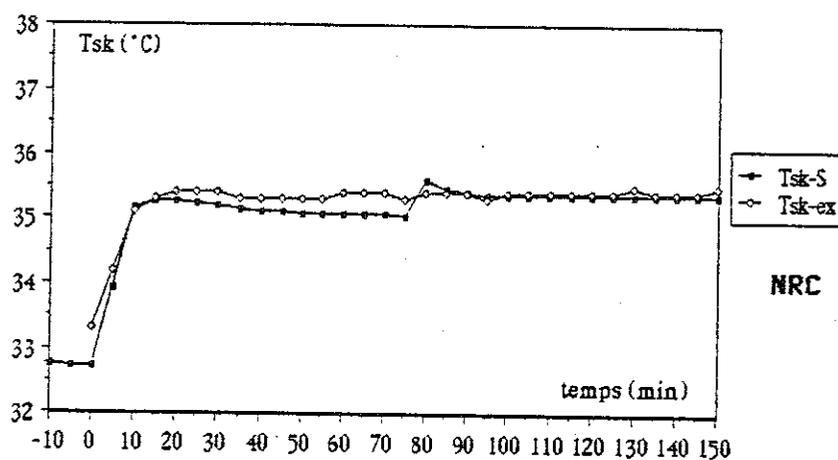


Figure III.40 - Températures cutanées moyennes dans le cas NRC.

En comparant les quantités d'eau (Figure III.41), on observe que, dans le cas expérimental, la présence d'habits ne modifie pas l'évaporation. Pour le modèle, il y a une légère baisse de l'évaporation. Par contre, on observe une nette augmentation du débit d'eau suée et ruisselante.

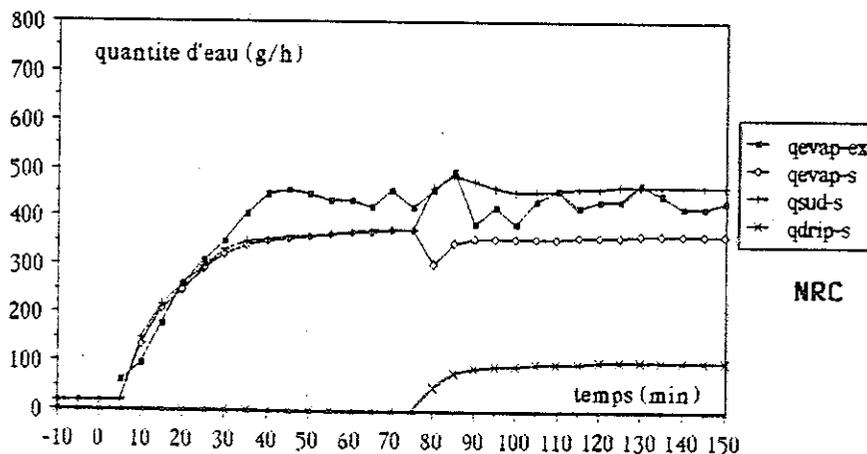
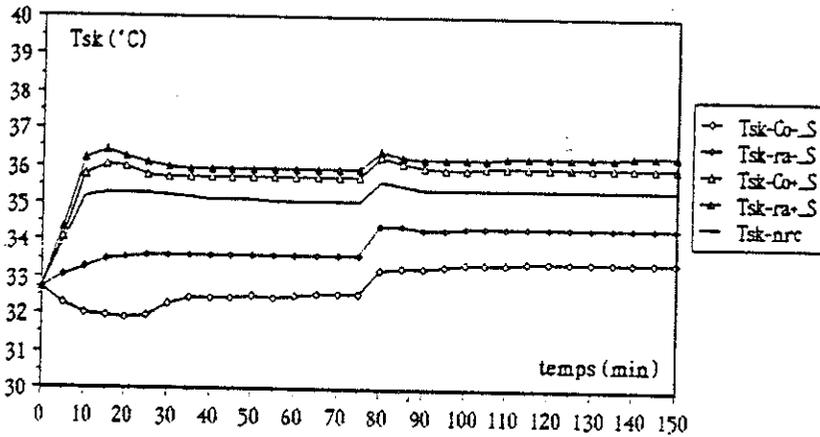


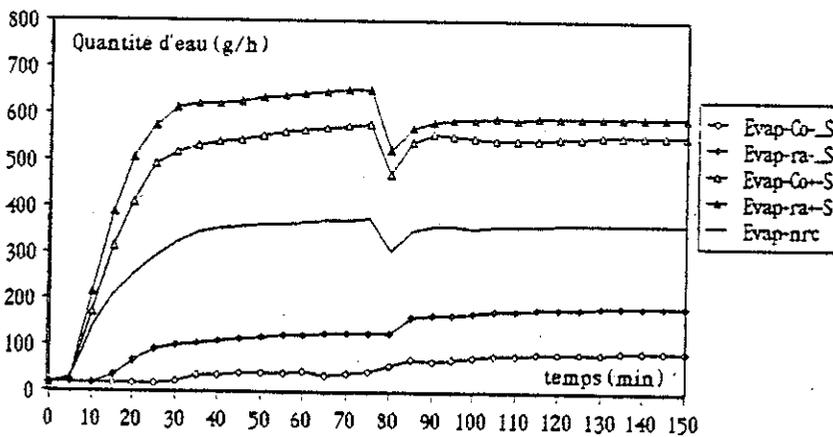
Figure III.41 - Quantité d'eau perdue dans le cas NRC.

e) Conclusion

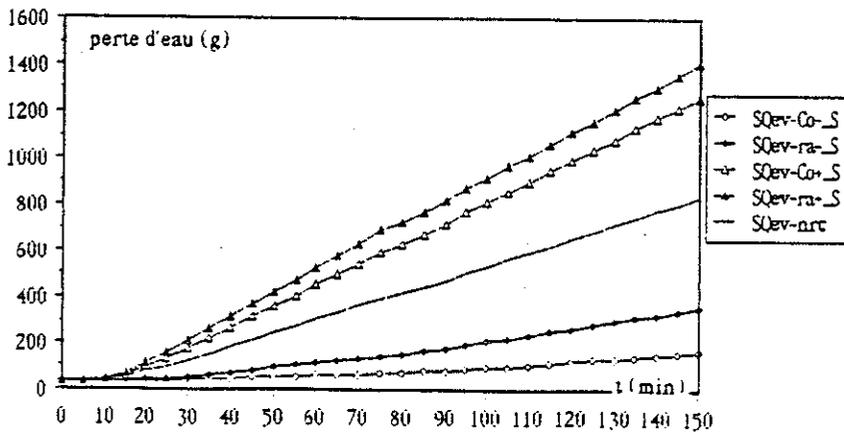
En conclusion de ces expériences, on peut faire le récapitulatif (Figure III.42.) des températures cutanées a), des débits d'eau suée b), et de la perte de poids cumulée c) au cours du temps dans les cinq conditions climatiques, et les comparer aux courbes expérimentales donnée en Annexe III.



a) Températures cutanées



b) Débit d'eau suée



c) Perte d'eau cumulée dans le temps

Figure III.42 - Récapitulation des expériences et des résultats du modèle.

On peut conclure que, compte-tenu du large domaine de variation, les résultats fournis par le modèle sont corrects

- Les modifications apportées dans le domaine des réactions physiologiques semblent être positives. Les reproches fait au modèle d'origine de mal réagir aux conditions chaudes n'apparaissent pas ici.

- D'autre part, les modifications faites sur les modes de transfert avec l'environnement (décomposition des vitesses et échanges radiatifs) permettent de traiter ces conditions hétérogènes.

- Nous avons réalisé une simulation en faisant l'hypothèse que l'environnement est totalement homogène, tel que le supposait le modèle d'origine. Les températures cutanées moyennes ne sont pas très différentes. Par contre, au niveau local, les écarts sont importants.

- En ce qui concerne les vêtements, il apparait nettement que les équations utilisées sont trop globales. Les expériences ont été faites pour mettre en évidence l'effet de pompage. Or nos expressions n'en tiennent pas réellement compte. De plus, les résistances thermiques locales des habits sont très difficiles à trouver dans la littérature : nous sommes donc obligé de faire des suppositions sur leurs valeurs, ce qui peut être source d'erreurs supplémentaires.

- D'autre part, le modèle montre que dans tous les cas, au cours de la deuxième phase, il y a accumulation d'eau sur la peau: il est possible que, dans la réalité, cette eau est été absorbée par les vêtements. Or, ces derniers n'ayant pas été pesés en fin d'expérience, il ne nous est pas possible de savoir si cette absorption a réellement eu lieu. De plus nos équations ne tiennent pas du taux de reprise des tissus.

Remarque : Nous n'avons pas donné les résultats des températures internes, car il s'agit d'une donnée physiologique, qui ne nous intéresse pas réellement pour l'étude de l'interaction entre l'homme et son environnement.

CHAPITRE IV

APPLICATION DU MODELE

La comparaison modèle-expériences nous paraissant satisfaisante dans beaucoup de cas, nous avons essayé d'utiliser le modèle dans des cas plus complexes pour lesquels il n'y a pas d'expérience.

Nous observerons l'effet d'un courant d'air local sur une partie du corps, puis les réactions d'un sujet dans un habitat soumis à des conditions réelles.

IV.1. EFFET D'UN COURANT D'AIR

a) Les conditions climatiques

Un courant d'air local n'a pas le même effet sur le corps humain, selon les endroits où il a lieu ; les endroits les plus sensibles aux courants d'air semblent être la nuque ou les chevilles.

Nous avons réalisé plusieurs simulations de courants d'air sur la tête et sur les pieds. Ces deux segments ont environ la même surface cutanée et interviennent à part presque égale dans le calcul de la température cutanée moyenne, ce qui facilite la comparaison des résultats (les coefficients de pondération dans T_{sk} sont respectivement : 0,071 pour la tête et 0,066 pour les pieds).

Six simulations ont été réalisées : les trois premières (de 1 à 3) correspondent à un courant d'air sur la tête, les trois autres (de 4 à 6) sur les pieds. Dans tous les cas, la première phase correspond à la neutralité thermique d'un sujet nu, ($T_a = T_{murs} = 28$ °C, $V_a = 0,1$ m/s). Au temps noté 0, la vitesse ou la température d'air varie brusquement (variation type échelon), puis reste constante durant 90 minutes (phase 2).

Les numérotations utilisées et les variations correspondantes sont données dans le tableau ci-dessous.

numéro des simulations		phase 1		phase 2	
Tête	Pieds	T_a (°C)	V_a (m/s)	T_a (°C)	V_a (m/s)
1	4	28	0,1	25	0,1
2	5	28	0,1	28	1
3	6	28	0,1	25	1

b) Courant d'air sur la tête

Si on analyse tout d'abord l'effet d'un courant d'air sur la tête, on constate, (Figure IV.1) que les baisses de la température cutanée moyenne (T_{sk}) dans les trois cas sont faibles, inférieures à environ 0,3°C, ce qui est négligeable.

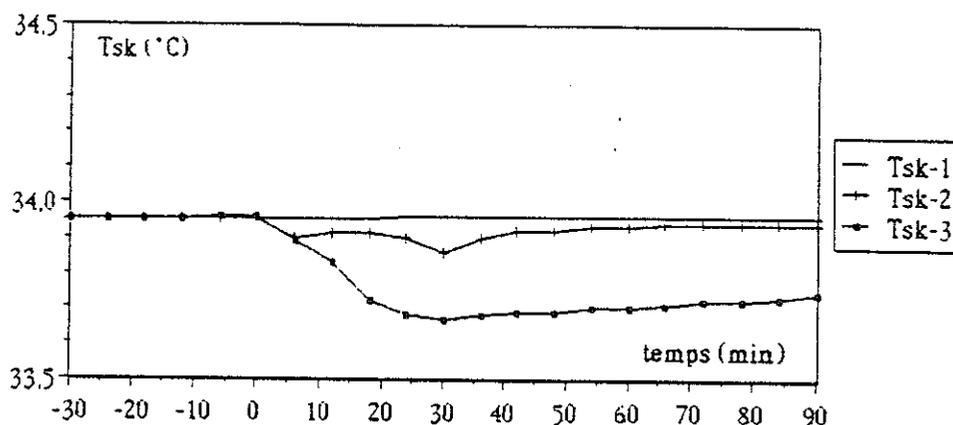


Figure IV.1 - Comparaison des variations de température cutanée moyenne (T_{sk}) lors d'un courant d'air sur la tête (cas 1, 2 et 3)

Par contre, si on observe les variations des températures cutanées locales dans les trois cas, on peut noter que les différentes parties du corps ne réagissent pas de la même façon.

La Figure IV.2 donne les résultats de la simulation n°1. La température de l'air a baissé de 3 °C sur la tête, ce qui provoque une augmentation de 40% des échanges convectifs sur la tête et entraîne une légère baisse de la température locale, mais pas de modification sur les autres parties du corps.

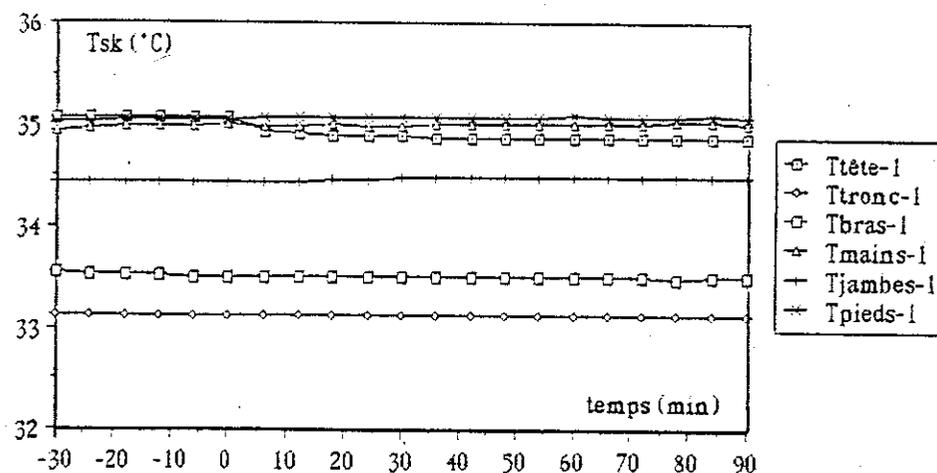


Figure IV.2 - Variations des températures locales dans le cas n°1 (baisse de température)

Par contre, lors de l'augmentation de vitesse (Figure IV.3), les échanges convectifs sur la tête sont multipliés par trois ; la température de la tête baisse plus nettement, environ 0,75°C ; les autres parties du corps ne varient presque pas, sauf les extrémités (mains et pieds). Ceci est dû au fait qu'après un certain temps, la température de la tête a suffisamment baissé pour déclencher un début de

vasoconstriction qui entraîne alors une légère chute de température de surface des extrémités, où la vasoconstriction est importante.

