THÈSE

présentée devant l'Université Paul Sabatier – Toulouse III
en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
Spécialité : Énergétique

par

***Mala* ENDRAVADAN**

Régulation des systèmes de chauffage et de climatisation basée sur la sensation thermique humaine. Impact sur la consommation d'énergie dans les bâtiments.

Soutenue le 1 Février 2006, devant la commission d'examen :

M.	Denis	CLODIC	Rapporteur
M.	Gérard	GUARACCINO	Rapporteur
M.	Divo Augusto	ALEGRIA QUINTELA	Examinateur
M.	Alain	CHATELET	Examinateur
Mme	Françoise	MONCHOUX	Examinateur
Mme	Françoise	THELLIER	Directeur de Thèse

Laboratoire P.H.A.S.E. (Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement)
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE CEDEX 9

RESUME

Ce travail est centré sur la démarche adaptative. En effet, Le confort thermique d'un individu dépend des conditions thermiques environnementales, contrôlables et mesurables, mais également de son activité et de sa tenue vestimentaire, qui sont des paramètres difficiles à évaluer dans la réalité quotidienne. Les comportements que les sujets adoptent pour faire face à un éventuel inconfort peuvent être variés et ils ont des conséquences diverses, parfois bénéfiques mais souvent désastreuses sur les installations ou sur la facture énergétique. Nous nous sommes intéressé à l'influence réciproque entre le comportement humain et la thermique du bâtiment. La création de modèles numériques de régulation comportementale prenant en compte l'adaptabilité de l'être humain permet de mettre en évidence ce couplage, en d'évaluant les effets de cette régulation sur le confort de l'individu et la consommation d'énergie. La simulation de l'ensemble ; bâtiment, être humain et modèles de régulation comportementale est réalisée dans l'environnement du logiciel TRNSYS.

Un premier modèle de 'régulateur comportemental global' (GBR) a été développé : les ajustements de tenue vestimentaire et de température de consigne ont été assujettis à la sensation thermique éprouvée par l'occupant, que l'on a déterminée par le 'Predicted Mean Vote' (PMV). La consommation énergétique du bâtiment et le confort induits par le régulateur GBR sont comparés à ceux obtenus avec d'autres types de régulateurs existants, en considérant les saisons hivernale et estivale, ainsi que le cas de bâtiments à faible ou forte inertie thermique.

Le deuxième modèle est basé sur une évaluation plus fine de la sensation thermique. Dans les régions où le climat est tempéré, ou en demi-saison, le chauffage des bâtiments n'est pas toujours indispensable. Il faut malgré tout de même assurer des conditions de confort thermique correctes aux usagers. Dans une démarche d'économie d'énergie, un système de chauffage local individuel (LHS), peut être proposé. Cela semble alors particulièrement intéressant, à condition de prévoir, comme dans le cas global, le comportement des utilisateurs face à ce nouveau système et ses effets sur la consommation d'énergie. Le LHS étant composé de panneaux rayonnants, les flux radiatifs locaux échangés par l'individu ont dus être quantifiés avec précision. Ils ont été validés par des expériences avec un mannequin thermique. Enfin, des expériences réalisées avec des personnes réelles ont permis de comprendre comment les gens réagissent sur le système de chauffage mis à leur disposition, en fonction de leurs sensations thermiques locales. Les analyses de ces expériences ont permis de développer un modèle de régulateur comportemental local (LBR) basé sur les sensations thermiques locales. Les résultats montrent que, grâce à ce système, dans certaines situations on peut rétablir le "confort" avec des coûts énergétiques réduits.

Mots clés : démarche adaptative, modélisation, sensation thermique, comportement humain, régulation comportementale, habitat, énergie, rayonnement infrarouge.

ABSTRACT

This study is based on the adaptive approach. The thermal comfort of an individual depends on indoor conditions that can be controlled. However, changes in activity or clothing adjustments are difficult to control and measure in the field experiments. Behavioural actions undertaken by the occupant to overcome the discomfort could be varying and may have diverse consequences. Sometimes these actions are beneficial to the occupant, although often they lead to disastrous amounts of energy consumption. Hence, it becomes crucial to consider the human behaviour and the thermal inertia of the building. The creation of numerical models is useful to study the coupling between these two components and to evaluate the effects of the behaviour on comfort and the energy. The simulations were conducted using TRNSYS software.

A model such as 'Global Behavioural Regulator' (GBR) was created to evaluate the effects of clothing or thermostat adjustments made by the occupant depending on his thermal sensation (PMV). The energy costs of several types of regulators have been compared in various seasons for example, winter and summer using a light and heavy weight building.

The heating of a whole-building may not be necessary in temperate climates or during mid-season. However, comfortable working conditions could be assured for the occupants with the use of an individual heating system such as a 'Local Heating System' (LHS). In such a context, it becomes interesting to evaluate the occupant's behaviour in regards to local heating and its effects on comfort and energy consumption. The LHS consists of three radiant panels; therefore, it is important to evaluate the local heat exchanges with precision. Experiments conducted with the manikin were used to validate the infra-red model; whereas experiments with real subjects were studied to understand the occupant behaviour on the LHS as a function of their local thermal sensations. These analyses led to the creation of a 'Local Behavioural Regulator' (LBR). The results show that such a system is advantageous in certain situations and does lead to comfort conditions with reduced energy costs.

Key words : human behaviour, thermal sensation, adaptive approach, comfort, thermal manikin, building, infra-red radiation, behavioural regulator, modelling (TRNSYS), energy consumption.

Quand tu prendras le chemin d'Ithaque,
Souhaite que la route soit longue,
Pleine d'aventures, riche d'enseignements.
Ne crains pas les Lestrygons et les Cyclopes, ni la colère de Poséidon,
Jamais tu ne les trouveras sur ton chemin,
Si ta pensée reste élevée, si l'émotion
Habite ton corps et ton esprit.
Les Lestrygons et les Cyclopes,
Tu ne les rencontreras pas, ni la fureur de Poséidon,
Si tu ne les transportes pas dans ton âme,
Si ton âme ne les fait pas surgir devant toi.

Je te souhaite que la route soit longue,
Que nombreux soient les matins d'été,
Que le plaisir de découvrir des ports inconnus
T'apporte une joie nouvelle;
Va visiter les comptoirs phéniciens
Où tu trouveras des marchandises délicieuses.
Visite les villes égyptiennes,
Et instruis-toi auprès de ceux qui ont tant de choses à t'enseigner.
Garde toujours Ithaque présente à ton esprit.
Y parvenir est ta destination finale.
Mais ne te hâte pas ;
Mieux vaut prolonger ton voyage pendant des années
Et n'aborder dans l'île que
Riche de ce que tu auras appris en chemin.
N'attends pas d'Ithaque d'autres bienfaits.
Ithaque t'a offert un beau voyage.
Sans elle, tu n'aurais jamais pris la route.
Elle t'a tout donné, elle n'a rien de plus à t'apporter.
Et même si, à la fin, tu trouves qu'elle est pauvre,
Ithaque ne t'a pas trompé.
Car tu es devenu un sage, tu as vécu intensément,
Et c'est cela que signifie Ithaque.

Constantin Cavafis (1863-1933).

REMERCIEMENTS

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

Madame F. Monchoux, pour m'avoir accueilli à Toulouse et au sein de l'équipe du laboratoire PHASE (ex. LESETH), pour m'avoir soutenu lors de ce travail et pour avoir présidé le jury.

Madame F. Thellier, qui a accepté de diriger cette thèse et de faire partie de ce jury, pour son soutien au niveau de l'administrative et avec la thèse, et son aide à la rédaction de ce manuscrit.

Monsieur D. Quintela de DEM-ADAI pour m'avoir accueilli chaleureusement à Coimbra, pour m'avoir donné l'occasion d'effectuer les travaux expérimentaux et pour sa participation au jury. Mes remerciements à Adélio Gaspar pour m'avoir transmis les bases de données subjectives et son savoir faire expérimental et avoir répondu à mes nombreuses questions; à Virgilio pour son aide pour la partie expérimentale.

Monsieur R. Figueiredo, de DEM-ADAI pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire.

Monsieur D. Clodic, de l'Ecole des Mines de Paris pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire et membre du jury.

Monsieur G. Guarracino, de L.A.S.H - ENTPE pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire et membre du jury.

Monsieur A. Chatelet de GRECO – EAT pour sa présence au sein du jury.

Monsieur F. Nicol pour m'avoir transmis les bases de données du projet SCATs et pour avoir répondu à mes nombreuses questions.

Monsieur V. Gibiat, le directeur de laboratoire PHASE, pour ses conseils, son soutien et son aide au niveau de l'administration pendant ma thèse.

Je remercie également Isabelle Chibrac pour son aide au quotidien, ses conseils, son amitié, et son aide à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie les deux Pierre du laboratoire PHASE pour leur aide quotidien et leur support informatique et technique.

Et bien sûr tous les membres et mes camarades du laboratoire PHASE et laboratoire Energétique pour leur soutien permanent, leur amitié, leur disponibilité et leurs conseils dans les moments difficiles.

Mes remerciements sincères à Madame Comparin, responsable des Relations Internationales au CROUS de Toulouse, pour son soutien moral, sa gentillesse, sa bonne humeur et son amitié. Je remercie également tout le personnel du CROUS (Toulouse) et du CNOUS (Paris) pour m'avoir permis de passer un séjour agréable en France.

Un grand merci à *l'Ambassade de France* à Fidji pour m'avoir accordé une bourse. Cela m'a permis de réaliser cette thèse et m'a donné la chance de poursuivre mes études en France avec succès.