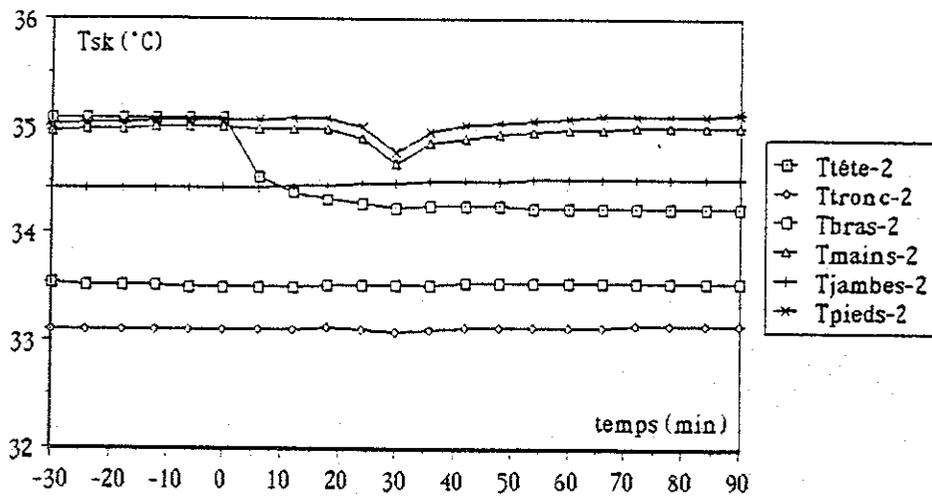


Figure IV.3 - Variations des températures locales dans le cas n°2 (augmentation de la vitesse).

Ce phénomène est très marqué dans le cas n°3 (Figure IV.4) ; les échanges convectifs sont alors multipliés par quatre. Dès l'apparition du courant d'air, la température cutanée de la tête chute brusquement (d'environ 1,5°C), ce qui entraîne, avec un léger retard, la vasoconstriction et explique la baisse importante des températures des extrémités (environ 1,2°C). On constate que le tronc commence aussi légèrement à se refroidir. Il faut noter qu'après les extrémités, c'est le segment où la vasoconstriction est la plus efficace.

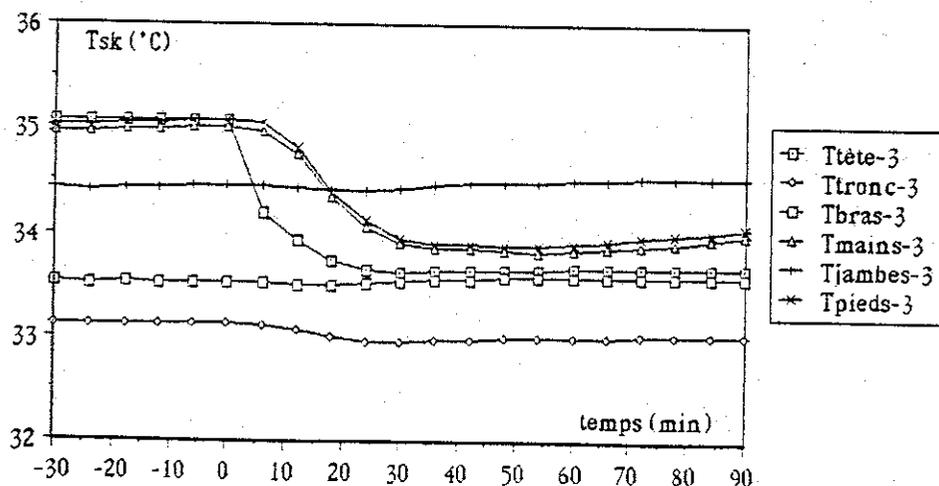


Figure IV.4 - Variation des températures locales dans le cas n°3 (baisse de température et augmentation de la vitesse).

c) Courant d'air sur les pieds

Si on analyse maintenant les effets d'un courant d'air sur les pieds, on constate (Figure IV.5) que les baisses de température cutanée moyenne dans les cas n°4, 5 et 6 sont moins importantes que dans les cas précédents (n°1, 2 et 3), alors que les pieds ont la même surface d'échange que la tête.

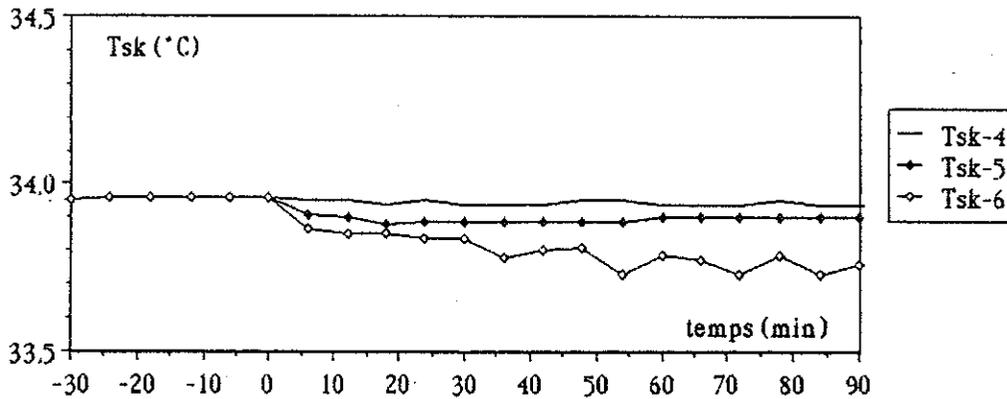


Figure IV.5 - Comparaison des variations de T_{sk} lors d'un courant d'air sur les pieds (n°4, 5 et 6)

Dans le cas n°5, il n'y a aucune variation de la température cutanée moyenne ; les températures locales ne varient pas non plus, sauf celle des pieds qui baisse très légèrement. Nous n'observerons en détail que le cas n°6. La Figure IV.6 laisse apparaître une baisse importante de la température des pieds (environ 3°C). La plupart des températures cutanées locales ne varie presque pas, sauf celle des mains, qui commencent à se refroidir après 1/2 heure d'exposition au courant d'air sur les pieds.

Ceci est dû au fait que la baisse de température cutanée des pieds n'est pas suffisante, lors des 20 premières minutes, pour déclencher des réactions. Les autres températures, pendant ce temps, ne varient pas. Après 30 minutes, il y a un début de vasoconstriction, qui entraîne des variations de température des autres segments (surtout les mains). Les oscillations sont dues au fait que le sujet est à la limite du déclenchement des réactions et, par conséquent, dans un état très instable.

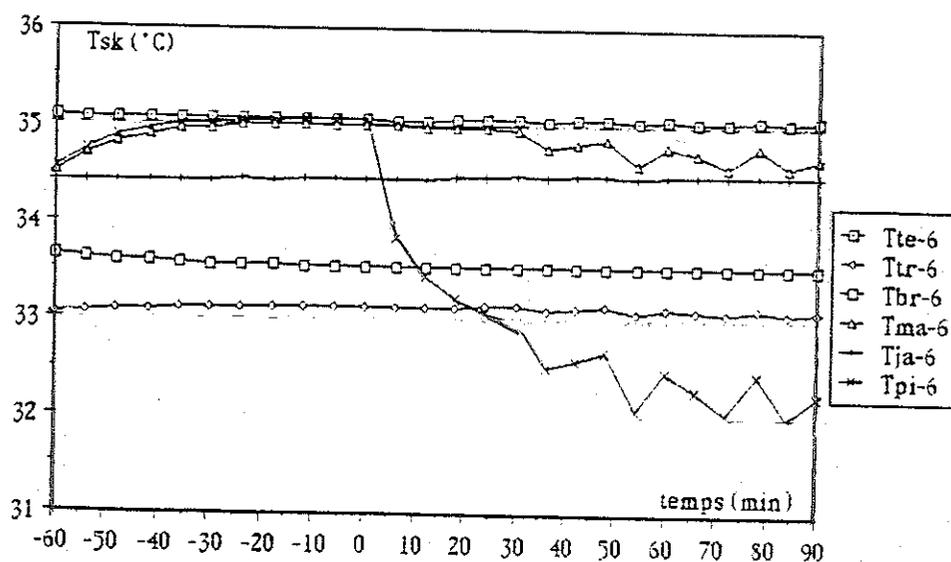


Figure IV.6 - Variations de températures cutanées locales dans le cas n°6, courant d'air sur les pieds (baisse de T_a , augmentation de V_a)

c) Comparaison des deux cas

Pour mieux comprendre la différence entre les phénomènes mis en jeu dans le cas où le courant d'air a lieu sur la tête ou sur les pieds, nous avons comparé les cas n°3 et 6 où la vitesse d'air et la température varient simultanément. Sur la Figure IV.7 donnant la comparaison de la température moyenne, on peut noter que le sens et l'amplitude de variation sont très comparables. Les écarts sont inférieurs à $0,1^\circ\text{C}$.

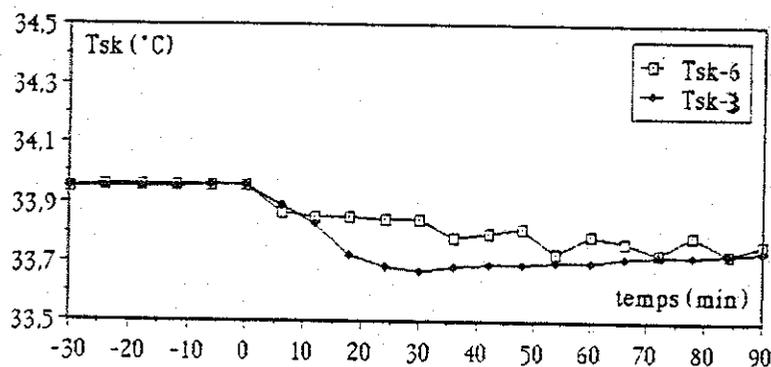


Figure IV.7 - Comparaison de l'évolution de T_{sk} dans les cas 3 et 6

Les différences de réactions entre les deux cas sont évidentes lorsqu'on compare les Figures IV.4 et IV.6. Dans le cas d'un courant d'air sur la tête, la baisse de T_{sk} est due à une baisse peu importante de plusieurs températures locales, alors

que, pour le courant d'air sur les pieds, elle est essentiellement due à une baisse importante de la température des pieds.

Ces différences de réactions sont dues à plusieurs causes :

- La production de chaleur totale de la tête représente environ 17% du métabolisme basal, alors que celle des pieds ne représente que 1%. Même si la vasoconstriction est maximale, il y aura toujours un apport de chaleur par conduction interne à la surface cutanée de la tête.

- Le coefficient de répartition de vasoconstriction est beaucoup plus important dans les pieds ; par contre, la répartition des frissons est plus importante dans la tête. Ces deux segments ont donc des comportements très différents lors de l'apparition des réactions de lutte contre le froid.

- Les coefficients de pondération (SkR), intervenant dans l'intégration des températures (cf. paragraphe II.2.1e) dans le système de régulation valent respectivement 0,08 pour la tête et 0,04 pour les pieds. Pour avoir un même signal de commande, il faut une baisse beaucoup plus forte de la température des pieds. Dans le cas n°3, la baisse de la température de la tête provoque un déclenchement presque immédiat des réactions de lutte contre le froid, alors que, dans le cas n°6, bien que la chute de température des pieds soit importante, les réactions se déclenchent de façon plus tardive et avec une amplitude plus faible.

Ces trois phénomènes amènent tous au même résultat : pour des déperditions locales égales, la tête se refroidit beaucoup moins vite que les pieds.

Dans le cas où le courant d'air est sur la tête, le sujet est nettement dans des conditions de lutte contre le froid, avec vasoconstriction et frissons (le métabolisme augmente très légèrement). Les réactions, même si elles varient dans le temps, restent toujours dans le même domaine. Par contre, dans le cas du courant d'air sur les pieds, le sujet a des réactions instables à la limite entre la neutralité et la zone de lutte contre le froid.

e) Conclusions

* On peut tout d'abord noter que des variations de température ou de vitesse d'air ont la même influence sur le corps, mais que leurs effets ne sont pas additifs. Les variations de température dans le cas n°3, par exemple, ne peuvent pas être déduites du cumul des variations qui ont lieu dans le cas n°1 et 2.

* D'autre part, la localisation du courant d'air a une influence très importante et seule une analyse fine peut en prévoir les conséquences. En effet, si les variations de la température cutanée moyenne sont très proches, au niveau local, il n'en est rien. Dans le cas n°6, le sujet aura probablement une impression d'inconfort local marqué ; il aura froid aux pieds uniquement, alors que dans le cas n°3, on peut prévoir une impression de froid non seulement sur la tête mais aussi sur les mains ou les pieds ; il sera probablement dans une situation d'inconfort généralisé.

IV. 2 PREVISION DANS L'HABITAT REEL

a) Conditions climatiques

L'habitat est une pièce de 25 m² de surface (5 X 5 m) et de 2,5 m de haut, avec une fenêtre de 4,5 m², simple vitrage, exposée au sud.

La pièce est à l'angle Est d'un bâtiment. Les murs Sud et Est donnent sur l'extérieur. Les autres sont internes au bâtiment et communiquent avec des locaux ayant la même température que le local étudié.

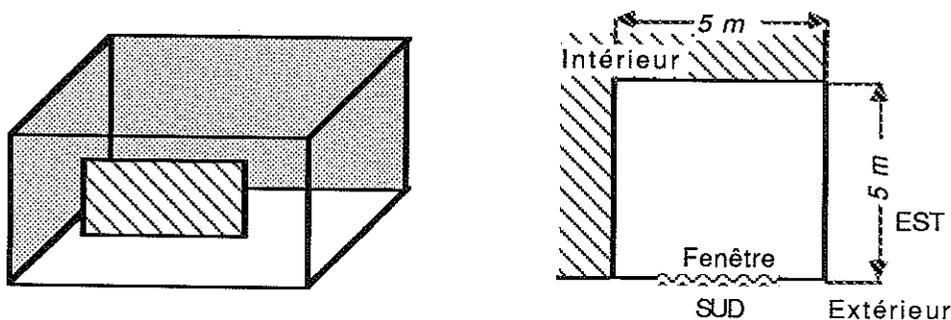


Figure IV.8 - Local étudié.

Le renouvellement d'air neuf est de 0,5 volume par heure. Le chauffage est assuré par plancher chauffant, avec une régulation en "tout ou rien", dont le point de consigne est à 20°C avec une bande morte de 1°C.

Le sujet est debout, à 1 m de la fenêtre, au repos ; son métabolisme est $M = 70$ W/m². Il porte des vêtements standard dont la résistance thermique est $I_{cl} = 1$ clo.

Dans des cas complexes comme celui-ci, il est impossible de tout analyser en détail, nous nous limiterons plutôt à une description globale des phénomènes.

b) Résultats

La Figure IV.9 donne les conditions climatiques auxquelles est soumis l'habitat. Il s'agit d'une météorologie réelle du mois de janvier. La température de l'air ($T_{\text{air-ext}}$) est assez basse et l'ensoleillement est faible.