Table des matières

Nomenclature

Introduction ---------- 1

Chapitre 1 - Confort thermique et régulation dans les bâtiments

1.1 Introduction ---------- 5

1.2 Echanges thermiques entre le corps et l'environnement
1.2.1 Production de la chaleur ---------- 5
1.2.2 Echanges par respiration et échanges à la surface cutanée ---------- 6
1.2.3 Transferts à travers les vêtements ---------- 10
1.2.4 Thermorégulation ---------- 10
1.2.5 Bilan Thermique ---------- 12
1.2.6 Sensation Thermique ---------- 13

1.3 Evaluation des ambiances thermiques
1.3.1 Les indices ---------- 14
1.3.2 Les modèles de thermo-physiologie ---------- 15
1.3.3 Les modèles de jugement thermo-sensoriel ---------- 17
1.3.4 Le mannequin thermique ---------- 21

1.4 Le confort adaptatif
1.4.1 Définition ---------- 22
1.4.2 Les études sur le terrain ---------- 26

1.5 Régulation des bâtiments
1.5.1 Types des régulateurs ---------- 29

1.6 Systèmes de HVAC locaux
1.6.1 Systèmes de ventilation personnalisée (PV) à air froid/chaud ---------- 31
1.6.2 Systèmes de chauffages radiatifs locaux (LHS) ---------- 33

1.7 Conclusion ---------- 36

Chapitre 2 - Modélisation d'un 'régulateur comportemental global'

2.1 Introduction ---------- 37

2.2 Régulateur Comportemental
2.2.1 Présentation ---------- 37
2.2.2 Principe de fonctionnement du modèle ---------- 38
2.2.3 Intégration dans le système de simulation ---------- 41
2.2.4 Conditions de simulations générales ---------- 43

2.3 Résultats : Eté
2.3.1 Bâtiments Naturellement Ventilé (NV) ---------- 45
2.3.2 Bâtiments Climatisés ---------- 49
2.3.3 Eté caniculaire ---------- 52
2.3.4 Comparaison entre les bâtiments naturellement ventilés et climatisés ---------- 54
2.3.5 Analyse des résultats ---------- 54
2.3.6 Conclusions ---------- 56

2.4 Résultats : Hiver
2.4.1 Bâtiments régulés globalement ---------- 57
2.4.2 Discussion et conclusion ---------- 61

2.5 Améliorations apportées au GBR
2.5.1 Modification des limites vestimentaires ---------- 62
2.5.2 Changement de remise d'habillement chaque matin ---------- 63
2.5.3 Prise en compte d'un fonctionnement aléatoire ---------- 64

2.6 Conclusion ---------- 65

Chapitre 3 - Etudes expérimentales

3.A Expériences dans une *chambre climatique* avec un *mannequin thermique* ---------- 68

3.A.1 Matériel et Méthode
3.A.1.1 La chambre climatique ---------- 68
3.A.1.2 Le bureau équipé du LHS ---------- 68
3.A.1.3 Mannequin thermique 'MARIA' ---------- 69
3.A.1.4 Les Mesures ---------- 71
3.A.1.5 Méthodologie ---------- 72

3.A.2 Présentation des Résultats Expérimentaux
3.A.2.1 Mannequin nu sans table et avec table ---------- 74
3.A.2.2 Mannequin avec un panneau à plusieurs puissances ---------- 75
3.A.2.3 Autres configurations ---------- 77
3.A.2.4 Conclusion ---------- 78

3.B Expérimentations dans un *bureau* avec des *sujets* ---------- 79

3.B.1 Matériel et Méthode
3.B.1.1 Mesures et description générale du local ---------- 80
3.B.1.2 Description des sujets et mesures physiologiques ---------- 80
3.B.1.3 Evaluation de la sensation thermique ---------- 81

3.B.2 Analyse générale pour les '18 sujets'
3.B.2.1 Evolution des températures ---------- 82
3.B.2.2 Evolution des sensations globales ---------- 83
3.B.2.3 Conclusion ---------- 85

3.B.3 Analyse des sensations thermiques et les comportements
3.B.3.1 Analyse d'un cas 'simple' ---------- 85
3.B.3.2 Analyse d'un cas 'complexe' ---------- 89
3.B.3.3 Analyse fine pour les 18 sujets ---------- 92
3.B.3.4 Relation sensation - température et sensation – comportement ---------- 95
3.B.3.5 Conclusion ---------- 99

Chapitre 4 - Modélisation des flux radiatifs

4.1 Introduction ---------- 101

4.2 Modélisation des échanges infra rouges (IR) locaux
4.2.1 Description du modèle ---------- 101
4.2.2 La méthode d'analyse---------- 104
4.2.3 Etude Préliminaire ---------- 107

4.3 Cas du mannequin thermique dans une chambre climatique
4.3.1 Géométrie et conditions de simulation ---------- 117
4.3.2 Analyse de flux radiatifs ---------- 118
4.3.3 Comparaison des résultats: Expériences - Simulations ---------- 121
4.3.4 Etude de sensibilités ---------- 123

4.4 Cas des sujets dans un bureau
4.4.1 Conditions de simulation---------- 126
4.4.2 Prédiction des températures cutanées---------- 127
4.4.3 Prédiction des sensations---------- 128
4.4.4 Evolution des flux---------- 129
4.4.5 Relation flux- sensation et flux - comportement---------- 131

4.5 Discussion et conclusion ---------- 132

Chapitre 5 - Le 'régulateur comportemental local' (LBR)

5.1 Introduction ---------- 135

5.2 Construction d'un modèle de régulateur local
5.2.1 Modification du calcul des sensations ---------- 135
5.2.2 Fonctionnement---------- 136
5.2.3 Présentation du module LBR ---------- 138
5.2.4 Intégration en TRNSYS ---------- 139

5.3 Résultats de simulation
5.3.1 Conditions 1 : Environnementale Réelle---------- 141
5.3.2 Conditions 2 : Ambiance uniforme ---------- 145
5.3.3 Conditions 3 : Bâtiment en mi-saison ---------- 149

5.4 Conclusion ---------- 151

Conclusions et perspectives ----------153
Bibliographie ----------155
Annexe
Annexe 1A : PMV et PPD ---------- A-1
Annexe 1B : MARCOT – Modèle de comportement thermique de l'homme ---------- A-2
Annexe 1C : TRIM – Modèle de Sensations Thermiques Locales ---------- A-7
Annexe 3A : Comportements sur les panneaux ---------- A-9
Annexe 3B : Températures cutanées locales pour les expériences dans le bureau ---------A-11
Annexe 3C : Températures cutanées et sensations pour les hommes ----------A-12
Annexe 4A : Ecarts des densités de flux pour les hommes----------A-21
Annexe 4B : Récapitulatif de l'analyse des expériences ----------A-22
Annexe 5A : Description du module LHS. ----------A-24

NOMENCLATURE

Lettres alphabétiques

A	surface totale	(m²)
B_{ij}	facteur de Gebhart	
C	Transfert de chaleur par convection	(W ou W m^{-2})
CP	signal de fonctionnement du refroidissement	
c	demi-vie	
E_{vap}	perte de chaleur par évaporation	(W ou W m^{-2})
F_{ij}	facteur de forme/vue	
f_{cl}	facteur d'habillement	
f_{eff}	facteur effectif de rayonnement	
h	coefficient d'échange	(W m^{-2} K^{-1})
HP	énergie de chauffage pour le bâtiment	(kWh ou MJ)
Icl	Isolation vestimentaire	(clo)
K	échange de chaleur par conduction	(W ou W m^{-2})
M	production de la chaleur interne (métabolisme total)	(W m^{-2} ou met)
n	nombre des photons	
P	pression	(Pa)
P_{ij}	facteur d'influence radiatif entre i et j	(%)
Q_m	total flux perdu (par le mannequin)	(W ou W m^{-2})
R	échange radiatif	(W ou W m^{-2})
R_{esp}	perte respiratoire	(W ou W m^{-2})
r	coefficient de corrélation (r^2 coefficient de détermination)	
RH	humidité relative	(%)
S	l'aire totale d'échange ou flux sensible	(m²) ou (W ou W m^{-2})
T	température	(°C ou K)
T_{mrt}	température moyenne de rayonnement	(°C)
T_{rm}	température de moyenne mobile	(°C)
TS (ou S)	sensation thermique (échelle -3 à +3)	
v	vitesse d'air	(m s^{-1})
w	mouillure cutanée	
W	travail externe	(W ou W m^{-2})

Indices

a	air, atmosphérique	E	enceinte ou environnement
act	activité	g	global
b	basal ou body	H	homme
bg	globe noir	hy	hypothalamus
br	bras	int	interieur
B	body (corps)	ja	jambes
Back	dessous de la table	ma	mains
c	convection, confort	max	maximum/maximale
cl	vêtements	min	minimum/minimale
DU	Dubois	moy (ou m)	moyenne
e	évaporation ou expérimental	n	jour
ext	extérieur	n-1	jour précèdent

od	outdoor temperature	te	tête
op	opérative	tr	tronc
p	panneau	top	dessus de la table
pi	pieds	tot	total
r	rayonnement	vap	vapeur
reg	régulation		
res	perte de chaleur lié à la respiration		
s	surface		
sk	peau ('skin')		
surf	surface des murs		

1 clo = 0.155 m^2 °C/W

1 met = 58 W m^{-2}

Lettres grecques

ε	émissivité	
Φ	flux total	(W)
φ	densité de flux	(W m^{-2})
θ	angle	
σ	constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.667 \times 10^{-8}$	(W m^{-2} K^{-4})
α	facteur de pondération ou poids	
ε_{sw}	facteur de mouillure	
ε_{vc}	facteur de vasoconstriction	
δ	l'écart ou variation	
Δ	différence entre deux valeurs	
τ	transmissivité	
ρ	réflectivité	

Abréviations

ACA	Adaptative Control Algorithm	
ACH	Air Change per Hour (m^3/h)	(Taux de renouvellement d'air)
ANN	Intelligence Artificielle Neuronale	
CP	Chauffe-Pieds	
DTS	Dynamic Thermal Sensation	
EWMA	Exponential Weighted Moving Average	
GBR	Global Behavioural Regulator	
HP	Panneau Horizontal	
HWB	Heavy Weight Building	(Bâtiment Lourd)
LBR	Local Behavioural Regulator	
LHS	Local Heating System	(Système du Chauffage Local)
LWB	Light Weight Building	(Bâtiment Léger)
MNU	Mannequin NU	
MNUT	Mannequin NU avec Table	
NV	Naturellement Ventilé	
RTA	Radiant Temperature Asymmetry	
PPD	Percentage of Person Dissatisfied	
PMV	Predicted Mean Vote	
SCATs	Smarts Controls and Thermal Comfort	
VP	Panneau Vertical	

INTRODUCTION

Cette étude s'inscrit dans une démarche de '*Qualité Environnementale des Bâtiments*' (QEB) en cours de développement en France dont le but et de créer des bâtiments respectueux de l'environnement et procurant un confort optimal à ses usagers.

Au cours des siècles, l'homme a fait évoluer son habitat en fonction de ses besoins et des techniques disponibles. Le maintien des conditions de confort à l'intérieur des bâtiments entraîne une consommation énergétique. L'augmentation de la demande de confort en toutes circonstances entraîne une exigence supplémentaire.

Depuis les premiers krachs pétroliers, la France a assisté à une évolution significative de la qualité de construction des bâtiments intégrant leurs performances énergétiques [Rutman, 2003]. Malgré ces efforts, l'énergie utilisée pour le chauffage, la ventilation et la climatisation de l'environnement intérieur est le plus grand secteur de consommation d'énergie. Par exemple, dans le secteur résidentiel le chauffage représente de 75 % l'énergie totale consommée.

Dans le secteur tertiaire (bureaux, commerce, santé, enseignement, …), les perspectives à long terme montrent une croissance de la demande d'énergie beaucoup plus rapide que dans le secteur résidentiel. La demande dans le tertiaire pourrait ainsi, augmenter en 2020 de 50 % par rapport à 1990. Enfin, en France, le chauffage restera néanmoins le plus consommateur du secteur [Fontaine, 2003].

On estime généralement que les personnes dans les pays économiquement développés passent plus de 80 % de leur temps à l'intérieur. Ceci suggère que la qualité de l'environnement intérieur puisse avoir un impact significatif sur le confort, la santé, et le sens global du bien-être. Dans un effort pour maintenir la qualité de l'environnement intérieur, les bâtiments sont conditionnés pour fournir un environnement constant, uniforme et confortable [De Dear et al., 1997b].

Le confort thermique d'un individu dépend, bien évidement, des conditions thermiques environnementales que l'on peut contrôler, mais également, de son activité et de sa tenue vestimentaire, qui sont des paramètres plus difficiles à évaluer sur le terrain. De plus, ces deux derniers paramètres donnent à l'homme la possibilité de s'adapter, quelquefois partiellement seulement, aux conditions thermiques s'il les juge non satisfaisantes.

La réaction d'un occupant au climat interne dépend fortement de son propre système de thermorégulation et des possibilités disponibles dans son environnent proche. La *Figure I.1* donne la hiérarchie des modes de régulation que l'individu peut utiliser : régulations physiologique ou autonome, comportementale et technologique. Ces termes seront détaillés dans le *Chapitre 1*. Cette hiérarchie va d'une adaptation involontaire à des actions qui touchent une environnement de plus en plus éloigné, faisant appel à une technique de plus en plus lourde. Cette hiérarchie met en jeu également une consommation d'énergie onéreuse croissante.

Un modèle statique du confort permet d'expliquer partiellement l'adaptation en analysant les variables affectées par les ajustements personnels (agir sur le tenue vestimentaire) ou les interventions environnementales (température de l'air intérieur), mais il élimine explicitement toutes les notions d'adaptation physiologique et psychologique. C'est pourquoi nous nous sommes intéressé à '*l'approche adaptative*' qui donne aux occupants une opportunité de réagir sur eux-mêmes et sur leur climat proche.

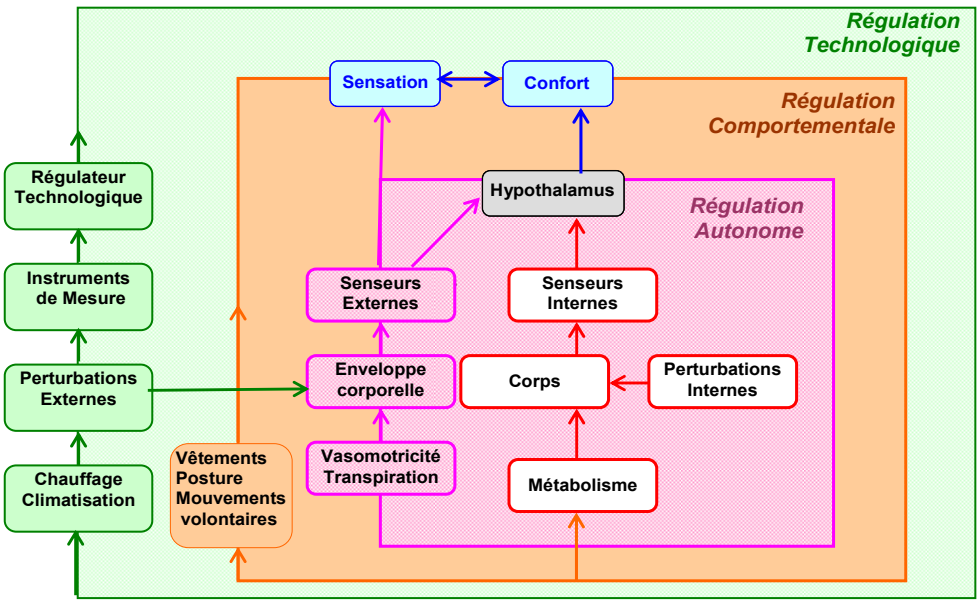


Figure I.1 : Les trois types de régulation possible pour atteindre le confort [redessiné d'après Hensel, 1981]

Dans cette thèse on s'intéressé à étudier le *lien entre le comportement humain et le comportement thermique d'un bâtiment* par modélisation (*Figure I.2*). Chez l'homme on connais les relations : thermo-physiologique → sensations → confort thermique. Tous ces aspects sont modifiés par les vêtements qu'il porte.

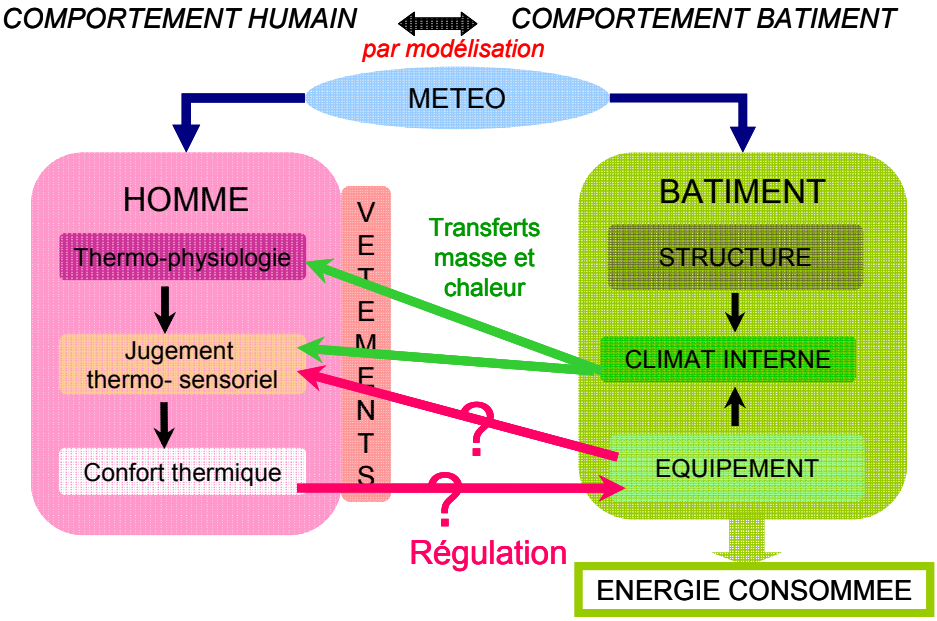


Figure I.2 : Relations entre le comportement de l'homme et le comportement thermique d'un bâtiment

Pour le bâtiment on connait la relation entre la structure et le maintien du climat interne. On maîtrise également l'influence des équipements sur le climat interne. Autres influences extérieures comme les conditions météorologiques sont bien représentées au niveau du bâtiment, mais moins connues au niveau de l'homme. Par contre l'influence du climat interne sur homme est bien prise en compte grâce aux modèles thermo-physiologiques.

Le nœud du problématique est qu'on ne connait pas, ni comment l'homme va régulés les équipements mis à sa disposition, et comment la modification du climat interne changera son jugement sensoriel et ainsi son comportement. Enfin quelles sont les mises en jeu énergétiques dues à ces changements ? Nous avons décidé de chercher des réponses à ces questions sur deux niveaux – global et local.

Au niveau global, l'objectif est de construire un modèle du comportement global qui *prenne en compte des comportements simples*, afin de les intégrer dans un système de simulation du bâtiment. Par exemple, en ajoutant la possibilité à l'homme de réagir sur ses vêtements, on pourra étudier le rôle du changement vestimentaire sur la consommation énergétique.

Dans les climats chauds ou froids, une régulation thermique globale du bâtiment donnera lieu à une évaluation du confort thermique global de l'habitant, et les enjeux porteront sur les valeurs de consigne des systèmes de chauffage ou de climatisation. Par contre, dans les régions où le climat est tempéré ou si on regarde la demi-saison ou hiver, le chauffage de la totalité des bâtiments n'est pas toujours indispensable. Mais, malgré tout il faut assurer des conditions thermiques optimales aux usagers. Donc, l'étude d'un *système de chauffage individuel* (*LHS – Local Heating System*) semble particulièrement intéressante dans une démarche d'économie d'énergie, mais il est impératif qu'il soit dimensionné sur des critères de confort thermique local et réglable par l'utilisateur.

Au niveau local, l'objectif est de créer un modèle du comportemental local vis-à-vis d'un LHS. Peu de choses sont connues et avant de créer un tel modèle – il faut des informations plus détaillées. Par exemple, pour mieux cerner les effets d'un chauffage local on s'intéresse aux échanges radiatifs. Le laboratoire PHASE possède un modèle de rayonnement infrarouge, mais l'utilisation de ce modèle nécessite une validation pour le contexte du chauffage local. Pour cela nous avons décider d'effectuer des *expériences avec un mannequin*.

Une *analyse subjective* est undispensable pour créer un modèle du comportement local, car il est important de savoir comment un système de chauffage local est régulé par les utilisateurs. Si la sensation thermique d'un individu est elle uniquement liée aux températures de peau (locale et globale) et/ou à d'autres facteurs (en particulier, les flux radiatifs). Est-ce que la présence du LHS lui-même joue un rôle sur le comportement….etc.