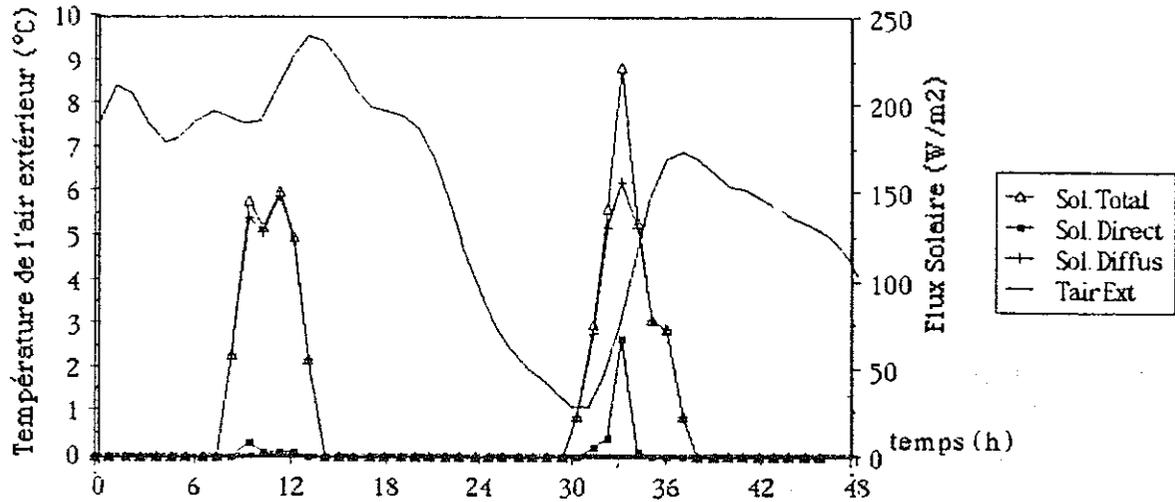


Figure IV.9 - Conditions climatiques extérieures.

($T_{\text{air-ext}}$: température de l'air extérieur, Sol. : rayonnement solaire (diffus, direct et total))

La Figure IV.10 montre les températures de surface internes du local. La fenêtre a une température basse, fortement influencée par les conditions extérieures. La température du plancher dépasse à peine 26°C (qui est la limite d'inconfort pour les sols) ; elle est essentiellement liée au fonctionnement de la pompe déclenchée par le régulateur. Les autres murs ont des températures proches de celle de l'air, mis à part les murs Est et Sud qui communiquent avec l'extérieur et sont légèrement plus froids.

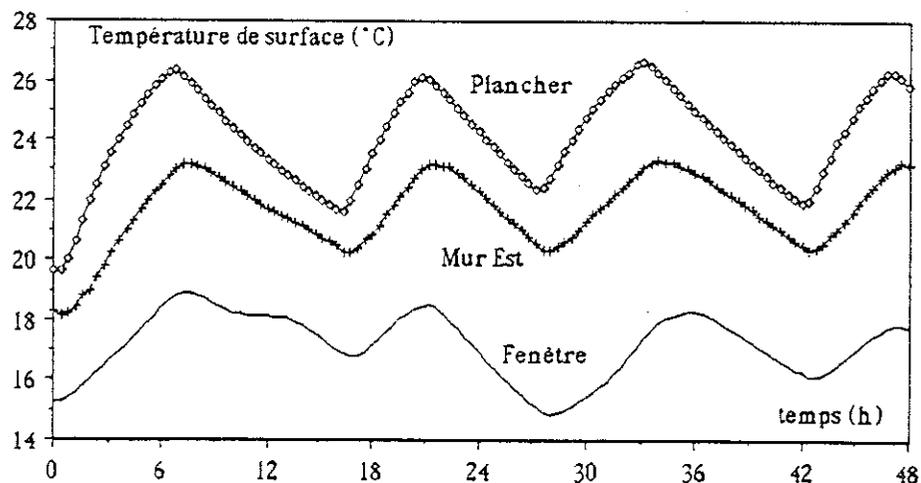


Figure IV.10 - Température de surface interne, du plancher, du mur Est et de la fenêtre.

On peut constater qu'il s'agit de conditions hétérogènes, il y a en moyenne 8°C d'écart entre les températures de la fenêtre et du plancher.

Les températures de rayonnement ne sont pas les mêmes sur tout le corps, comme le montre la Figure IV.11. Au niveau des pieds elle est plus élevée que pour la tête, car les pieds "voient" davantage le plancher dont la température est haute.

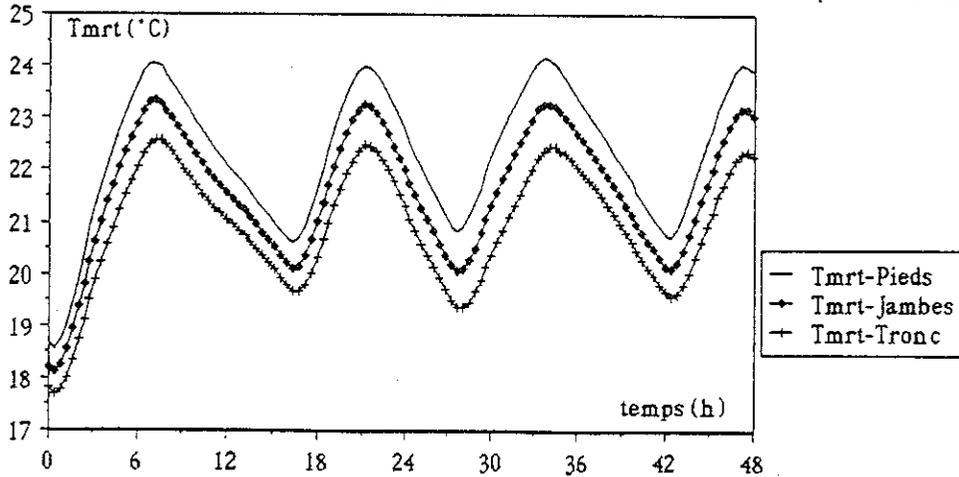


Figure IV.11 - Température moyenne de rayonnement sur le sujet pour le tronc, les jambes et les pieds.

Le sujet se trouve proche de la fenêtre : il est soumis à une asymétrie de rayonnement. La Figure IV.12 donne la différence de température de rayonnement ΔT_{mrt} , qui caractérise cette asymétrie, pour le tronc et les jambes. On constate que les variations dans le temps de cette asymétrie suivent les variations de climat extérieur, car ΔT_{mrt} est directement lié à l'écart de température entre la surface de la fenêtre et le reste de la pièce. D'autre part, le tronc étant la partie du corps la plus proche de la fenêtre, l'asymétrie est la plus forte sur cette partie : ΔT_{mrt} peut atteindre 3°C .

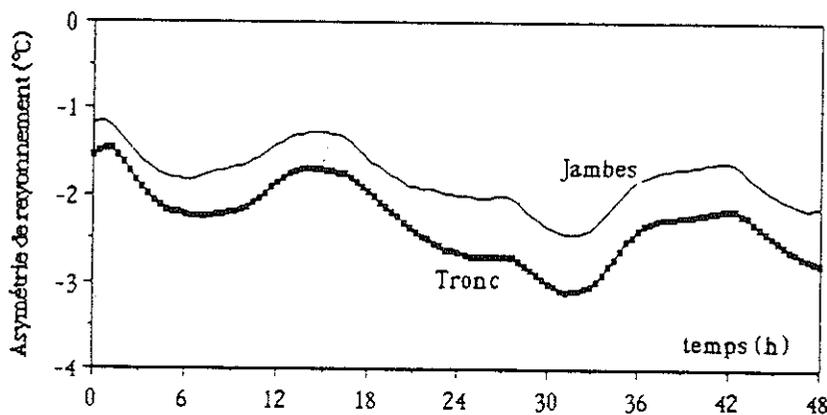


Figure IV.12 - ΔT_{mrt} asymétrie de température de rayonnement pour le tronc et les jambes.

La Figure IV.13 montre la température de l'air, de la peau et des habits. On remarque que les variations de T_{sk} et T_{cl} suivent les variations de T_a . La température des vêtements est en moyenne de 2°C inférieure à celle de la peau.

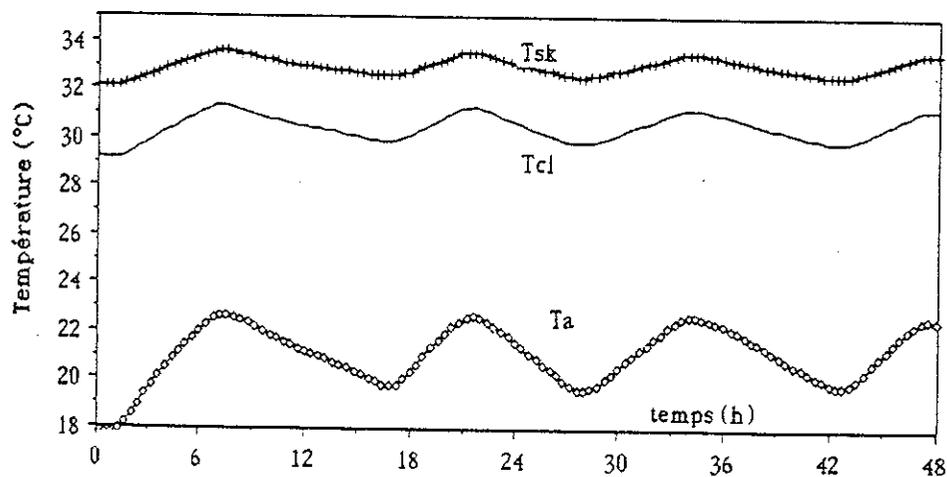


Figure IV.13 - Température de l'air (T_a), de la peau (T_{sk}) et des habits (T_{cl})

Observons les réactions du sujet uniquement sur les dernières 24 heures. On constate sur la Figure IV.14 que les parties du corps couvertes varient très peu. Par contre les extrémités (mains et pieds), ont des amplitudes de variation très importantes.

On peut comparer la température moyenne cutanée aux limites de confort et d'inconfort données par le LPPE (cf. annexe I)., Le confort est obtenu pour T_{sk} comprise entre $33,5^\circ\text{C}$ et $34,5^\circ\text{C}$; la limite d'inconfort froid est à $32,5^\circ\text{C}$.

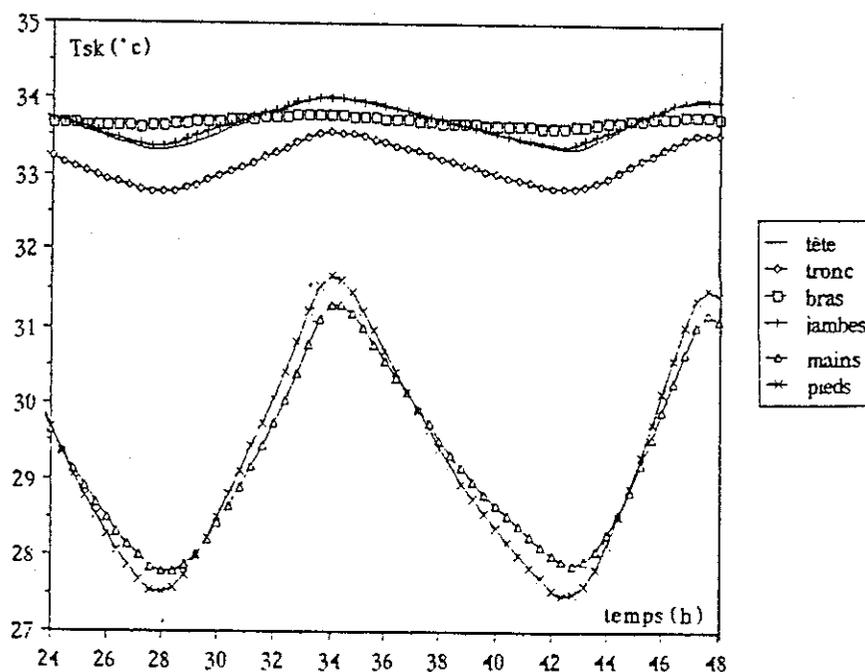


Figure IV.14 - Températures cutanées locales.

On peut prédire que le sujet sera en permanence en situation de confort global ou en confort légèrement dégradé, car T_{sk} varie entre $32,2^{\circ}\text{C}$ et $33,8^{\circ}\text{C}$.

On peut également comparer les températures locales aux valeurs données par le LPPE. Dans les périodes où le chauffage est arrêté, la température des mains est inférieure à la limite d'inconfort froid ($29,8^{\circ}\text{C}$). Il est donc probable que, dans ces conditions, le sujet s'en plaigne. Par contre, bien que la température des pieds soit basse, elle n'a pas atteint la limite d'inconfort de 27°C .

La Figure IV. 15 donne les quantités de chaleur produites et échangées par le corps.

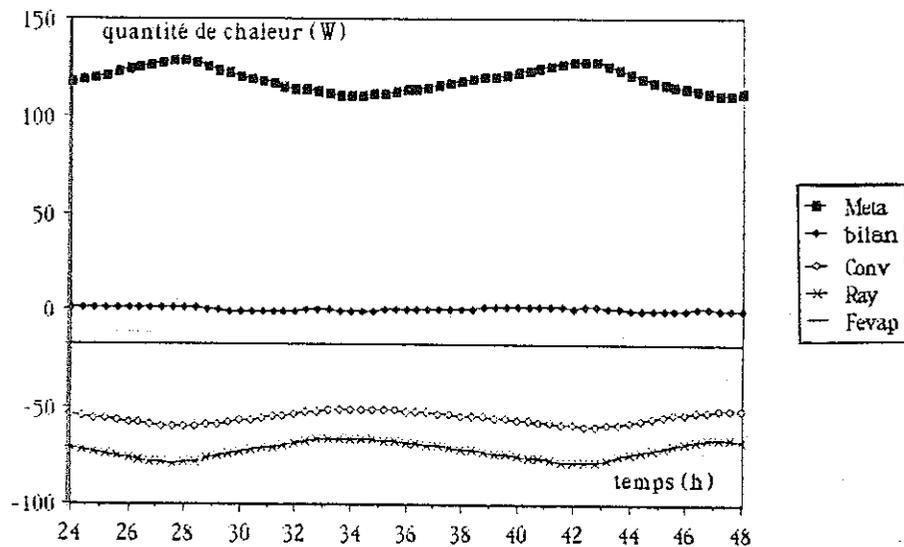


Figure IV.15 - Quantités de chaleur mises en jeu par le corps

On constate que :

- le métabolisme varie très légèrement ; il y a apparition de frissons pour les basses températures d'air, mais ce phénomène est de faible amplitude ;

- les pertes de chaleur par évaporation semblent être constantes ; en fait, elles varient très légèrement entre -16 et -18 W, en fonction des variations de pression de vapeur dans l'air, mais le sujet ne transpire jamais ;

- les pertes par convection et rayonnement suivent respectivement l'évolution des températures de l'air et des murs ; on peut noter que le rayonnement varie un peu plus que la convection, par suite de la plus grande amplitude de variation de la température de surface de la fenêtre. Il représente environ 50 % des pertes totales de chaleur, alors que la convection représente 40 % et l'évaporation 10 %.

- le bilan thermique du corps (HF) reste presque nul : les changements de l'ambiance sont assez lents pour que le sujet soit proche du régime stable ; il peut en permanence équilibrer son bilan thermique et les réactions qu'il met en jeu sont faibles. On peut en conclure qu'il est proche de la neutralité thermique.

Pour cette simulation, nous avons calculé le PMV et le PPD (cf. paragraphe I.4.2b), en supposant que la température moyenne de rayonnement est égale à celle calculée au niveau du tronc. On obtient les résultats donnés sur la Figure IV.16.

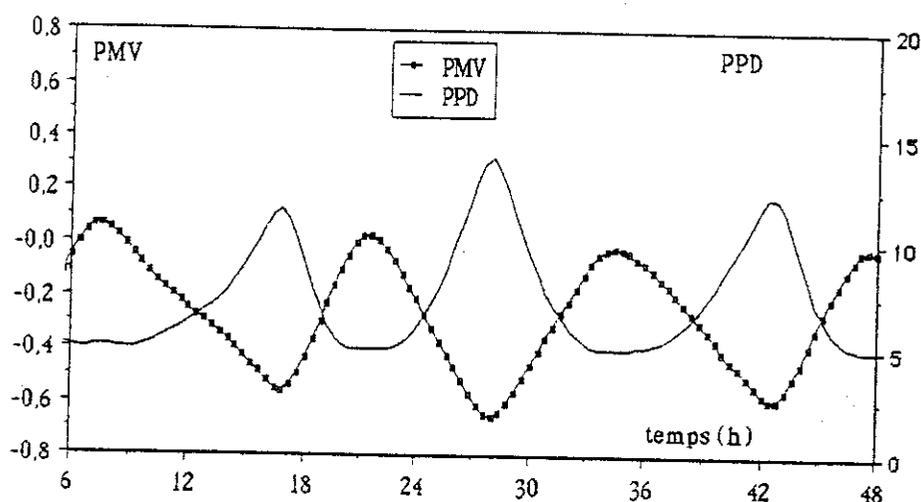


Figure IV.16 - Evolution du PMV et du PPD au cours du temps

Dans ce calcul, les seuls paramètres variables sont les températures de l'air et de rayonnement. Les autres paramètres (T_{sk} , évaporation) restent constants, car dans les équations ils ne dépendent directement que du métabolisme. Les variations du PMV suivent alors uniquement les conditions ambiantes.

On peut tout de même constater que le PMV reste en-dessous de 0, mais n'atteint jamais -1. Le sujet est proche de la neutralité thermique, mais il a légèrement froid, le nombre d'insatisfaits reste inférieur à 15%.

Pour des conditions aussi complexes, le PMV ne laisse pas apparaître les risques d'inconfort locaux. Seul un modèle complet permet de prédire ce genre de risques, tel que le froid aux mains que nous avons mentionné ci-dessus.

CONCLUSION

Au cours de ce travail, nous avons mis au point le logiciel MARCL en insérant le modèle de thermorégulation humaine, créé par J.A.J. Stolwijk, dans le programme de simulation de l'habitat TRNSYS. Pour cela, nous avons dû apporter des modifications importantes aux calculs des divers modes de transferts thermiques entre l'habitat et l'habitant. Notre effort a notamment porté sur les échanges par rayonnement qui jouent un rôle de tout premier plan.

Pour utiliser le modèle dans le domaine de l'habitat, nous avons dû le compléter en ajoutant des vêtements.

Le logiciel présenté dans ce mémoire nous permet actuellement d'atteindre la plupart des objectifs que nous nous étions fixés :

- avoir accès avec précision à des bilans thermiques globaux et locaux d'un sujet et caractériser l'impact des paramètres de l'ambiance sur les réactions physiologiques humaines (frissons, sudations, etc.) ;
- pouvoir étudier, grâce au calcul détaillé des échanges radiatifs, les effets de nouveaux modes de chauffage par rayonnement, tels que le plancher et le plafond chauffants, ainsi que les conséquences de l'isolation thermique non homogène d'un bâtiment (effet de surface froide) ;
- tenir compte des hétérogénéités spatiales de vitesse et de température d'air, dues au mode de chauffage ou de ventilation, ou à l'activité du sujet ;
- déterminer l'influence de la présence d'un occupant sur les grandeurs physiques caractérisant le local, notamment en ce qui concerne le taux d'humidité relative de l'air ;
- enfin, avoir accès aux données physiologiques d'un individu (température et mouillure cutanée) permettant aux physiologistes et aux psychologues d'aborder la prédiction du confort thermique ou de l'inconfort local.

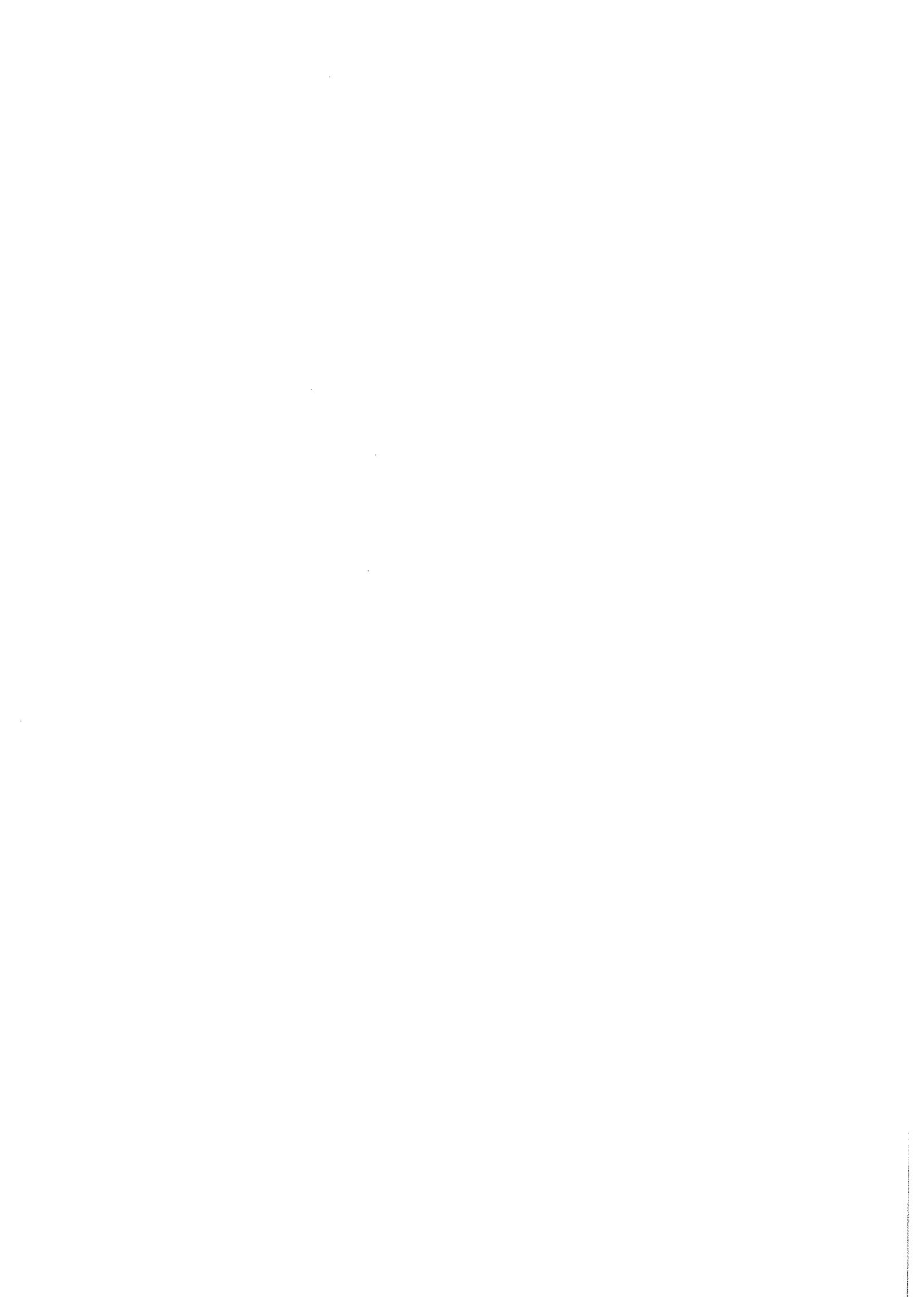
Le modèle de thermophysiology validé par les expériences s'avère fiable dans la plupart des cas. Nous avons remarqué qu'il réagit trop vite lors de changements brusques de climat ; il faut noter que les conditions expérimentales utilisées ici sont extrêmes et que de telles variations sont rares dans l'habitat.

La collaboration avec le LPPE se poursuit afin de valider le modèle de façon plus fine dans le domaine où nous voulons l'utiliser pour déterminer les limites de l'inconfort.

Une campagne d'expériences dans des conditions proches de la neutralité vient de se terminer dans ce Laboratoire. Leur but était de déterminer l'apparition d'inconfort lié à des hétérogénéités de l'ambiance, pour une même température opérative. Pour cela, diverses configurations ont été utilisées (plancher chaud ou froid, mur latéral chaud ou froid, vitesse d'air élevée). Le traitement des résultats expérimentaux et la comparaison avec le modèle sont en cours.

Des améliorations doivent être apportées, notamment en ce qui concerne les vêtements dont les équations sont trop simplistes. Une étude sur ce sujet est actuellement effectuée au Laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE



1. AZER N.Z., HSU S.
The prediction of thermal sensation from a simple model of human physiological response. ASHRAE Trans., Vol. 83, pp.88-102, 1977.
2. BANHIDI L.
Using a thermal manikin. Research on indoor thermal comfort, pp.14-17, 1987.
3. BELLOUVET J.C., BRU R., CORDIER A., GRANPEIX J.Y.
Is it necessary to take IR into account for comfort simulation ?. Intersol 85, pp.310-314, 1985.
4. BERGLUND L.G.
Mathematical models for predicting the thermal comfort response of building occupants. ASHRAE Trans., Vol. 84(1), pp.735-749, 1978.
5. BERGLUND L.G., GONZALEZ R.R.
Evaporation of sweat from sedentary man in humid environments. J. Applied Physiol., Vol. 42(5), pp.767-772, 1977.
6. BERGLUND L.G., OOHORI T., CUNNINGHAM D.J., GAGGE A.P.
Vapor resistance of clothing, local skin wettedness, and discomfort. ASHRAE Trans. Vol. 91(2A), pp.3-12, 1985.
7. BERGLUND L.G., STOLWIJK J.A.J.
The use of simulation models of human thermoregulation in assessing acceptability of complex dynamic thermal environments. Energy conservation strategies in building. Comfort, acceptability and health. J.A.J. Stolwijk editor, pp.157-191, 1972.
8. BINNERT Y., JAEAGY F., LECARPENTIER D., LIBERT J.P., CANDAS V., VOGT J.J.
Détermination sur modèle physique des coefficients globaux et locaux d'échange de chaleur par convection ; influence de la posture. Environnement thermique physiologie - psychologie, Arch. Sci. physiol., Vol. 27, A35-A43, 1973.
9. BLIGH J.
La défense contre le chaud et le froid. La Recherche, Vol. 17(117), pp.600-610, 1986.
10. BLIGH J., JOHNSON K.G.
Glossary of terms for thermal physiology. J. Applied Physiol., Vol. 35(6), pp.941-961, 1973.
11. BRU R.
Modélisation d'un habitat solaire. Thèse d'énergétique, Toulouse, 1983.
12. BRECKENRIDGE J.R., GOLDMAN R.F.
Solar load in man. J. Applied Physiol., Vol. 31(3), pp.659-663, 1971.
13. CABANAC M.
Physiological signals for thermal comfort. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, chap.12, pp.181-192, 1981.
14. CANDAS V.
Influence de la mouillure cutanée sur l'évolution du débit sudoral et des températures corporelles chez l'homme.. Thèse d'état, Strasbourg 1980.

15. CANDAS V., LIBERT J.P., VOGT J.J.
Human skin wettedness and evaporative efficiency of sweating. J. Applied Physiol., Vol. 46(3), pp.522-528, 1979.
16. CANDAS V., LIBERT J.P., SAGOT J.C., VOGT J.J.
Thermophysiological responses to humid heat : sex differences. J. Physiol., Paris, Vol. 78, pp.240-242, 1982.
17. CHAPPUIS P., PITTET P., JEQUIER E.
Heat storage regulation in exercise during thermal transients. J. Applied Physiol., Vol. 40(3), pp.384-392, 1976.
18. CLARK R.P.
Human skin temperature and convective heat loss. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, Chap.4, pp.57-76, 1981
19. CLARK J.A., Mc ARTHUR A.J., MONTHEIL J.L.
The physics of the microclimate. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, Chap.1, pp.13-27, 1981.
20. CLARK R.P., TOY N.
Forced convection around the human head. J. Physiol., Vol. 244, pp.295-302, 1975.
21. CORDIER A., DERBEL H., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Influence du vêtement sur le confort thermique : Modélisation en régime dynamique. J.I.T.H., Alger, Novembre, 1989. (accepté, à paraître).
22. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Simulation of an occupied building for comfort analysis. I.S.E.S., Vol. 4, pp.3275-3279, W.H.Bloss, F.Pfisterer, Hambourg, RFA, Sept. 1987.
23. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
A simulation tool for man-building interaction. J.I.T.H., Vol. 2, pp.574-579, Lyon, 1987.
24. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Architecture et confort. COFEDES, Mars 1989.
25. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Comportement thermique d'un habitant. Workshop W.67, Sophia Antipolis, 1989.
26. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Cold surface influence on thermal comfort. I.S.E.S., Kobé Sept. 1989, (à paraître).
27. CORDIER A., THELLIER F.
Modèle de bilan thermique du corps humain. Journées de la S.F.T., Mars 1988.
28. DEDEAR R.J., AULICIEMS A.
Validation of Predicted Mean Vote model of thermal comfort in six Australian field studies. ASHRAE Trans., Vol. 91(2B), pp.452-467, 1985.
29. DESSAGNE J.M.
Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique, Le profil de confort UCRES. Clima 2000, Copenhague 1985.

30. DEVAL J.C.
Le confort thermique en climat tempéré. Revue de Physique Appl., Vol. 19, pp.513-531, 1984.
31. DOHERTY T.J., ARENS E.
Evaluation of physiological bases of thermal comfort models. ASHRAE Trans., Vol. 94(1), pp. 1371-1384, 1988.
32. FANGER P.O.
The prediction of comfort and acceptability of complex thermal environments. Energy conservation strategies in building. Comfort, acceptability and health. J.A.J. Stolwijk editor, pp.132-142, 1972.
33. FANGER P.O.
Thermal comfort. Mc Graw Hill book company, New-York, 1970.
34. FANGER P.O.
Les exigences de confort thermique. Les applications du thermo-conditionnement à la thermique du bâtiment, Lyon, Mai 1983.
35. FANGER P.O., BANHIDI L., OLESEN B.W., LANGKILDE G.
Comfort limits for heated ceilings. ASHRAE Trans., Vol. 86(2), pp.141-155, 1980.
36. FANGER P.O., CHRISTENSEN N.K.
Perception of draught in ventilated spaces. Ergonomics, Vol. 29(2), pp.215-235, 1986.
37. FANGER P.O., IPSEN B., LANGKILDE G., OLESEN B.W., CHRITENSEN N., TANABE S.
Comfort limits for asymmetric thermal radiation. Energy and buildings, Vol. 8, pp.225-236, 1985.
38. FANGER P.O., OSTERGAARD J., OLESEN S., MADSEN T.L.
The effect on man's comfort of a uniform air flow from different directions. ASHRAE Trans., Vol. 80(2), pp.142-157, 1974.
39. FOBELETS A.P., GAGGE A.P.
Rationalization of the effective temperature ET^ , as a measure of the enthalpy of the human indoor environment.* ASHRAE Trans., Vol. 94, 1988.
40. GAGGE A.P.
Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation. Fed. proc. 32, pp.1572-1582, 1973.
41. GAGGE A.P.
The new effective temperature (ET^) - an index of human adptation to warm environments.* Environmental physiology, Elsevier North Holland, Horvath Yousef eds., 1980.
42. GAGGE A.P.
Rationnal temperature indices of thermal comfort. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, Chap.5, pp.79-98, 1981.
43. GAGGE A.P., FOBELETS A.P., BERGLUND L.G.
A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Trans., Vol. 92(2B), pp.709-731, 1986.