Les travaux expérimentaux lié à le chauffage local ont été faite en collaboration avec le Département d'Ingénierie Mécanique (DEM – Departamento de Engenharia Mecânica et ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinânmica Industria) de l'Université de Coimbra au Portugal. Cette collaboration a été partiellement financée par un PAI (depuis 2002) et par l'UPS (bourse ATUPS en 2004). Le thème de cette collaboration était: '*Evaluation du confort thermique local avec un mannequin thermique et un modèle numérique*'. Les deux équipes engagées dans ce projet travaillent avec des approches différentes. ADAI a une approche expérimentale approfondie de chaque composant du système, permettant la détermination ou la confirmation des valeurs des paramètres physiques des échanges thermiques mis en jeu. Le laboratoire PHASE conduit depuis longtemps une approche numérique de l'analyse globale de l'homme (modèle MARCOT) et de son environnement comme étant des systèmes thermiques couplés.

L'équipe de recherche du Pr. Divo Quintela (DEM – ADAI) possède une chambre climatique, un mannequin thermique (MARIA), un bureau équipé d'un système de chauffage local (Local Heating System), et dispose d'une base de données subjectives établis par Gaspar en 2001. Initialement, les expériences avec des sujets n'ont pas été effectuées pour un but d'étudier le comportement local, mais nous avons décidé d'exploiter ces données pour mieux comprendre comment les sujets régulent le système du chauffage local. On a lancées une série des expériences avec le mannequin en Septembre 2004, pour permettre une validation du modèle de rayonnement infrarouge. Les deux expériences sont détaillées en chapitre trois.

Finalement, sans l'aspect expérimental, issu de la collaboration avec l'équipe Portugais, qui a permis de valider ou d'établir nos modèles, les conclusions sorties de ce travail n'auraient été que des pistes de réflexion.

Ce mémoire contient cinq chapitres, qui s'organisent de la façon suivante :

Le premier chapitre donne les éléments de thermo-physiologie, de transferts de masse et de chaleur entre l'homme et son environnement et de sensation et confort thermique, ainsi que les outils d'évaluation. Les bases du confort adaptatif sont présentées, et plusieurs types de régulateurs et de systèmes de chauffage locaux sont décrits.

Dans le deuxième chapitre, le fonctionnement et l'intégration du modèle de comportement de régulation globale sont présentés. Des résultats de simulation pour les saisons estivale et hivernale sont discutés pour deux types de bâtiment à faible et forte inertie thermique. On compare les résultats obtenus avec divers types de régulation dont la régulation comportementale faite par l'occupant.

Une description de la méthodologie expérimentale, de l'analyse, et des résultats relatifs au mannequin thermique en chambre climatique et aux sujets humains en conditions réelles est présentée dans le troisième chapitre. Les analyses nous permettent, entre autre, de mieux comprendre les phénomènes qui entrent en jeux dans la perception thermique et le comportement des sujets vis-à-vis d'un système de chauffage radiant local.

Le chapitre suivant concerne les échanges radiatifs, leur calcul, et la validation des résultats par comparaison avec les résultats expérimentaux. Des conclusions sont également tirées sur l'influence des flux radiatifs sur les sensations thermiques locales.

Enfin, dans le dernier chapitre, le régulateur comportemental local est développé et appliqué au cas d'un système de chauffage local. Quelques résultats de simulation sont détaillés.

CHAPITRE 1
Confort thermique et régulation dans les bâtiments

1.1 - Introduction

L'homme est un endotherme et sa température doit rester autour de 37°C quelle que soit son activité et son environnement. Le corps est régi par les lois générales de la thermodynamique, c'est-à-dire qu'il produit de la chaleur qui est dissipée dans l'environnement par échanges de chaleur latente et sensible au niveau des voies respiratoires et de la surface de la peau [Parsons, 1993]. C'est pourquoi ce chapitre décrit ces échanges de chaleur du corps humain avec l'environnement ; on y donne également les définitions de thermorégulation, de bilan thermique et un rappel de toutes les bases sur le confort et la sensation thermique qui nous semblent indispensables pour les chapitres suivants.

L'être humain n'est pas passif vis-à-vis de son climat, il est capable d'effectuer des comportements adaptés pour maintenir des conditions environnementales propices à son confort. Cette constatation est à la base de la démarche du *confort adaptatif* qui est présentée, car elle sera utilisée pour développer plus tard dans cette thèse les modèles des régulateurs global et local.

Par ailleurs, cette étude vise à déterminer l'impact du type de régulation sur les consommations énergétiques et le confort ; nous donnons des exemples de régulateurs qui existent actuellement et de systèmes de HVAC locaux déjà développés ou en voie d'essai sur le terrain.

1.2 - Echanges thermiques entre le corps et l'environnement

Dans cette partie, on va décrire la production de chaleur et chaque mode de transfert thermique (*Figure 1.1*). On se concentre essentiellement sur les échanges sensibles, car la plupart des systèmes de chauffage ou de climatisation sont uniquement fondés sur la modification des échanges convectifs et radiatifs humains (*NB : les humidificateurs ne seront pas inclus dans nos discussions*).

La majeure partie des transferts de chaleur se font au niveau de la peau ; c'est pourquoi la plupart du temps les flux échangés sont plutôt exprimés en Watts par m² de surface cutanée. Cette surface cutanée (A_{DU}) est fonction de la masse et de la taille de chaque individu.

1.2.1 - Production de la chaleur

La production de chaleur est due aux réactions chimiques qui se déroulent dans les cellules. Plus l'activité de l'individu est grande, plus les réactions sont importantes. La consommation d'oxygène et les rejets de gaz carbonique augmentent proportionnellement. La puissance totale fournie par le corps ou *métabolisme total* (M) est mesurée expérimentalement grâce au volume d'oxygène consommé [McIntyre, 1980 ; Havenith, 1997].

$$M = M_b + M_{act} + \Delta M$$

Le métabolisme basal M_b est la production de chaleur minimum nécessaire aux fonctions vitales de l'organisme. En moyenne, les valeurs sont de 45 W m^{-2} pour un homme et de 40 W m^{-2} pour une femme.

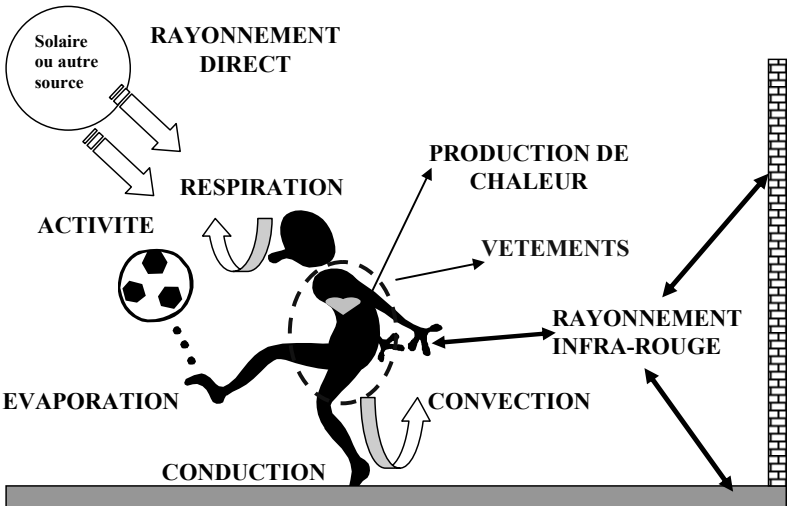


Figure 1.1 : Echanges de chaleur entre le corps et l'environnement

Le métabolisme d'activité M_{act} est dû à l'augmentation de production de chaleur qui accompagne nécessairement toute activité physique. Une personne assise au repos a un métabolisme total de 58 W m^{-2} (ou 1.0 met). Des modifications, du métabolisme (ΔM), peuvent intervenir en fonction de la pathologie, des réactions de thermorégulation, etc.

Une partie de l'énergie produite peut être transformée en travail externe (W) et la part restante (M_{net}) doit être évacuée :

$$M_{net} = M - W$$

1.2.2 - Echanges par respiration et échanges à la surface cutanée

(a) La respiration

Les processus d'inspiration et d'expiration de l'air se traduisent en général par une perte de chaleur pour le corps. Les pertes respiratoires (R_{esp}) sont décomposées en deux termes : échange de chaleur sensible (ou convection respiratoire (C_{res})) et échange de chaleur latente (ou évaporation respiratoire (E_{res})), c'est-à-dire :

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

Les pertes respiratoires sont relativement faibles au repos et varient en fonction du métabolisme. Elles représentent 10 à 12 % des pertes totales.

(b) La conduction

Il y a un échange de chaleur par conduction lorsque le corps est au contact direct avec des éléments solides (exemple, un individu assis sur une chaise). Par exemple, pour une personne sédentaire assise sur un fauteuil, l'échange conductif K (W) s'exprime [Newborough et Probert, 1984] :

$$K = h_k S_k (T_{sk} - T_s)$$

h_k est un coefficient de transferts de contact (W/m^2°C), S_k est la surface corporelle en contact, T_{sk} est la température de la peau et T_s la température du fauteuil. Il faut noter que ce cas est très particulier ; par la suite, dans cette thèse, on négligera les échanges conductifs.

(c) L'évaporation

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 de perte par évaporation (E_{vap}). Le phénomène de l'évaporation sur une surface humide est lié à l'écart de pression de vapeur entre la surface et l'air environnant. On définit un coefficient de transfert de masse, ou coefficient d'évaporation, h_e (W/m² Pa) et on peut écrire l'expression de l'évaporation au niveau de la peau [Monteith et Unsworth, 1990] :

$$E_{vap} = h_e w A_{DU} (P_{sk} - P_a)$$

P_a est la pression de vapeur dans l'air (Pa) et P_{sk} est la pression de vapeur à la surface de la peau.

Dans le cas où la peau est mouillée, l'évaporation est maximum (E_{max}). On peut déduire l'expression de la mouillure cutanée (w) comme :

$$w = E_{vap}/E_{max} = A_w/A_{DU}$$

A_w est la surface équivalente de peau mouillée (m²) et A_{DU} est la surface totale (m²). La mouillure est toujours inférieure ou égale à 1. Elle est égale à 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 transpiration insensible. La mouillure minimale est donc de 6 % et les pertes sont alors de l'ordre de 5 à 10 %.

La mouillure dépend de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. 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 [Meyer, 1981].