44. GAGGE A.P., STOLWIJK J.A.J., SALTIN B.
Comfort and thermal sensations and associated physiological response during exercise at various ambient temperatures. Environmental research, Vol. 2, pp.209-229, 1969.
45. GALEOU M., GRIVEL F., CANDAS V.
Le confort thermique : aspects physiologiques et psychologiques. Etude bibliographique. Rapport 115p., Strasbourg 1989.
46. GIVONI B., GOLDMAN R F.
Predicting metabolic energy cost. J. Appl. Physiol., Vol 30(3), pp.429-433, 1971.
47. GIVONI B., GOLDMAN R F.
Predicting rectal temperature response to work, environment, and clothing. J. Applied Physiol., Vol. 32(6), pp.812-822, 1972.
48. GONZALEZ R.R., PANDOLF K.B., GAGGE A.P.
Heat acclimation and decline in sweating during humidity transients. J. Applied Physiol., Vol. 36(4), pp.419-425, 1974.
49. GORDON R.G., ROEMER R.B., HORVATH S.M.
A mathematical model of human temperature regulatory system - Transient cold exposure response. IEEE Trans. on biomed. eng., Vol. BME-23, n° 6, 1976.
50. HARDY J.D.
Regulation of body temperature in man - An over view. Energy conservation strategies in building. Comfort, acceptability and health. J.A.J. Stolwijk editor, pp.14-37, 1972.
51. HARDY J.D., STOLWIJK J.A.J.
Partitional calorimetric studies of man during exposures to thermal transients. J. Applied Physiol., Vol. 21(6), pp.1799-1806, 1966.
52. HASLAM R.A., PARSONS K.C.
A comparison of models for predicting human response to hot and cold environments. Ergonomics, Vol. 30(11), pp.1599-1614, 1987.
53. HASLAM R.A., PARSONS K.C.
An evaluation of computer-based models that predict human responses to the thermal environment. ASHRAE Trans., Vol. 94 , 1988.
54. HAVENITH G
Individual parameters in thermoregulatory control - A review. Institute for perception TNO. report IZF 1985.
55. HENSEL H.
Neural process in thermoregulation. Physiological reviews, Vol. 53(4), pp.949-1017, 1973.
56. HOUDAS Y.
Modelling of heat transfer in man. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, Chap.7, pp.111-120, 1981.
57. HOUDAS Y., GUIEU J.D
Le système thermo-régulateur de l'homme système régulé ou système asservi?. Environnement thermique physiologie - psychologie, Arch. Sci. Physiol., 27, A311-A338, 1973.

58. JOHNSON G.T., WATSON J.D.
Modelling person-shapes for thermal comfort studies. Int. J. Biometer., Vol.31(1), pp.33-43, 1987
59. KERSLAKE D.M.
The stress of hot environments. Monograph of the physiological society N° 29, Cambridge university press, London, 316 p., 1972.
60. KLEIN S.H., BECKMAN W.A.,
TRNSYS, A simulation program. ASHRAE Trans., Vol. 76, 1971.
61. LENZI, P., LIBERT J.P., FRANZINI C., CIANCI T., GUIDALOTTI P.L.
Short-term thermoregulatory adjustments involving opposite regional temperature changes. J. Therm. Biol., Vol. 11(3), pp.151-156, 1986.
62. LIBERT J.P., CANDAS V., VOGT J.J.
Sweating response in man during transient rises of air temperature. J. Applied Physiol., Vol. 44(2), pp.284-290, 1978.
63. LOTENS W.A.
Comparaison of thermal predictive models for clothed humans. ASHRAE Trans. Vol. 94(1), pp.1321-1341, 1988.
64. MAIRIAUX P., LIBERT J.P., CANDAS V., VOGT J.J.
Prediction of strain for intermittent heat exposures. Ergonomics, Vol. 29(7), pp.913-923, 1986.
65. Mc CULLOGH E.A., JONES B.W., HUCK J.
A comprehensive data base for estimating clothing insulation. ASHRAE Trans., Vol. 91, 1985.
66. Mc INTYRE M.A.
Indoor climate. Architectural science series. Applied sciences publishers, London, 443p., 1980.
67. MEYER J.P.
Prévision de la température cutanée moyenne : effets des paramètres d'ambiance thermique de l'exercice musculaire et de l'acclimatement à la chaleur. Thèse de médecine, n° 174, Strasbourg 1981
68. MISSENARD F.A.
Coefficient d'échange de chaleur du corps humain par convection en fonction de la position de l'activité du sujet et de l'environnement. Environnement thermique physiologie - psychologie, Arch. Sci. Physiol., Vol. 27, A45-A50, 1973.
69. MITCHELL J.W., NADEL E.R., STOLWIJK J.A.
Respiratory weight losses during exercise. J. Applied Physiol., Vol. 32(4), pp.474-476, 1972.
70. MONCHOUX F., SERIN G.
Performances hygrothermiques des vêtements. Journées de la S.F.T. Mars 1988.
71. NADEL E.R., BULLARD R.W., STOLWIJK J.A.J.
Importance of skin temperature in the regulation of sweating. J. Applied Physiol, Vol. 31(1), pp.80-87, 1971.

72. NADEL E.R., MITCHELL J.W., SALTIN B., STOLWIJK J.A.J.
Peripheral modifications to the central drive for sweating. J. Applied Physiol. Vol. 31(6), pp.828-833, 1971.
73. NADEL E.R., STOLWIJK J.A.J.
Sweat gland response to the efferent thermoregulatory signal. Environnement thermique physiologie - psychologie. Arch. Sci. Physiol., 27, A67-A77, 1973.
74. NEWBOROUGH M., PROBERT S.D.
Improving the thermal comfort of sedentary man. Applied Energy, Vol. 17, pp.283-299, 1984.
75. NIELSEN B., ODDERSHEDE I., TORP A., FANGER P.O.
Thermal comfort during continuous and intermittent work. Indoor climate, Danish building Research Institute, P.O. Fanger, O. Valjorne eds. pp.447-490, Copenhagen 1979.
76. NISHI Y.
The role of air velocity in promoting comfort and acceptability of thermal environments of 18-30°C. Energy conservation strategies in building. Comfort, acceptability and health. J.A.J. Stolwijk editor, pp.71-94, 1972.
77. NISHI Y.
Direct evaluation of the convective heat transfer coefficient for various activities and environments. Environnement thermique physiologie - psychologie. Arch. Sci. Physiol., Vol. 27, A59-A66, 1973.
78. NISHI Y.
Measurement of thermal balance of man. Bioengineering thermal physiology and comfort. K. Cena & J.A. Clark editor, Elsevier, chap. 2, pp.29-39, 1981.
79. NISHI Y., GAGGE A.P.
Moisture permeation of clothing - A factor governing thermal equilibrium and comfort. ASHRAE Trans., Vol. 76(1), pp.137-145, 1970.
80. NISHI Y., GAGGE A.P.
Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation. J. applied physiol., Vol. 29(6), pp.830-838, 1970.
81. NISHI Y., GONZALEZ R.R., GAGGE A.P.
Direct measurement of clothing heat transfer properties during sensible and insensible heat exchanges with thermal environment. ASHRAE Trans., Vol. 81(2), pp.183-199, 1975.
82. OLESEN B.W.
Local thermal discomfort. Thermal comfort. Heat Stress. Brüel & Kjør Technical review, 1972.
83. OLESEN S., BASSING J.J., FANGER P.O.
Physiological comfort conditions at sixteen combinations of activity, clothing, air velocity and ambient temperature. ASHRAE Trans., Vol.78(2), pp.199-206, 1972.
84. OLESEN B.W., FANGER P.O.
The skin temperature distribution for resting man in comfort. Environnement thermique physiologie - psychologie. Arch. Sci. Physiol., Vol. 27, A385-A393, 1973.

85. OLESEN B.W., MORTENSEN E., THORSAUGE J., BERG-MUNCH B.
Thermal comfort in a room heated by different methods. ASHRAE Trans., Vol. 86(1), pp.34-48, 1980.
86. OLESEN B.W., SHOLER M., FANGER P.O.
Discomfort causes by vertical air temperature differences. Indoor climate, Danish Building Institute, Fanger P.O. & Valjorne O. eds., pp.581-579, 1979.
87. OLESEN B.W., THORSAUGE J..
Differences in comfort sensations in spaces heated by different methods. Indoor climate, Danish Building Institute, Fanger P.O. & Valjorne O. eds., pp.645-676, 1979.
88. OOHORI T., BERGLUND L.G., GAGGE A.P.
Comparison of current two-parameter indices of vapor permeation of clothing - As factors governing thermal equilibrium and human comfort. ASHRAE Trans., Vol. 90(2A), pp.85-101, 1984.
89. PHELIPEAU D., FERRUS L., VARENE P.
Les échanges thermiques respiratoires chez l'homme en fonction de la température du gaz inspiré. J. Physiol., Paris, Vol. 78, pp.163-169, 1982.
90. RAPP G.M.
Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low velocities. ASHRAE Trans., Vol. 79, pp.75-87, 1973.
91. RHOLES F.H., HASHINAGA M., YAMADA T.
Measuring the comfort-producing effectiveness of space heaters during transient warming. ASHRAE Trans., Vol. 92(2B), pp.747-760, 1986
92. SACADURA J.F.
Initiation aux transferts thermiques. Technique & documentation, 445 p., Paris 1980.
93. SALTIN B., GAGGE A.P., STOLWIJK J.A.J.
Body temperatures and sweating during thermal transients caused by exercise. J. Applied Physiol., Vol. 28(3), pp.318-327, 1970.
94. SPRAGUE C.H., JAI R.B., NEVINS R.G., AZER N.Z.
The prediction of thermal sensation for man in moderate thermal environment via a simple thermoregulatory model. ASHRAE Trans., Vol. 80(1), pp.130-146, 1974.
95. STOLWIJK J.A.J.
Mathematical model of thermoregulation. Physical & behavioral temperature regulation, edited by J.D. Hardy, A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk. Thomas publisher Springfield, chap. 48, pp.703-721, 1970.
96. STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D.
Partitional calorimetric studies of reponses of man to thermal transients. J. Applied Physiol., Vol. 21(3), pp.967-977, 1966.
97. STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D.
Temperature regulation in man - A theoretical study. Pflügers Arch. Gen. Physiol., Vol. 291, pp.129-162, 1966.

98. STOLWIJK J.A.J., HARDY J.D.
Control of body temperature. Handbook of physiology - reaction to environmental agents, Chap. 4, pp.45-68, 1971.
99. STOLWIJK J.A.J., NADEL E.R.
Thermoregulation during positive and negative work. Federation proceeding Vol. 32(5), pp.1607-1613, 1973.
100. STOLWIJK J.A.J., NADEL E.R., WENGER C.B., ROBERTS M.F.
Development and application of a mathematical model of human thermoregulation. Environnement thermique physiologie - psychologie. Arch. Sci. Physiol., Vol. 27, A303-A310, 1973.
101. TANAKA M., YAMAZAKI S., OHNAKA T., TOCHIHARA Y., YOSHIDA K.
Physiological reactions to different vertical (head-foot) air temperature differences. Ergonomics, Vol. 29(1), pp.131-143, 1986.
102. THELLIER F.
L'habitant dans l'habitat. D.E.A. d'énergétique Toulouse-Perpignan, 50p., 1986.
103. THELLIER F.
Contribution à l'étude de l'influence de l'habitant sur le comportement thermique d'une enceinte habitable. Rapport IRBât. n°1, 20p. Sept. 1987 & n°2, 23p., Sept. 1988.
104. THELLIER F.
Analyse des paramètres de confort thermique par modélisation d'un individu dans son habitat. Rapport A.I.C.V.F. 23p., Mars 1988.
105. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G.
Analyse des paramètres de confort thermique par modélisation d'un individu dans son habitat. Chauffage Ventilation Conditionnement, Vol. 1/2, pp.27-32, 1989.
106. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., GRIVEL F., CANDAS V.
Influence de l'environnement sur le corps humain : Modélisation d'un bâtiment occupé. C.I.B., Juin 1989.
107. VARENE P.
Computation of respiratory heat exchanges. J. Applied Physiol. Vol. 61(4), pp.1586-1589, 1986.
108. VOGT J.J.
L'ambiance thermique de travail. Archives des maladies professionnelles de médecine du travail et de la sécurité sociale, Vol. 40(1-2,) pp.131-190, Paris 1979.
109. VOGT J.J., MEYER J.P., CANDAS V., LIBERT J.P., SAGOT J.C.
Pumping effects on thermal insulation of clothing worn by human subjects. Ergonomics, Vol. 26(10), pp.963-974, 1983.
110. WERNER J., BUSE M.
Temperature profiles with respect to inhomogeneity and geometry of the human body. J. Applied Physiol., Vol. 65(3), pp.110-118, 1988.
111. WISSLER E.H.
Comparison of computed results obtained from two mathematical models - A simple 14-node model and a complex 250-node model. Symposium international de thermorégulation comportementale, pp.455-458, Lyon 1970.

112. YILMAZ Z.
Evaluation of built environment from the thermal comfort viewpoint.
ASHRAE Trans., Vol. 93(1), pp.549-563, 1987.
113. Normes Françaises
Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. Norme expérimentale X35-201, 1981
Ambiances chaudes. Détermination analytique de la contrainte thermique. Norme expérimentale X35-204, 1982.
114. Norme internationale ISO
Moderate thermal environments, determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. ISO 7730-1984.
115. ASHRAE Handbook, Fundamentals
Physiological principles for comfort and health. Chap.8, pp.8.1-8.31, 1985.

Références additives

116. HERNOT D., PORCHER G.
Thermique appliquée aux bâtiments . Les éditions parisiennes chaud froid plomberie.
117. HOEN P.J.
Energy consumption and indoor environment in residences. Ph. D thesis, Eindhoven University of technology, 1987.

ANNEXES

ANNEXE 1

PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES ET CONFORT OU INCONFORT THERMIQUE

Les valeurs des paramètres physiologiques, associés à l'impression de confort ou d'inconfort, données ici ont été établies par le L.P.P.E., après une étude bibliographique [45]. Elles sont récapitulées dans un tableau.