(d) La convection

Les échanges de chaleur par convection sont dus à la différence de température entre la surface d'échange (peau ou vêtement) (T_s) et l'air ambiant (T_a). Le flux convectif (C) échangé s'écrit donc sous la forme :

$$C = h_c S_B (T_s - T_a)$$

h_c est le coefficient d'échange convectif et S_B représente l'aire totale d'échange. Si la peau est nue, $S_B = A_{DU}$. En présence de vêtement, cette surface augmente : $S_B = f_{cl} * A_{DU}$ où f_{cl} est le facteur d'habillement et dépend de l'épaisseur de vêtements.

La difficulté réside dans la détermination de ces grandeurs quand on considère une partie locale du corps. En effet, h_c et T_a sont directement liés au régime d'écoulement convectif qui peut être de type forcé, naturel, ou mixte dans une géométrie quelque fois complexe.

- ► Pour un régime de *convection naturelle*, les mouvements d'air au voisinage du corps sont générés par les écarts de température avec l'air ambiant. Dans ces situations, les coefficients d'échange dépendent de la posture : la position assise entraîne de faibles coefficients de transfert et des valeurs plus élevées sont obtenues quand le corps est horizontal [Quintela et al., 2003]. Différents travaux [De Dear et al., 1997a ; Holmer et al., 1999 ; Oguro et al., 2002a] ont cherché à estimer les coefficients de convection naturelle sur un individu nu ou habillé. Les résultats donnent une valeur moyenne du coefficient h_c autour de 4 W m^{-2} K^{-1}.
- ► Dans le cas d'un écoulement de *convection forcée*, les coefficients d'échange dépendent des vitesses d'air locales sur chaque segment, qu'il faut alors déterminer. Il existe de nombreuses corrélations empiriques qui permettent d'estimer une valeur du coefficient de convection forcée pour différents types de configurations (ambiance homogène, ou hétérogène, activité du sujet, etc.) [Danielsson, 1993 ; Oguro et al., 2002b].
- ► Les écoulements de *convection mixte*, combinaison des régimes de convection naturelle et forcée, sont les cas les plus fréquents. Le coefficient d'échange dépend alors principalement

des écarts de température et de la vitesse d'air relative au niveau de chaque segment du corps. Ceux-ci dépendent du régime d'écoulement aérodynamique général de l'enceinte où se trouve le sujet. Il est très difficile d'évaluer avec précision la valeur du coefficient d'échange et l'on cherche le plus souvent à l'identifier à un régime bien défini.

(e) Le rayonnement

Les échanges par rayonnement sont de type propagation d'ondes électromagnétiques. On s'intéresse ici aux 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 de d'échange produit un échauffement ou un refroidissement du corps.

► L'autre type est le rayonnement solaire - il correspond toujours à un échauffement du sujet. Nous ne considérons pas cette forme de rayonnement dans cette thèse.

Les seuls échanges radiatifs que l'on considèrera ici sont dans le domaine de l'infra-rouge et donc liés aux différences de températures entre les surfaces en regard (peau, parois, panneaux etc.). Par exemple, considérons le cas d'un individu au sein d'une enceinte fermée (*Figure 1.2*). Les flux radiatifs échangés par l'individu avec les parois sont liés :

- à la géométrie (position du corps et géométrie de l'environnement)
- aux propriétés radiatives des surfaces et du milieu ambiant (s'il est participant)
- aux conditions des limites sur chaque élément (température ou flux)

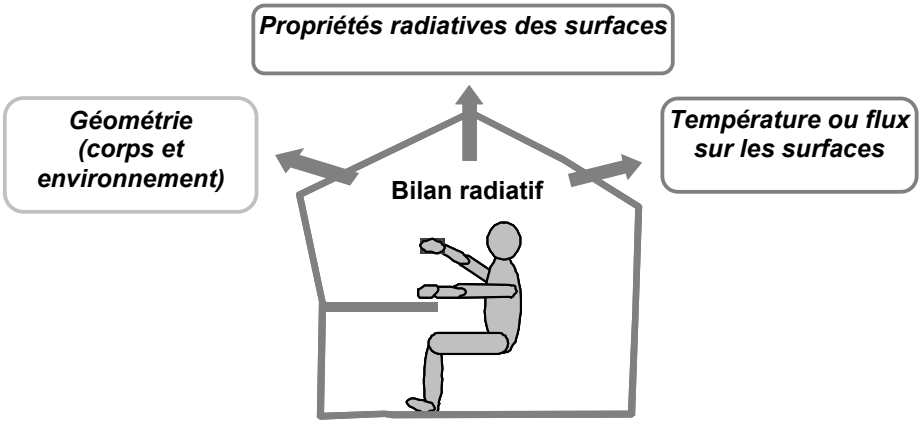


Figure. 1.2 : Echanges radiatifs entre un individu et son environnement (l'air ambiant non participant) [Leduc, 2003]

Selon des normes d'ASHRAE (1992), l'équation du flux radiatif total (R ou Φ_R) humain s'exprime par :

$$R = S_B . f_{eff} . \varepsilon . \sigma . (T_s^4 - T_{mrt}^4)$$
$$\approx S_B . h_r . (T_s - T_{mrt})$$

- f_{eff} est le coefficient effectif de surface rayonnante. Il représente la partie de flux radiatif échangée avec l'environnement et dépend de la posture ; par exemple, il est égal à 0.691 pour une personne assise et 0.744 pour une personne debout [Tanabe et al., 2000]
- ε émissivité moyenne du corps
- σ constante de Stefan Boltzmann
- T_s température moyenne de surface du corps humain (peau ou vêtement)
- T_{mrt} est la température moyenne de rayonnement. Elle est définie comme 'la température de surface uniforme d'une enceinte fictive, noire et isotherme au sein de laquelle les échanges radiatifs de l'occupant sont équivalents aux échanges présents dans l'enceinte réelle non homogène'.

L'approximation linéaire de l'équation au -dessus est utilisée pour de faibles écarts de température. Le coefficient d'échange radiatif h_r s'écrit :

$$h_r = 4.\varepsilon.\sigma.f_{eff}.\left[\left(T_s + T_{mrt}\right)/2\right]^3$$

On obtient pour h_r une valeur d'environ de 4.7 W m^{-2} K^{-1} pour des conditions ambiantes ordinaires.

Tous ces paramètres sauf les températures sont considérés comme étant des constantes dans des conditions normales. Les équations sont correctes si :

- le facteur de forme (cf. *Chapitre 4*) du corps à l'environnement est de 1. Le fait que le corps 'se voit lui-même' est pris en compte par f_{eff}
- l'aire du corps est très inférieure à celle de l'enceinte
- l'émissivité des surfaces de l'enceinte est proche de 1
- les températures sont homogènes, ainsi l'asymétrie de rayonnement est négligeable.

Ces hypothèses sont valides dans la plupart des bâtiments, mais ne peuvent pas être employées dans des environnements plus complexes comme les véhicules, ou dans le cas d'un système de chauffage local. Pour cette étude nous avons besoin d'utiliser une méthode de calcul plus précise.

<u>Remarque</u> : *Plus généralement, pour calculer le bilan thermique global on regroupe les échanges de chaleur sensible : convection et rayonnement. On exprime alors le flux sensible moyenne comme :*

$$C + R = h_c.(T_s - T_a) + h_r.(T_s - T_{mrt}) = h_o.(T_s - T_{op})$$

T_{op} est la température opérative, qui représente une température moyenne pour les échanges sensibles, h_o est le coefficient global d'échange surfacique.

$$T_{op} = \frac{h_c.T_a + h_r.T_{mrt}}{h_o} \qquad avec \qquad h_o = h_c + h_r$$

On constate que même si cette expression est couramment utilisée, car T_{op} peut être mesurée, elle entraîne une perte d'informations. Il faut noter que cette variable peut avoir un sens pour le calcul du bilan thermique global, mais ne peut pas être utilisée pour le calcul des bilans locaux, surtout dans des environnements complexes non isothermes.

Dans la littérature, on trouve de nombreuses méthodes de calcul des échanges radiatifs. Ces calculs sont d'une précision variable selon ce que l'on cherche à calculer, soit seulement le bilan global comme décrit plus haut, soit les bilans thermiques locaux du corps humain comme ils seront développés dans le *Chapitre 4.*

Dans la plupart des grandes enceintes (pièces d'habitation, locaux industriels etc..) on peut considérer que l'environnement thermique est homogène du point de vue du corps humain, à condition que celui-ci ne soit pas situé à des endroits particuliers. Dans l'habitat, les études prennent en compte les paramètres mesurés ou calculés au centre de la pièce où les conditions thermiques ne semblent pas être très hétérogènes. Toutefois, il faut noter que si l'individu se place (*Figure 1.3*) à proximité d'une source de chaleur (température T_C) ou d'un élément froid (température T_F), des disparités importantes peuvent apparaître au niveau des flux locaux échangés.

Dans le cas d'un bureau, si l'individu est soumis à un environnement radiatif fortement hétérogène dû, par exemple à l'utilisation de panneaux rayonnants (ayant pour but de créer une ambiance radiative favorable), cela peut générer un inconfort local à cause de l'asymétrie de rayonnement [ASHRAE, 1997]. Les questions que l'on peut se poser sont multiples : à quel emplacement doit-on positionner les panneaux pour atteindre un état thermique optimal sur le sujet ? Quelle doivent être leur dimension et la puissance à fournir ? Pour répondre à ces questions, il faut calculer des bilans thermiques locaux [Quintela et al., 2000 ; Chapman et al., 2000, 2001 ; Leduc, 2003].

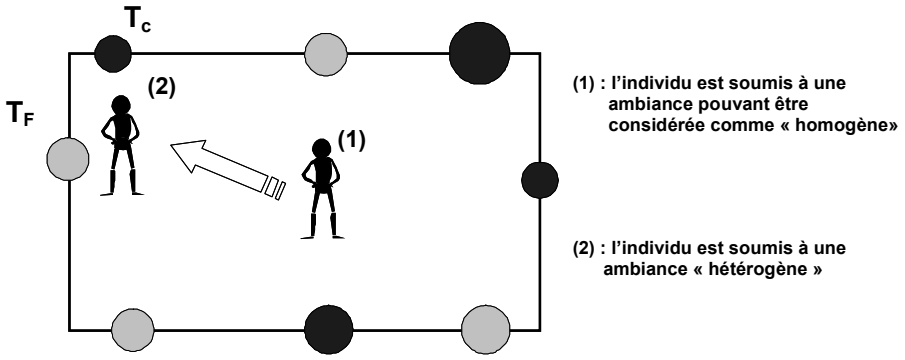


Figure 1.3 : Caractérisation d'un environnement en fonction de la position de l'individu [Leduc, 2003]

La proximité et les écarts de température entre l'individu et les parois chaudes ou froides génèrent des échanges radiatifs très importants sur certaines parties du corps humain. Il n'est donc pas étonnant que les échanges radiatifs infrarouges puissent représenter environ 70 % des échanges thermiques globaux de l'individu [Thellier et al., 1995].