* Sujet dévêtu (Icl = 0,1 clo)

sites corporels	Plages assurant le confort	limites inférieure et supérieure induisant l'inconfort
T _{int} repos travail (M>2met)	36,8 < T _{int} < 37,2	T _{int} < 36,5 et 37,4 < T _{int}
	37,0 < T _{int} < 37,5	(a) et 37,9 < T _{int}
T _{sk} - cutanée moyenne(b)	33,5 < T _{sk} < 34,5 (c)	T _{sk} < 32,5 et 35,5 < T _{sk}
Cutanées locales (d)		
T _{tête}	32,5 < T _{tête} < 34,5	T _{tête} < 32,0 et 35,5 < T _{tête}
T _{tronc}	33,4 < T _{tr} < 34,4	T _{tr} < 32,5 et 35,0 < T _{tr}
T _{bras} T _{skl}	31,5 < T _{br} < 33,8	T _{br} < 29,5 et 34,8 < T _{br}
T _{main}	30,0 < T _{ma} < 34,0	T _{ma} < 27,0 et 35,0 < T _{ma}
T _{jambe}	30,5 < T _{ja} < 33,0	T _{ja} < 29,8 et 34,4 < T _{ja}
T _{piéd}	28,0 < T _{pi} < 34,5	T _{pi} < 27,0 et 35,5 < T _{pi}

* Sujet vêtu (Icl = 0,6 clo)

T _{int} repos travail (M>2met)	36,8 < T _{int} < 37,2	T _{int} < 36,5 et 37,4 < T _{int}
	37,0 < T _{int} < 37,5	(a) et 37,9 < T _{int}
T _{sk}	33,0 < T _{sk} < 34,5	T _{sk} < 32,0 et 34,8 < T _{sk}
T _{tête}	33,0 < T _{tête} < 34,5	T _{tête} < 32,0 et 35,0 < T _{tête}
T _{tronc}	32,8 < T _{tr} < 34,6	T _{tr} < 31,2 et 34,9 < T _{tr}
T _{bras} T _{skl}	31,2 < T _{br} < 32,8	T _{br} < 29,6 et 34,6 < T _{br}
T _{main}	30,0 < T _{ma} < 34,0	T _{ma} < 25,5 et 34,5 < T _{ma}
T _{jambe}	30,0 < T _{ja} < 33,3	T _{ja} < 29,5 et 34,7 < T _{ja}
T _{piéd}	29,5 < T _{pi} < 33,0	T _{pi} < 29,0 et 35,5 < T _{pi}

Tableau A.1 - Récapitulatif des limites d'inconfort et de confort thermique.

Les lettres entre parenthèses dans le tableau correspondent à aux remarques suivantes :

(a) : On ne peut pas donner de limite inférieure d'inconfort pour la température interne, car T_{int} demeurant basse lors de l'exercice ne peut se

rencontrer que pour des conditions ambiantes très froides ; dans ce cas les températures cutanées locales et moyenne sont très basses elles aussi.

(b) : Il n'est pas impossible qu'en cas de production de chaleur métabolique élevée (activité physique intense), des jugements d'agrément soient exprimés en association avec des températures cutanées basses et une température interne élevée. La somme de deux inconforts pourrait générer le confort, mais il vaut mieux cependant ne pas retenir cette éventualité dans les conditions de la vie quotidienne dans l'habitat.

(c) - Selon Fanger la température T_{sk} associée au confort est liée au métabolisme par la relation :

$$T_{sk} = 35,7 - 0,0275 M \quad , \quad \text{soit } T_{sk} = 34,1^{\circ}\text{C au repos}$$

(d) - Une personne peut se trouver en condition de neutralité thermique globale, mais pas en situation de confort si une partie de son corps est chaude alors que l'autre est froide. C'est pourquoi il est nécessaire de connaître les plages de température locale des divers segments corporels compatibles avec le confort.

La plupart des auteurs donnent une relation linéaire entre la sensation de confort, DISC, et la mouillure cutanée moyenne, ω , de la forme : $\text{DISC} = A \omega + B$

DISC est une échelle de confort-inconfort à 4 échelons. Les expressions les plus courantes sont données ci-dessous.

Equations	Conditions	Auteurs
$\text{DISC} = 3,71 \omega + 0,086$	Sujet dévêtu au repos	Gagge et al. (1973)
$\text{DISC} = 2,40 \omega - 0,100$	Sujet dévêtu au travail	Gonzalez et al. (1978)
$\text{DISC} = 4,13 \omega + 0,130$	Sujet vêtu au repos	Berglund et al. (1984)
$\text{DISC} = 5,06 \omega + 0,090$	" " " "	Cunningham et al. (1985)
$\text{DISC} = 3,60 \omega - 0,250$	Sujet vêtu au repos ou travail	Höppe et al. (1985)

Les valeurs données dans le tableau viennent de la résolution des ces équations $\text{DISC} = f(\omega)$, avec $\text{DISC} = 1$ pour les limites de confort et $\text{DISC} = 1,5$ pour les limites d'inconfort.

Mouillure totale : ω	limite supérieure de confort	limite inférieure d'inconfort
<i>Sujet dévêtu</i> repos	$\omega < 25 \%$	$30 \% < \omega$
travail ($M > 2 \text{ met}$)	$\omega < 40 \%$	$50 \% < \omega$
<i>Sujet vêtu</i> repos	$\omega < 20 \%$	$25 \% < \omega$
travail ($M > 2 \text{ met}$)	$\omega < 40 \%$	$50 \% < \omega$

ANNEXE II

Résultats expérimentaux : les conditions proches de la neutralité

Nous avons choisi de détailler la première expérience, NU-A. La température de l'air varie de 8°C de part et d'autre de la neutralité, par paliers de 2°C toutes les 8 minutes. A partir du temps noté 0, elle passe par le minimum entre les minutes 25 et 32, et par le maximum entre 89 et 96 minutes.

La Figure A.II.1 donne les températures locales et moyennes des 6 sujets au cours du temps. Les sujets notés a,b,c, sont ensemble dans le premier groupe, d,e,f, dans le deuxième.

On peut constater que les courbes ont la même allure, mais que leurs amplitudes et leurs domaines de variation sont légèrement différents. Nous analysons ici en détails ces différences.

En fin de régime stable de neutralité, on peut reporter les températures cutanées moyenne et locales de chaque sujet dans le tableau A.II.1.

On note :

- T_{sk} la température moyenne cutanée de chaque sujet,
- ΔT_l représente l'écart entre la température maximum et minimum d'un même site corporel (1, 2, 3, 4, ou sk,) pour tous les sujets.
- ΔT_s représente l'écart entre la température maximum et minimum d'un même sujet (a, b, c, d, e ou f).
- T_{skl-m} moyenne des températures cutanées de tous les sujets.

sites corporels	sujets	a	b	c	d	e	f	T_{skl-m}	ΔT_l
bras	(1)	34,0	35,8	34,7	33,9	33,4	34,6	34,4	2,4
tronc	(2)	34,2	35,1	35	34,3	34,7	35,2	34,75	0,9
cuisse	(3)	35,1	35,7	35,0	34,0	34,0	34,8	34,77	1,7
mollet	(4)	35,2	36,4	34,5	33,5	33,4	33,8	34,47	3,0
	T_{sk}	34,52	35,69	34,81	33,96	33,91	34,66	34,59	1,78
	ΔT_s	1,2	1,3	0,5	0,8	1,3	1,4	0,37	

Tableau A.II.1 - Températures cutanées locales et moyennes des 6 sujets en fin de neutralité

A.II.2

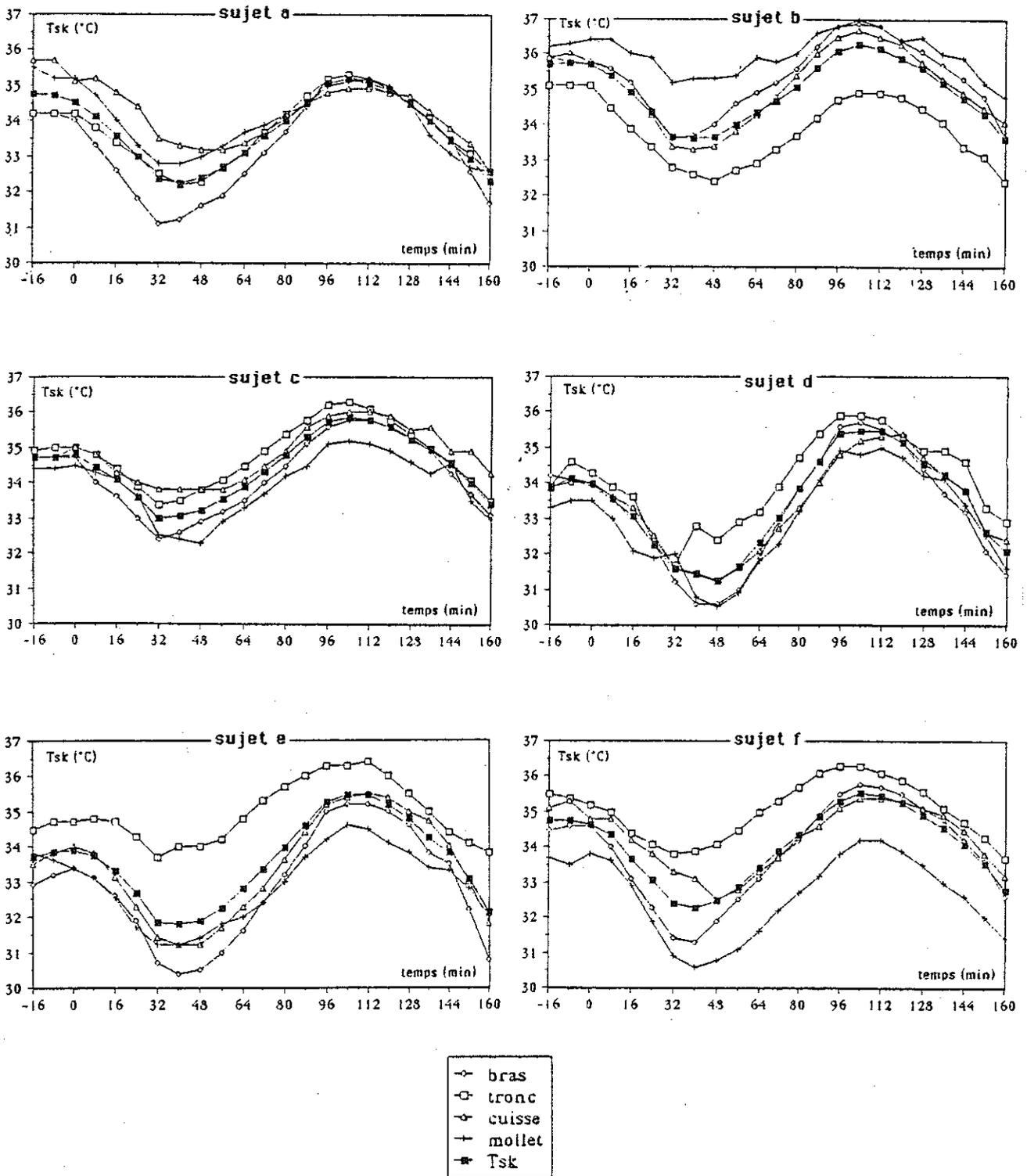


Figure A.II.1 - Températures cutanées moyennes et locales des sujets
(1-bras, 2-tronc, 3-cuisse, 4-mollet)

A.II.3

Les remarques que l'on peut faire apparaissent très nettement sur les courbes :

- Pour un même sujet, les hétérogénéités de température cutanée sont plus ou moins importantes. Pour le sujet f, l'écart de température ($\Delta T_{s,f}$) d'un point à l'autre du corps est de $1,4^{\circ}\text{C}$, alors qu'il n'est que de $0,5^{\circ}\text{C}$ pour le sujet c. Si on observe la moyenne des températures cutanées locales, cet écart n'est plus que de $0,37^{\circ}\text{C}$.

- Pour un même segment, les écarts ΔT_1 de température entre sujets peuvent atteindre 3°C pour les mollets et seulement $0,9^{\circ}\text{C}$ sur le tronc.

- D'autre part, les endroits les plus chauds du corps ne sont pas les mêmes pour tous les sujets ; les sujet a et b ont les mollets plus chauds que les autres parties, alors que pour les autres, c'est le tronc.

En régime dynamique, ces différences se retrouvent, d'autant plus que pour chaque individu chaque site corporel réagit différemment. On a reporté sur la Figure A.II.2. les amplitudes de variation de chaque température cutanée.

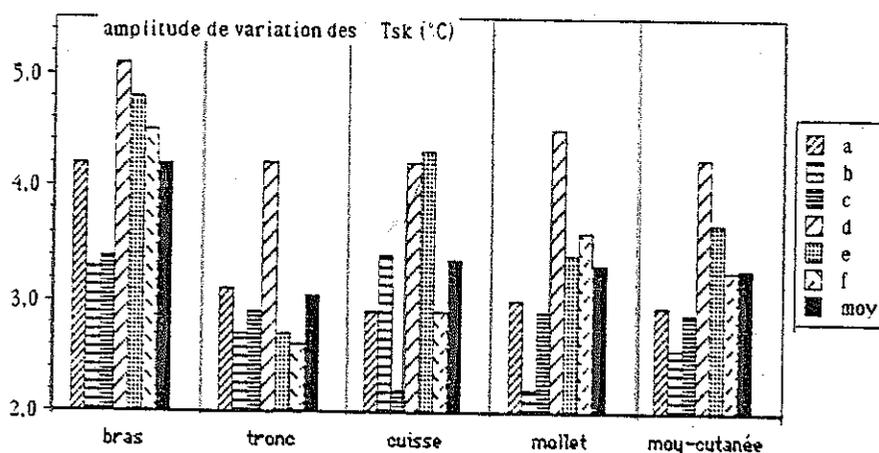


Figure A.II.2 - Amplitudes de variation des températures cutanées pour les 6 sujets

On constate que :

- pour un même segment, les amplitudes de variation peuvent différer de presque $1,5^{\circ}\text{C}$ entre les individus ; les bras ont tendance à varier plus que les autres endroits du corps ;

- pour un même sujet, il peut y avoir des différences non négligeables d'amplitude de variation d'un segment à l'autre ; le sujet d semble être beaucoup plus sensible aux changements de climat, ses températures cutanées varient beaucoup (4°C d'amplitude moyenne), alors que le sujet c est moins sensible ($2,5^{\circ}\text{C}$ d'amplitude moyenne).

A.II.4

Nous n'analyserons pas en détail la Figure A.II.4 qui donne les températures cutanées moyennes des 6 sujets dans les quatre expériences. La figure A.II.5 montre les résultats de VET-A pour les 6 sujets.

Les remarques faites ci-dessus sont applicables à tous les cas. La présence d'habits semble accroître les différences citées précédemment.

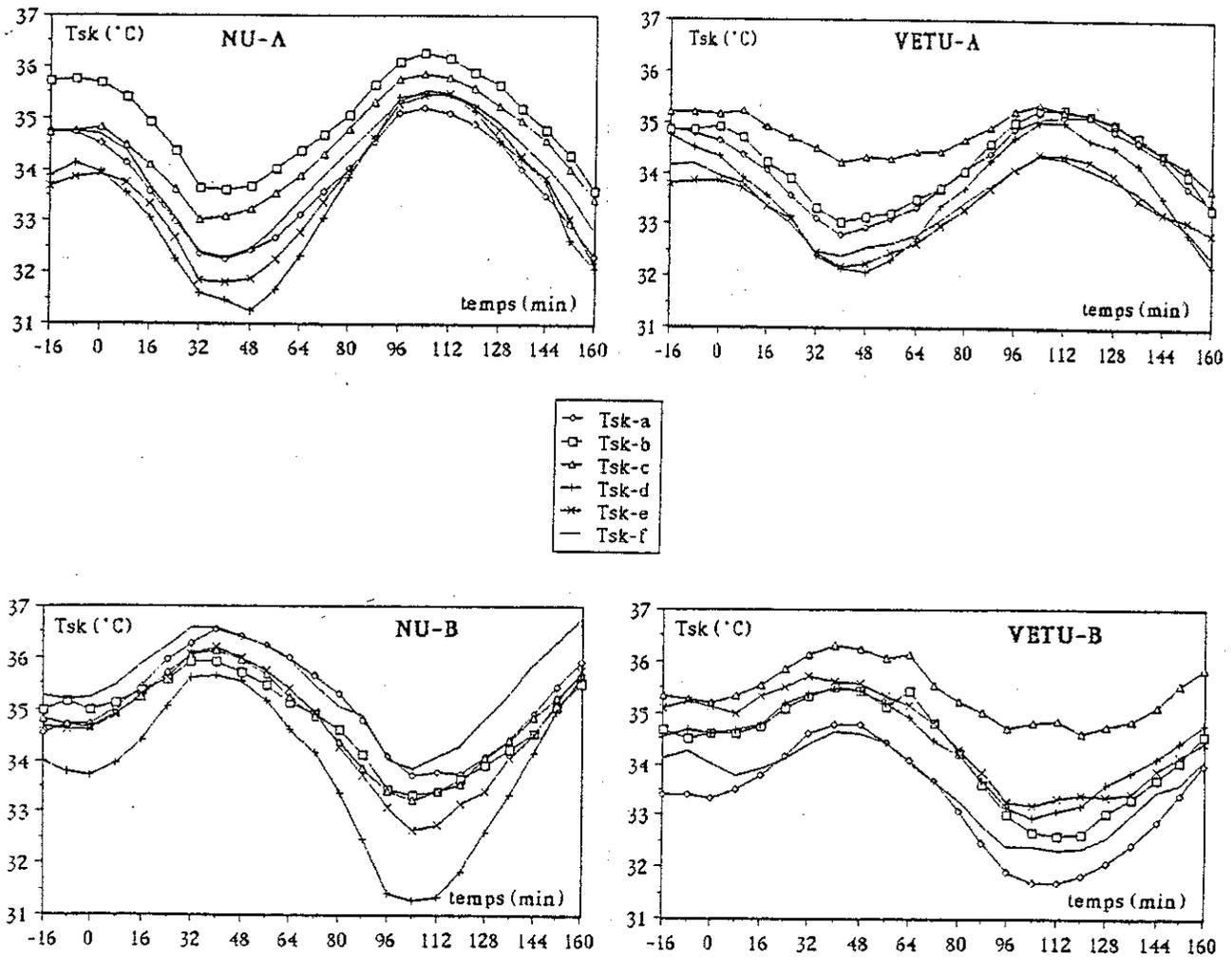


Figure A.II.4 - Températures cutanées moyennes des 6 sujets dans les quatre expériences.

A.II.5

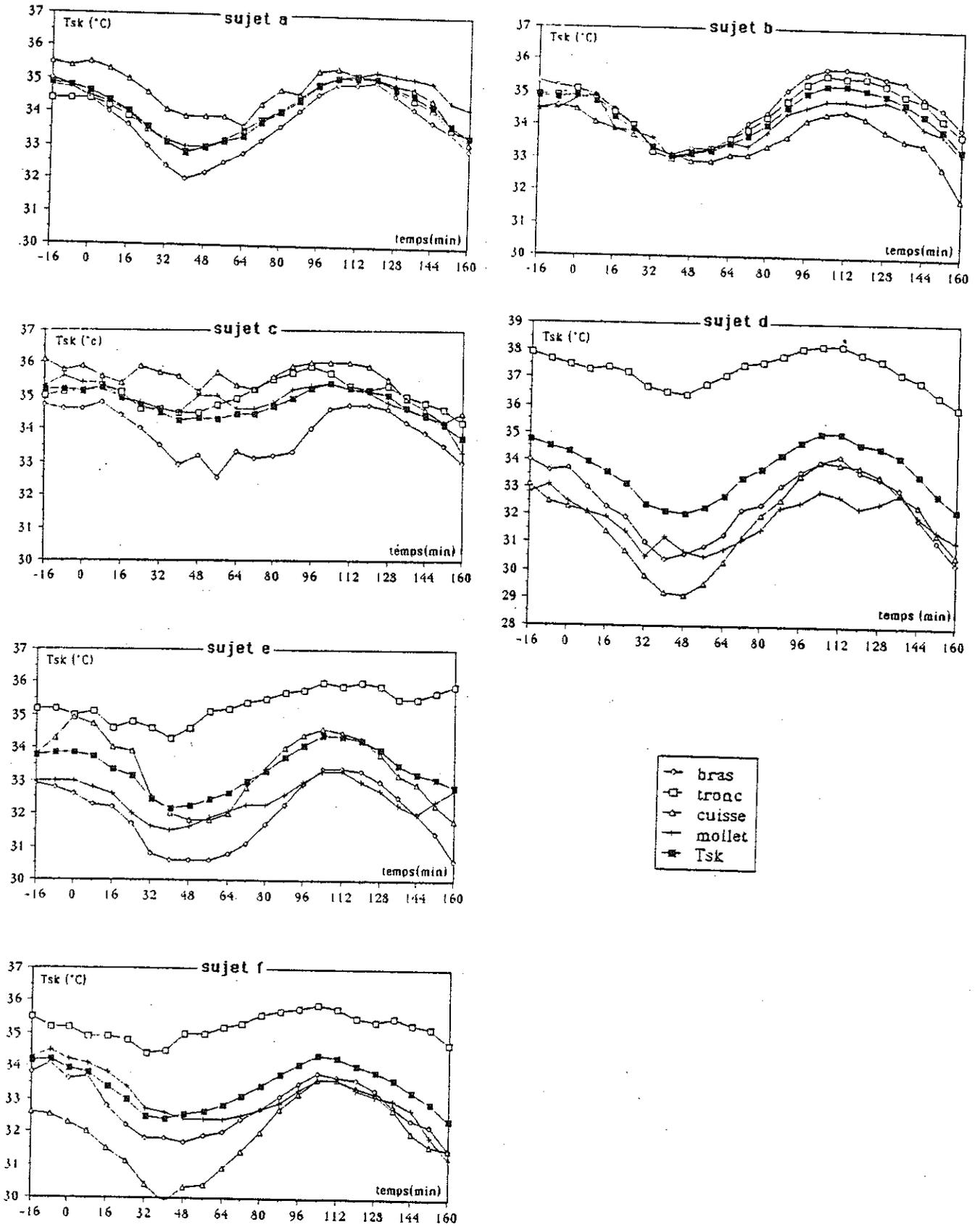


Figure A.II.5 - Températures cutanées locales et moyennes des 6 sujets habillés

ANNEXE III

RESULTATS EXPERIMENTAUX : LES CONDITIONS EXTREMES

Nous ne donnerons pas ici les résultats détaillés de toutes les expériences. Afin de comparer ceux-ci à notre modèle, nous avons dû faire des moyennes de températures locales pour chaque segment, car il y a 4 relevés de température sur le tronc et 2 pour les jambes.

Si on analyse les résultats de l'expérience Co⁺, la Figure A.III.1 donne les températures cutanées locales et la moyenne du segment à laquelle on pourra comparer le modèle : a) pour le tronc, b) pour les jambes. Sur les autres segments, il n'y a qu'un relevé de température.

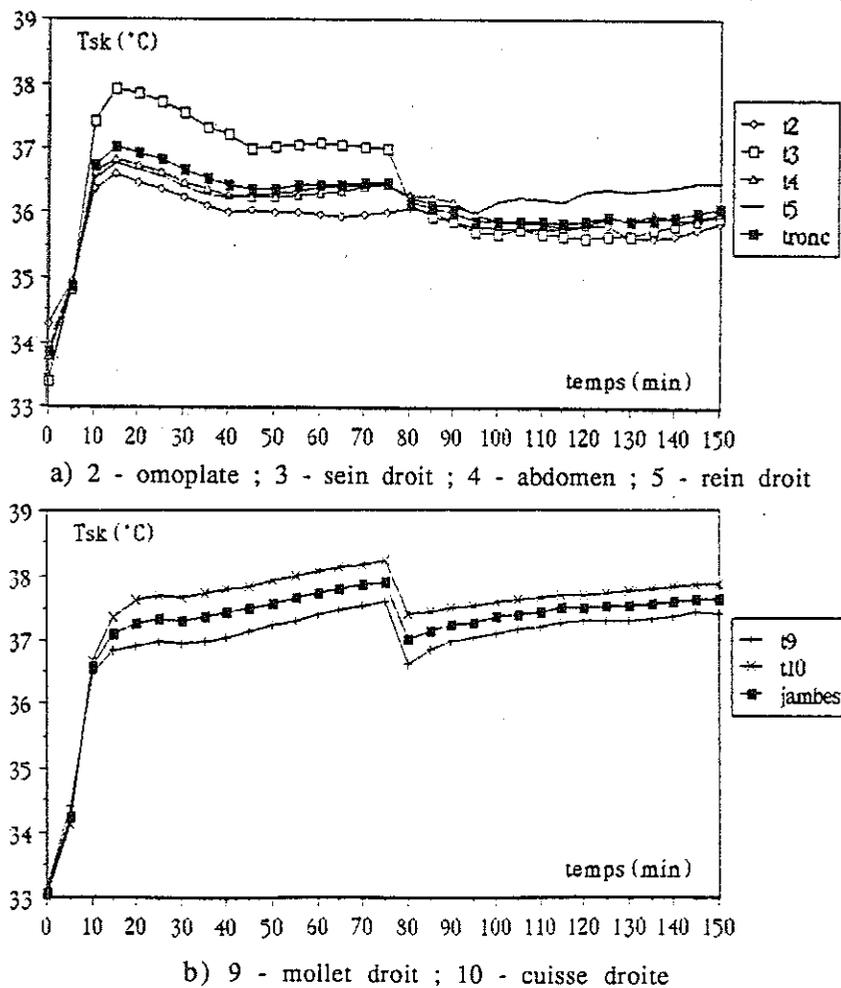


Figure A.III.1 - Températures cutanées locales et moyenne du segment

A.III.2

La Figure A.III.2 montre l'évolution des températures cutanées locales pour les 5 expériences ; on peut constater que les parties non couvertes réagissent différemment des parties couvertes surtout dans le cas Co⁺ et Co⁻,

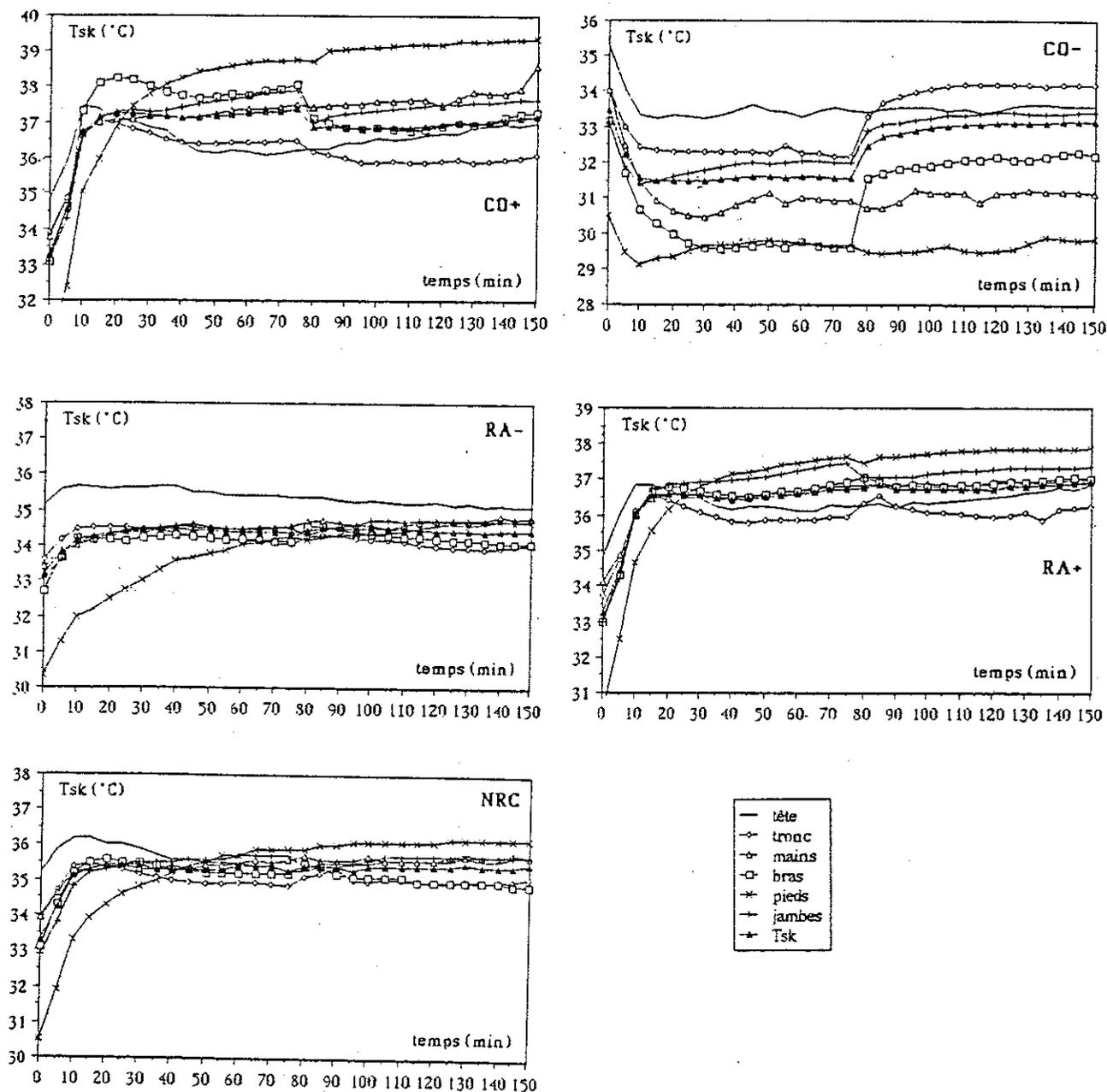


Figure A.III.2 - Températures cutanées locales au cours du temps pour les 5 expériences

A.III.3

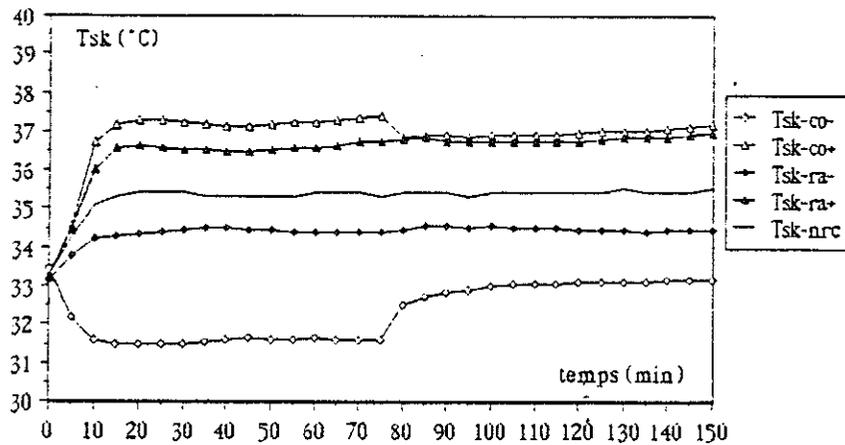


Figure A.III.3 - Températures cutanées moyennes au cours du temps.