1.2.3 - Transferts à travers les vêtements

Le vêtement influence tous les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement. Par exemple, dans les ambiances froides, le vêtement est un moyen efficace de réduction des pertes de chaleur et il permet de travailler dans des conditions tolérables. En revanche, les transferts de masse et de chaleur à travers les vêtements sont des phénomènes complexes et difficiles à étudier.

Les différentes couches de vêtements augmentent la complexité de l'étude par la présence de lames d'air entre la peau et entre chaque couche de tissu [Derbel, 1990 ; Havenith, 2002]. Les transferts de masse et de chaleur se font successivement dans les couches d'air et de tissu. De plus l'air se déplace, '*effet de pompage*', et le débit de ventilation est très difficile à déterminer car il dépend entre autre de la nature de tissu, de la coupe du vêtement, de l'activité de la personne. Les transferts de chaleur dans les tissus se font par conduction, et les transferts de masse par diffusion pour la phase vapeur et par migration pour la phase liquide. Il peut également y avoir des phénomènes de sorption dans les fibres composant le tissu, '*effet tampon*'. Les échanges à la surface extérieure du vêtement, se faisant par convection, rayonnement et évaporation, dépendent de la vitesse d'air, de la géométrie de la surface habillée et de sa rugosité (présence de poches, émissivité du tissu etc..). Il faut noter que la position du vêtement par rapport à la peau n'est pas constante, les mouvements, la posture, la coupe de l'habillement influencent les différents modes de transferts.

Dans le modèle simple de vêtement le plus répandu on considère une seule couche de vêtement à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température T_{sk} et la surface du tissu à température T_{cl}. La tenue vestimentaire complète est alors caractérisée par son isolation vestimentaire totale, Icl, exprimée en clo. La valeur de référence 1 clo = 0.155 m²°C/W correspond à une 'tenue classique d'hiver' (sous-vêtements, chemise et pull-over manches longues, pantalon, chaussettes épaisses, chaussures). Le facteur d'augmentation de surface (f_{cl}) est alors déterminé à partir de Icl.

Lorsqu'on s'intéresse aux transferts thermiques locaux et/ou aux régimes transitoires, ce modèle simple n'est plus suffisant, il faut alors une description plus fine du comportement thermique des vêtements sur chaque segment prenant en compte tous les phénomènes décrits précédemment. Plusieurs modèles complexes sont disponibles dans la littérature [Lotens, 1988 ; Derbel, 1990 ; Parsons, 1993 ; Althabégoity, 1996 ; Havenith, 2002]. Plus de détails sur le modèle de vêtement utilisé dans le modèle MARCOT sont disponibles dans *l'Annexe 1B*.

1.2.4 - Thermorégulation

La thermorégulation est le terme général qui regroupe les réactions que l'homme développe pour maintenir l'homéothermie et/ou le confort. On peut donc faire la distinction entre deux aspects :

- la *thermorégulation physiologique,* qui est inconsciente et dont le but est de garder la température interne des organes vitaux aux alentours de 37°C ;
- la *thermorégulation comportementale* qui est consciente et dont l'objectif est de maintenir une sensation de confort ou limiter les réactions physiologiques perçues comme désagréables.

Par exemple, si un individu a froid il va frissonner, il s'agit de réactions physiologiques. Pour lutter contre cela, il va augmenter son isolation vestimentaire, il s'agit de réactions comportementales.

Dans cette partie, nous ne développons que les réactions physiologiques ; la régulation comportementale qui est à la base de la démarche adaptative est décrite plus tard dans ce chapitre.

La gamme de températures internes physiologiquement acceptables est de 36 à 40°C pour les conditions froides et l'exercice. Le corps possède un système de régulation pour faire face aux contraintes thermiques - liées aux activités ou aux variations climatiques - et conserver sa température interne autour de 37°C.

Le système de thermorégulation physiologique simplifié peut être divisé en deux composants : le ***système de régulation*** (contrôle/actif) et le ***système régulé*** (contrôle/passif) [Stolwijk, 1970]. Le système régulé met en jeu uniquement des transferts de masse et de chaleur. En revanche, le *système de contrôle* commande les transferts d'information ; il peut être décomposé en trois parties, comme le montre la *Figure 1.4* :

- *Thermorécepteurs,* détectent l'état thermique du système contrôlé.
- *Intégrateur,* intègre les signaux et détermine l'amplitude des commandes à partir des informations données par les récepteurs thermiques.
- *Effecteur,* effectue la répartition des signaux dans le système contrôlé ; ils sont de quatre sortes et permettent de régler la sudation, les frissons, la vasoconstriction et la vasodilatation.

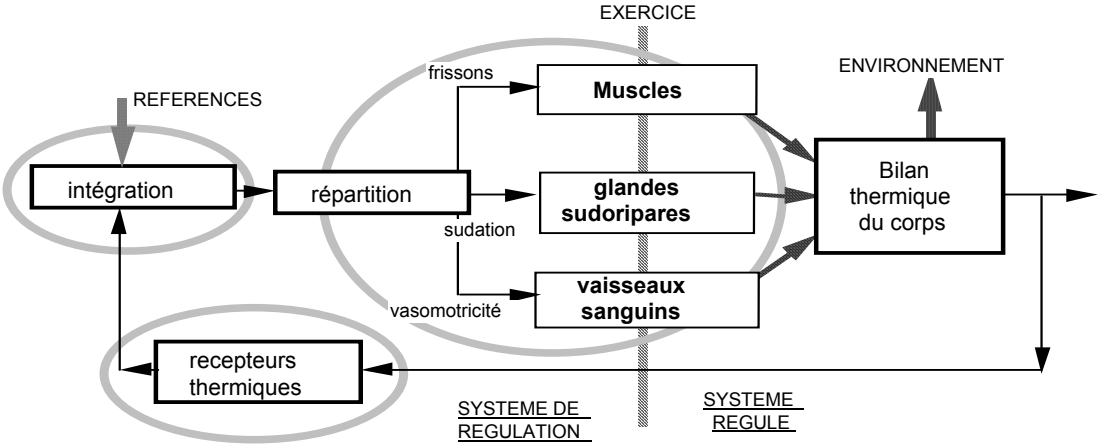


Figure 1.4 : Schématisation du système de thermorégulation [redessiné de Stolwijk, 1970].

► Thermorécepteurs et température cutanée

Des études neuro-physiologiques [Sinclair, 1973 ; Hensel, 1981 ; Kenshalo, 1990] montrent l'existence de deux types de thermorécepteurs : certains qui répondent au chaud et les autres au froid. Les détecteurs chauds sont sensibles à des élévations de température de 3.6°C/h, les froids sont sensibles à une baisse de 14°C/h.

La peau est l'organe 'sensoriel' le plus riche en matière de récepteurs thermiques, car les récepteurs sont situés à environ 200 µm en dessous de la surface [McIntyre, 1980]. Il faut noter que les températures cutanées peuvent varier dans une gamme beaucoup plus étendue que la température de l'hypothalamus. La température cutanée moyenne au repos varie entre 33°C et 34°C. Dans les conditions extrêmes elle peut varier entre 17 à 43°C. La peau n'est pas à température uniforme, car chaque partie du corps a des coefficients d'échanges de chaleurs internes et externes différents. Pour calculer les échanges de façon globale on définit une température de peau moyenne (T_{sk_moy}), qui est une moyenne pondérée des diverses température locales [Thellier, 1989 ; Parsons, 1993].

► **Intégrateur**

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 il envoie dans les différentes parties du corps une commande proportionnelle à l'écart, dans le but de déclencher des réactions physiologiques. Si le signal est positif, c'est-à-dire que le corps est surchauffé, 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, le système de régulation envoie des commandes aux divers effecteurs, dans les diverses parties du corps, où un effet local peut intervenir [Thellier, 1989].

► **Effecteurs**

Les conditions froides provoquent une *vasoconstriction* (diminution de débit sanguin) et par conséquence le transfert de chaleur vers la peau diminue. C'est pourquoi les mains, les pieds, les jambes et les bras en particulier deviennent plus froids [Piniec, 1999]. Ensuite, les *frissons* aident à lutter contre le froid. Ils apparaissent surtout quand l'individu est soumis à un abaissement brusque de la température ambiante et, donc, ils augmentent la production de chaleur métabolique (par contractions musculaires). En général, un frisson dure quelques secondes. Dans les environnements chauds ou lors d'un exercice physique intense, le flux sanguin augmente à cause de la *vasodilatation*. La chaleur produite est transportée par le sang vers la surface. Une autre réaction qui peut apparaître est la *sudation*. Ceci est un moyen de lutte contre la chaleur : en augmentant la production d'eau au niveau de la peau, elle augmente les pertes thermiques par évaporation [Parsons, 1993].

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 parfois difficiles à établir. Les principaux facteurs influençant la thermorégulation sont le sexe, la morphologie, l'âge et l'acclimatation [McIntyre, 1980].

1.2.5 - Bilan thermique

Le corps humain est un système thermique très complexe. Le bilan thermique du corps dépend de la quantité d'énergie produite par le métabolisme (principalement par les organes et les muscles) et, d'autre part, de la quantité de chaleur transférée à l'environnement. Le bilan peut être exprimé de la façon suivante [Fanger, 1970 ; McIntyre, 1980 ; Monteith et Unsworth, 1990 ; Parsons, 1993] :

$$(M - W) - (E_{vap} + R_{esp} + K + C + R) = m.c.\frac{dT}{dt} = S$$

M Métabolisme total ou production de chaleur
W énergie utilisée pour le travail mécanique
K transfert de chaleur par conduction (+/-)
C transfert de chaleur par convection (+/-)

R transfert de chaleur par rayonnement (+/-)
E_{vap} perte de chaleur par évaporation (-)
R_{esp} perte de chaleur par les voix respiratoires (-)
m masse
c capacité thermique massique moyenne
T température moyenne du corps
S charge thermique (+/-)

Tous les transferts sont exprimés en W. On donne l'indication que le transfert peut être un gain ou perte par le signe dans la parenthèse. Lorsque,

- $S = 0$ les gains et les pertes de chaleur sont compensés et par conséquent un équilibre thermique est obtenu.
- $S > 0$ le corps se réchauffe, les températures augmentent.
- $S < 0$ le corps se refroidit, les températures baissent.

Pour maintenir un bilan thermique nul, le corps met en jeu les réactions thermo-physiologiques décrites précédemment. La thermo-neutralité physiologique est atteinte quand le corps se trouve à l'équilibre thermique, en régime permanent, sans mettre en jeu des phénomènes importants de régulation.

Si les contraintes thermiques continuent d'augmenter, les astreintes physiologiques atteignent un maximum au-delà desquelles l'individu 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 ou technologique présentée dans *l'Introduction* de ce Mémoire.

1.2.6 - Sensation Thermique

L'homme est capable d'émettre un jugement sur son environnement thermique (global et local) : non seulement il sait s'exprimer sur l'aspect chaud ou froid du climat, mais de plus il émet un jugement affectif associé de satisfaction ou d'insatisfaction. C'est sur ces bases que l'on s'appuie pour parler de sensibilité thermique.

La **sensibilité thermique** trouve son origine dans l'activité des récepteurs cutanés, répondant aux stimulations froides (récepteurs les plus superficiels) ou aux stimulations chaudes (récepteurs un peu plus profonds). Les thermorécepteurs, encore appelés 'thermodétecteurs', sont des sondes qui envoient des signaux à l'hypothalamus, dans le cerveau, sur les conditions ambiantes et nous permettent de sentir ces états en tant que ***sensations thermiques*** [McIntyre, 1980]. L'aspect psychophysiologique et neuronal des sensations cutanées est discuté par Sinclair (1973), Kenshalo (1968, 1990) et Hensel (1981).

La sensation thermique globale est le reflet de l'intégration centrale de tous les récepteurs de l'organisme ; la sensation peut néanmoins être locale. A la sensation de chaud ou de froid n'est pas forcement associé l'agrément ou le désagrément : par exemple, un stimulus frais sera perçu agréablement par quelqu'un qui a chaud, alors que le même stimulus sera perçu désagréablement par quelqu'un qui a froid. Cela dépend de l'état thermique du sujet, de son passé immédiat et de ses caractéristiques personnelles [Candas et Herrmann, 1995].

Le **confort** est une notion relativement subjective ; c'est le jugement de 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 l'individu à un moment précis. D'ailleurs, le confort thermique par définition de Fanger est '*un 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*' [Fanger, 1970].

Les travaux sur les jugements thermiques restent significativement subjectifs et sont difficiles à généraliser. Des efforts ont été faits pour quantifier cette notion et la rendre la plus objective possible ; c'est ainsi que les diverses échelles de jugements thermiques ont été créées. Les échelles peuvent être discontinues ou continues.

Les échelons sont numérotés et les nombres assignés sont de 1 à 7, ou de -3 à 3, en passant par zéro ; comme le montrent les échelles dans le *Tableau 1.1*.

Echelle Bedford		Echelle ASHRAE	
beaucoup trop chaud	7	très chaud	3
trop chaud	6	chaud	2
confortablement chaud	5	légèrement chaud	1
confortable et ni chaud ni froid	*4*	*neutre*	*0*
confortablement frais	3	légèrement froid	-1
trop frais	2	Froid	-2
beaucoup trop frais	1	très froid	-3

Tableau 1.1 : Echelles de sensations de Bedford et de l'ASHRAE [McIntyre, 1980]

Ces deux échelles sont les plus utilisées, malgré quelques inconvénients [McIntyre, 1980 ; Galéou, 1991], à savoir :

- la signification des mots qui caractérisent les échelons peut varier selon l'expérience et la personnalité du sujet,
- la dimension santé et l'activité métabolique ne sont pas contrôlables,
- les sujets sont plus sensibles aux basses températures,
- il y a des facteurs non thermiques - comme le mobilier ou la couleur des murs,
- le temps passé entre les questionnaires suscite un possible décentralisation (un certain pré jugement de la part du sujet) sur la réponse ou sur le jugement suivant.

En général, l'échelle symétrique de l'ASHRAE est la plus utilisée, mais elle peut être confuse en raison de chiffres négatifs ; donc, la bonne pratique l'utilisation de l'échelle de 1 à 7. La numérotation permet une analyse statistique ou mathématique.

L'étude du confort ne s'arrête pas à une analyse globale des échanges de chaleur, mais il est attaché aux phénomènes locaux qui peuvent intervenir. Dans le cas de l'habitat, les causes d'inconfort local *('un refroidissement ou un échauffement local d'une partie du corps qui est ressenti comme désagréable')* sont [Fanger, 1970 ; Parsons, 1993 ; ASHRAE, 1997] :

- asymétrie de rayonnement - horizontal et/ou vertical,
- courant d'air,
- différence verticale de la température d'air,
- contact avec des surfaces chaudes ou froides - la température du sol.

Les travaux sur chacune de ces causes d'inconforts sont largement disponibles dans la littérature et fournissent des données sur le pourcentage de personnes insatisfaites en fonction d'une grandeur physique, par exemple, la vitesse d'air locale.

1.3 Evaluation des ambiances thermiques

On peut déterminer objectivement les combinaisons des divers paramètres caractéristiques de l'ambiance et du sujet pour lesquelles un individu peut atteindre la neutralité thermique. Mais, il est beaucoup plus difficile et compliqué d'assurer son confort.

Plusieurs efforts ont été faits par les chercheurs pour créer des outils qui donnent facilement une indication de confort. Ainsi, dans les parties suivantes, on parlera des indices de confort, des modèles de thermo-physiologie et de sensations thermiques.

1.3.1 - Les indices

Les indices ont été créés pour donner une rapide indication du vote de confort ou de sensation et ainsi réduire la difficulté de travailler avec de nombreuses variables météorologiques, physiques et personnelles. Aujourd'hui, il existe plus de cent indices ; en général, la schématisation d'un calcul d'indice peut se présenter comme le montre la *Figure 1.5*.

Parsons (1993) a indiqué trois catégories, exprimées ci-après, sans rentrer dans les détails des exemples :

- *Les indices rationnels* : Heat Stress Index (HSI), Required Sweat Rate (SWreq) [Mairiaux et Malchaire, 1995], Effective Temperature (ET) et Corrected Effective Temperature (CET).
- *Les indices empiriques* : Predicted Four Hour Sweat Rate (P_4SR) [Kerslake, 1972], Heart Rate Prediction, Predicted Mean Vote (PMV) et Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [Fanger, 1970].
- *Les indices directs* : Wet Globe Temperature (WGT) [Botsford, 1971], Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) [Mala, 2001], Temperature Humidity Index (THI) [Qualye et Doehring, 1981], Thermal Neutrality [Cena et de Dear, 1999].

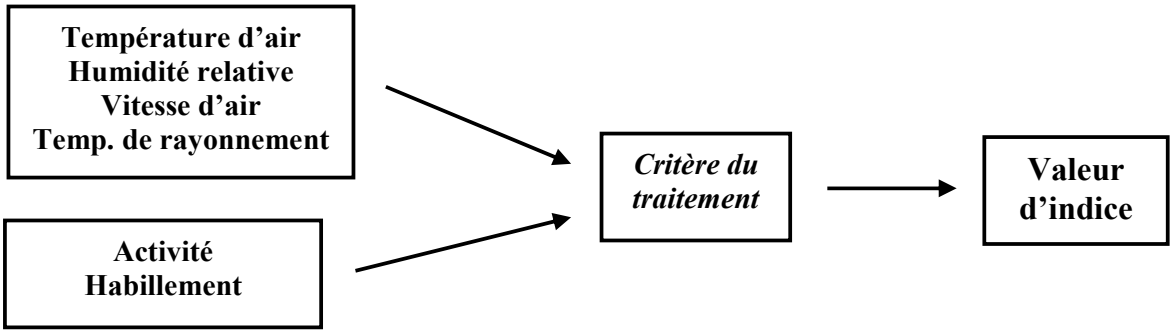


Figure 1.5 : Présentation schématique pour le calcul d'un indice [dessin d'après Eissing, 1995]

Il faut noter que les indices de confort les plus couramment utilisés sont le PMV *(vote moyen prévisible)* et le PPD *(pourcentage prévisible d'insatisfaits)* qui font actuellement partie des normes françaises et internationales [ISO 7730] (cf. *Annexe 1A*). Dans un premier temps, l'indice PMV sera utilisé pour l'évaluation du confort global dans cette étude.

1.3.2 - Les modèles de thermo-physiologie

De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour prévoir les réponses thermiques et physiologiques du corps humain en fonction des conditions environnementales, dans les conditions stables et instables. Dans les modèles les plus simples, le corps est traité comme un bloc unique. Les modèles plus complexes divisent le corps en plusieurs segments. La quantité de travail fait sur ces modèles indique qu'ils ont été d'un grand intérêt pour les chercheurs. Quelques exemples de modèles simples et complexes sont décrits ici.

(a) Les modèles simples

Les modèles simples sont assez répandus, car ils sont faciles à utiliser et peu coûteux en temps de calcul. Leur but essentiel est de calculer de façon précise les indices faisant intervenir les variables physiologiques (température cutanée, mouillure, etc.).

Gagge et ses collaborateurs (1973, 1986, 1995) ont développé un modèle numérique simple d'un système de thermorégulation. Ce modèle est une version simplifiée, dérivée du modèle de Stolwijk (1970). Il est composé de deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et sa périphérie. Les compartiments sont isothermes. Les transferts de chaleur entre eux se font par conduction tissulaire et convection sanguine. Les échanges vers l'extérieur se font par les modes de transferts décrits dans le bilan thermique. L'influence des habits est prise en compte grâce à une résistance thermique.