Sur la Figure A.III.3 donnant l'évolution des températures cutanées moyennes dans les cinq cas, on peut remarquer que, pour NRC, Ra⁺ et Ra⁻, habits ne modifient pas T_{sk}. Dans ce cas, la température de l'air est proche de celle de la peau, l'effet de pompage est minime ; par contre, dans les cas Co⁺ et Co⁻, T_{sk} varie nettement et l'effet de pompage est maximal.

Les pertes de poids cumulées sont données sur la Figure A.III.4 ; il faut noter que les courbes des expériences Ra⁺ et Co⁺ sont très proches, bien que les températures cutanées moyennes n'évoluent pas de la même façon. La perte de poids correspond à l'évaporation, car aucun ruissellement n'a été observé.

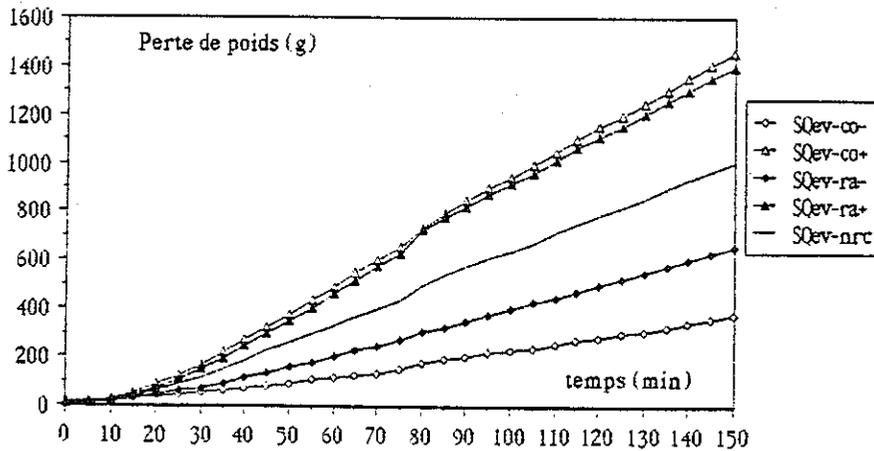


Figure A.III.4 - Pertes de poids cumulées au cours du temps

Les pertes de poids cumulées dans le temps ne nous intéressent pas directement ; de plus, l'échelle très dilatée masque les évolutions en régime transitoire. Nous avons donc calculé les quantités d'eau perdues par unité de temps (Figure A.III.5).

A.III.4

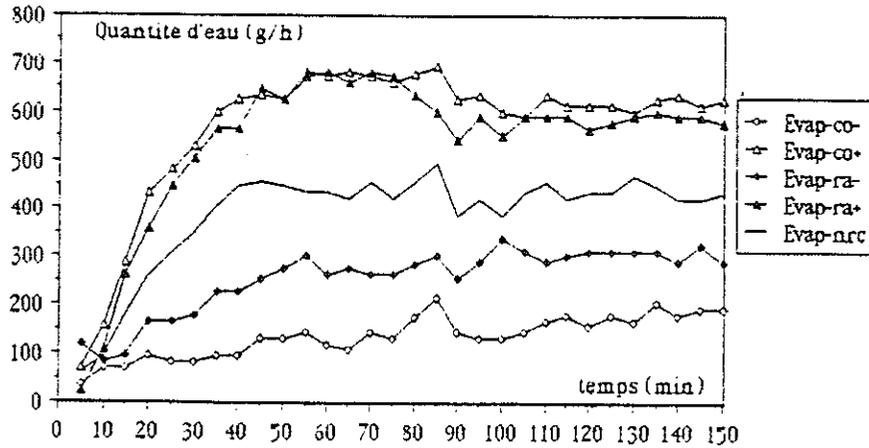


Figure A.III.5 - Quantités d'eau perdue horaires.

Les températures des habits (T_{cl}) ne nous ont pas été communiquées. Nous n'avons que les valeurs à la fin de la phase II. T_{cl} est calculée en prenant en compte les températures de surfaces locales des habits mesurées en 5 sites (cuisse droite, mollet droit, abdomen, bras droit et dos) et les températures de parties de peau non couvertes. T_{cl} représente ici la température moyenne de surface :

$$T_{cl} = 0,19 T_{cl}(\text{cuisse}) + 0,2 T_{cl}(\text{mollet}) + 0,175 T_{cl}(\text{abdomen}) + 0,14 T_{cl}(\text{bras}) + 0,175 T_{cl}(\text{dos}) + 0,05 T_{sk}(\text{main}) + 0,07 T_{sk}(\text{front})$$

Pour analyser les résultats, la température moyenne de rayonnement a été calculée de la façon suivante :

$$T_{mrt} = \frac{2 T_a + 4 T_{murs}}{6}$$

Le Tableau A.III.1 donne un récapitulatif des résultats ; avec leurs déviations standards.

Expérience	T_a	T_{mrt}	Phase I T_{sk}	Phase II	
				T_{sk}	T_{cl}
Co ⁺	47,12 (0,11)	36,93 (0,07)	37,26 (0,35)	37,05 (0,50)	40,51 (0,71)
Co ⁻	20,94 (0,47)	31,04 (0,63)	31,59 (0,52)	33,13 (0,51)	27,85 (0,44)
Ra ⁺	36,61 (0,02)	54,36 (0,16)	36,62 (0,26)	36,84 (0,24)	37,74 (0,54)
Ra ⁻	35,06 (0,04)	17,37 (0,08)	34,38 (0,43)	34,42 (0,46)	33,07 (0,26)

Tableau A.III.1 - Températures d'air (T_a), de rayonnement (T_{mrt}), cutanée moyenne (T_{sk}), des vêtements (T_{cl}) pour 4 expériences

A.III.5

Les coefficients d'échanges ont été déterminés par itérations successives, en fin de première période. Les résultats obtenus sont :

- coefficient d'échange convectif $h_c = (10,96 \pm 1,42) \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour Co^+ et Co^- ;
- coefficient d'échange radiatif $h_r = (5,97 \pm 0,79) \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour Ra^+ ,
 $h_r = (4,09 \pm 0,49) \text{ W/m}^2\text{°C}$ pour Ra^- .

Les calculs ont permis de déterminer l'isolation résultante des habits, I_{clr} , qui tient compte de tous les modes donc de l'effet de pompage, et I_{cle} , l'isolation effective des habits, qui fait l'hypothèse que les échanges de chaleur ont lieu uniquement à travers le tissu par conduction. Les résultats sont donnés sur la Figure A.III.6.

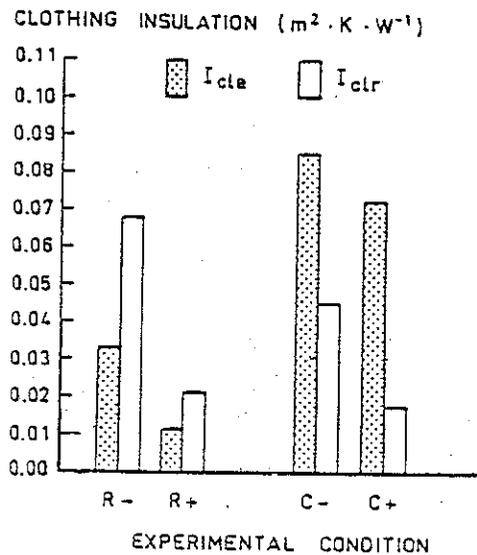


Figure A.III.6 - Isolation effective des vêtements (I_{cle}) et isolation résultante (I_{clr}) calculées pour les différentes conditions expérimentales.

Il faut rappeler que l'isolement intrinsèque des habits, I_{cl} , est supposé égal à :
 $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$

ANNEXE IV

Les types créés dans TRNSYS

Cet annexe donne les paramètres, les entrées et les sorties des trois modules de TRNSYS créés pour cette étude.

CALCUL DU P.M.V. TYPE 48

Calcul du P.M.V. (Predicted Mean Vote) et du P.P.D. (Predicted Percentage of Dissatisfied) selon la norme X35-203.

PARAMETERS

- 1 - I_{cl} Isolation thermique des habits (clo)

INPUTS

- 1 - M Métabolisme total (W/m^2)
 - 2 - W Travail externe (W/m^2)
 - 3 - I_{hab} 0 si le sujet est nu
 1 si le sujet est vêtu
 - 4 - T_a Température de l'air ($^{\circ}C$)
 - 5 - T_{mrt} Température moyenne de rayonnement ($^{\circ}C$)
 - 6 - V_a Vitesse d'air (m/s)
 - 7 - P_a Pression de vapeur dans l'air (Pa)

OUTPUTS

- 1 - P.M.V. Vote Moyen Prévisible
 - 2 - P.P.D. Pourcentage Prévisible D'insatisfaits
 - 3 - T_{cl} Température de surface des habits ($^{\circ}C$)
 - 4 - T_{sk} Température moyenne de la peau ($^{\circ}C$)
 - 5 - R_{ay} Flux rayonné (W/m^2)
 - 6 - C_{onv} Flux convecté (W/m^2)
 - 7 - R_{es} Flux perdu par respiration (W/m^2)
 - 8 - E_{vap} Flux perdu par évaporation (W/m^2)
 - 9 - S Charge thermique (W/m^2)
 - 10 - h_c Coefficient de convection ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)

M A R C L TYPE 49

Mathematical model of human thermoregulation. Physiological reactions of an average man are calculated. The body is divided into 6 segments, each with 4 layers, the central blood compartment links the segments together. Heat balances are calculated for the 25 compartments. The environment interacts with the skin layers.

Original model made by J.A.J. Stolwijk and J.D. Hardy (John. B. Pierce Foundation Yale University, U.S.) for the N.A.S.A. in 1970.

PARAMETERS

1	MODE	0 Stolwijk original program 1 or 2 modified model
2	W	External work (W)
3	i_L	Vapor permeability of the clothing
4 to 9	$R_{cl(i)}$	Clothing insulation for each part (clo)

INPUTS

1	M	Total metabolic rate required for exercise (W/m^2)
2	P_a	Water vapour pressure in environment (Pa)
3	I_{hab}	0 if the subject is undressed 1 if the subject is dressed

** MODE 0 **

4	T_{mrt}	Mean radiant temperature ($^{\circ}C$)
5	T_a	Dry air temperature ($^{\circ}C$)
6	V_a	Air velocity (m/s)

**MODE 1 or 2 **

4 to 9	<i>MODE 1</i>	$T_{mrt(i)}$ mean radiant temperature on each part of the body ($^{\circ}C$)
	<i>MODE 2</i>	$F_{ra(i)}$ Radiative net flux exchanged by each part of the body
10 to 15	$T_{a(i)}$	Air temperature on each part of the body ($^{\circ}C$)
16 to 21	$V_{a(i)}$	Air velocity on each part of the body (m/s)

A.IV.4

OUTPUTS

1	T_{sk}	mean skin temperature ($^{\circ}C$)
2	T_{clo}	mean clothing temperature ($^{\circ}C$)
3	ω_{to}	mean skin wetdeness
4 to 9	$T_{skl(i)}$	Skin temperature of the 6 segments ($^{\circ}C$)
10 to 15	$T_{cl(i)}$	Clothing temperature of the 6 segments ($^{\circ}C$)
16 to 21	$\omega(i)$	Skin wetdeness of the 6 segements ($^{\circ}C$)
22	$T(1)$	Head core temperature ($^{\circ}C$)
23	$T(5)$	Rectal temperature ($^{\circ}C$)
24	HP	Total Heat Production (KJ/h)
25	H_{flow}	Total heat loss (KJ/h)
26	C_{conv}	Heat exchange by convection (KJ/h)
27	R_{ay}	" " " radiation (KJ/h)
28	D_{ry}	Dry heat exchange (KJ/h)
29	F_{evap}	Heat losses by evaporation(KJ/h)
30	E_{vap}	Evaporation rate (g/h)
31	Q_{evap}	Total evaporation from the beginning (g)
32	S_{udt}	Sweat rate (g/h)
33	Q_{sud}	Total sweating from the beginning (g)
34	Drip	Dripping water (g/h)
35	Q_{drip}	Total dripping water from the beginning (g)
36	SWEAT	Total afferent sweat command
37	CHILL	" " shivering "
38	T_{ram}	Ramanathan mean skin temperature ($^{\circ}C$)
39	$T(25)$	Blood Temperature ($^{\circ}C$)

A.IV.5

DECOMPOSITION DES VITESSES ET DES TEMPERATURES TYPE 50

Modèle simplifié de stratification et de calcul de la vitesse relative de l'air pour les échanges convectifs sur MARCL. La température de l'air est considérée comme une fonction linéaire de la hauteur.

PARAMETERS

- 1 - mode 0 pas de sujet dans la pièce
1 données pour un homme debout
- 2 - HP Hauteur sous plafond (m)
- 3 - $\Delta T/\Delta H$ Gradient de température ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
- * mode 0 *
- 4 - NH Nombre de hauteurs pour laquelle on veut calculer la température d'air (en mode 1 : $\text{NH} = 6$)
- 5 à $\text{NH}+4$ - $H(i)$ Hauteurs considérées (m)

INPUTS

- 1 - T_a Température d'air au centre du local ($^{\circ}\text{C}$)
- 2 - V_a Vitesse d'air au centre du local (m/s)
- 3 - T_{ph} Température de surface du plancher ($^{\circ}\text{C}$)

* mode 1 *

- 4 - Act activité du sujet
 - 1 debout
 - 2 assis
 - 3 marche sur tapis roulant à 0,9 m/s
 - 4 1,34 m/s
 - 5 1,90 m/s
 - 6 marche libre à 0,9 m/s
 - 7 1,34 m/s
 - 8 1,90 m/s
 - 9 ergo-cycle 0 tr/min
 - 10 50 tr/min
 - 11 60 tr/min
 - M Métabolisme si l'activité n'est pas répertoriée (W/m^2)

OUTPUTS

- 1 à NH - $T(H_i)$ Température d'air à la hauteur $H(i)$ ($^{\circ}\text{C}$)
- $\text{N}+1$ à $2*\text{NH}$ - $V(H_i)$ Vitesse d'air à la hauteur $H(i)$ (m/s)