Le modèle de **KSU** est semblable au modèle de Gagge ; il permet de calculer un indice de sensation thermique lié à l'astreinte physiologique, alors que celui de Gagge fournit un indice lié aux contraintes thermiques. Il s'agit d'un indice empirique séparé en deux termes : un indice 'froid' relié à l'état de vasoconstriction et un indice 'chaud' lié à la mouillure cutanée [Berglund et Stolwijk, 1972 ; Sprague et al., 1974 ; Azer et Hsu, 1977].

Ces deux modèles prennent en compte les réactions physiologiques et sont utilisables en régime transitoire. De nombreuses études comparatives ont été réalisées et montrent de bons résultats dans une gamme assez étendue de conditions ambiantes : mais on ne peut étudier que des configurations homogènes, chaque paramètre de l'ambiance étant représenté par une seule valeur.

(b) Les modèles complexes

Si l'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 (1964). Le corps est divisé en 6 segments (tête, tronc, 2 bras, 2 jambes) reliés entre eux par le flux sanguin. Chaque segment est un cylindre composé de 2 noeuds - la région intérieure étant composée de tissus, os et viscères et la région externe de graisse et de peau. Par la suite, il a divisé le corps humain en 15 segments et obtenu 250 compartiments.

En 1966, Stolwijk et Hardy ont divisé le corps humain en trois cylindres - la tête, le tronc et les extrémités. Chaque cylindre a été divisé en deux couches pour représenter des différences anatomiques et fonctionnelles. Plus tard, ils ont divisé le modèle en 6 segments où chaque segment a été subdivisé en 4 couches ou compartiments concentriques : noyau, muscle, graisse et peau. Un compartiment additionnel de sang a été ajouté pour représenter les grandes artères et veines qui échangent la chaleur avec tous les autres compartiments par convection [Stolwijk et Hardy, 1971].

Kuznetz (1979) présente un modèle de 10 segments avec le concept de deux couches (noyau-peau). Cependant, il a été modifié pour tenir compte des variations de températures locales de la peau pour des situations transitoires dans sa dernière version. Ce modèle a des possibilités pour prendre en compte les dimensions spatiales - radiale et angulaire - et il fonctionne en régime stationnaire et transitoire.

Le modèle créé par Stolwijk (1970) a été la source d'inspiration et de motivation pour différentes améliorations et développements ; c'est actuellement le modèle qui est à la base de la plupart des modèles de thermo-physiologie dans le monde. Certains exemples de versions améliorées qui sont utilisés par chacun de ces laboratoires sont discutés ci-dessous.

Le '*Modèle d'Analyse et de Recherche pour le Confort Local*' (MARCL), ou connu aussi comme le 'modèle de l'habitant' [Thellier, 1989], est un modèle de 6 segments comme celui de Stolwijk mais modifié pour représenter un homme dans un habitat. Parmi les modifications qui ont été effectuées, les principales sont : caractérisation de l'influence des hétérogénéités spatiales et temporelles de l'habitat sur les réactions thermo-physiologiques d'un individu; modifications du mode de calcul des échanges radiatifs, convectifs, évaporatifs et la prise en compte simplifiée des vêtements. Ce modèle a été intégré dans le logiciel TRNSYS (cf. *Chapitre 2*). Il a été modifié et

utilisé en plusieurs occasions pour l'ambiance d'une voiture [Althabégoity, 1996 ; Piniec, 1999]. Une version modifiée de MARCL, nommée MARCOT (*Modèle d'Analyse et de Recherche des Conditions Optimales en Thermique*) sera utilisée dans cette étude (cf. *Annexe 1B*).

Werner et al. (1989) ont travaillé avec une version générique des modèles de Wissler et de Stolwijk. Le modèle a été appelé THERMOSIUM et il comprend 6 segments comme les autres [Werner et Webb, 1993 ; Xu et Werner, 1995 ; 1997].

Fiala et al. (1999, 2001) ont développé un modèle dynamique où le corps a été divisé en 15 segments et chaque compartiment est composé de 7 matériaux : cerveau, poumons, os, muscles, viscères, graisse et peau. La peau a été modélisée par 2 couches avec des propriétés physiologiques différentes, la peau intérieure et la peau externe.

Le modèle de confort de Berkeley est basé sur le modèle de Stolwijk et aussi sur le travail effectué par Tanabe. Il peut simuler un nombre illimité de segments du corps. Cependant, la plupart des applications emploient 16 segments correspondant au mannequin thermique. Ce modèle est capable de prévoir les réponses physiologiques dans les conditions transitoires et non uniformes [Arens et al., 2001 ; Huizenga et al., 2001].

Enfin, Tanabe et al. (2002) ont proposé un modèle de thermorégulation de 65 noeuds combiné avec les modèles complexes de rayonnement et de dynamique des fluides (CFD). Les coefficients de transfert thermique et d'isolation vestimentaire sont ceux tirés des expériences avec mannequin thermique. Ce modèle permet également la modélisation en diverses conditions non uniformes.

1.3.3 - Les modèles de jugement thermo-sensoriel

Dans la littérature, on peut regrouper les modèles de sensations en deux groupes : les modèles qui sont basés sur de simples lois statistiques et les modèles dynamiques qui sont plus complexes et sont une extension des modèles de thermo-physiologie. Les modèles statistiques sont obtenus selon le traitement des données par régression linéaire ou par pondération d'une variable importante liée aux sensations. Malgré leur simplicité, ils sont valables dans les deux régimes, stationnaire et transitoire. Les modèles dynamiques sont basés sur des lois non linéaires et fonctionnent en couplage avec les modèles thermo-physiologiques.

Il est important de remarquer que les premiers développements de modèles ont eu lieu pour la recherche du confort global dans l'habitat (exemple : PMV/PPD développés par Fanger (1970)). Ensuite, il y a eu une évolution pour la recherche de confort local caractérisant les conditions hétérogènes dans l'habitat ou les transports. Quelques exemples seront présentés dans les paragraphes suivants.

(a) Les modèles simples

Actuellement, il y a très peu de références pour les modèles simples. Le principe de fonctionnement est de trouver une corrélation entre une variable que l'on soupçonne être sensible et la sensation thermique d'un individu. Une des premières études a été faite par Rohles et Nevins (1971) sur les modèles simples de sensation. Ils ont réalisé des expériences avec 800 hommes et 800 femmes, tous vêtus à 0.6 clo pour diverses conditions : température d'air et humidité relative. Pour toutes les données obtenues, ils proposent l'équation suivante où TS représente la valeur de sensation thermique :

$$TS = 0.151 * T_a + 0.010 * RH - 8.371 \qquad (T_a = T_{mrt} \text{ en °F et RH en \%})$$

D'autres chercheurs ont remarqué que cette équation donnait des valeurs pouvant dépasser l'échelle de sensation (7 points) ; il faut donc être prudent sur son utilisation [Rohles, 1973].

Ensuite, Azer et Hsu (1977) ont modifié l'équation ci-dessus et l'ont séparée en deux, pour calculer une sensation thermique positive (TS^+) et négative (TS^-). La TS^+ prend en compte un facteur de mouillure (ε_{sw}), lié à la mouillure cutanée. La TS^- est liée au facteur de vasoconstriction (ε_{vc}). Les équations sont :

$$TS^+ = [5.0 - 6.56(P_a - 0.50)]\varepsilon_{ws} \qquad \text{avec} \quad \varepsilon_{ws} = \frac{ws - ws_0}{1.0 - ws_0}$$

$$TS^- = -1.46\varepsilon_{vc} + 3.75\varepsilon_{vc}^2 - 6.19\varepsilon_{vc}^3 \qquad \text{avec} \quad \varepsilon_{vc} = \frac{ks_0 - ks}{ks_0 - ks_{(-4)}}$$

Les variables *ws* et ws_0 représentent la mouillure cutanée et la mouillure à la neutralité thermique, et les variables *ks*, ks_0 et $ks_{(-4)}$ sont la conductance globale de peau, la conductance à la neutralité thermique et dans des conditions très froides. Ces deux expressions prennent en compte les réactions physiologiques et sont utilisables en régimes transitoires. De nombreuses études comparatives ont été réalisées et montrent qu'ils donnent de bons résultats.

Selon McIntyre (1980), si la température d'air est connue, on peut prédire la sensation thermique par une régression linéaire valable pour des sensations comprises entre 2 et 6 comme le montre la *Figure 1.6*. Au-delà de ces valeurs, il y a un changement de linéarité. Pour prendre en compte l'échelle en entier, il a proposé que la courbe soit en forme de **'S'**.

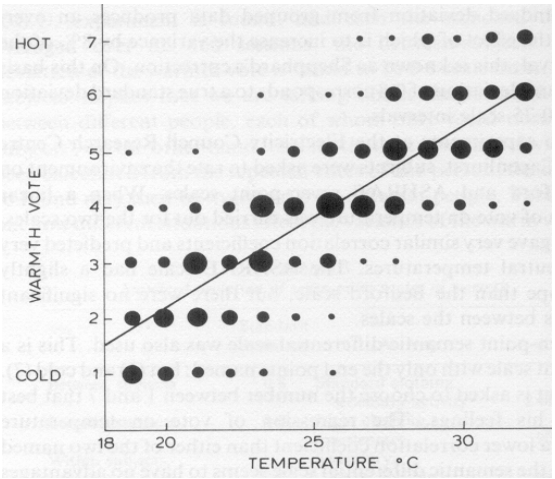


Figure 1.6 : Sensations thermiques expérimentales (1296 sujets, habillement léger) en fonction de la température ambiante. L'aire de chaque cercle représente le nombre des réponses.
Une régression linéaire a été imposée [McIntyre, 1980]

La sensation thermique obtenue [Zhang, 2003] dans le cas d'un véhicule, montre que la sensation globale ($TS_{globale}$) est fonction des sensations locales suivant l'équation :

$$TS_{globale} = 0.42*TS_{front} + 0.38*TS_{bras\ côté\ fenêtre} + 0.2*TS_{cuisse\ côté\ fenêtre} + 0.28*TS_{pied\ côté\ fenêtre} + 0.42$$

La méthode utilisée est celle d'une 'pondération'. Ainsi, chaque segment intervient dans la sensation globale selon son importance observée dans les expériences.

(b) Les modèles dynamiques

Dans ce groupe, les modèles peuvent être classés par leurs caractéristiques de fonctionnement. Les modèles peuvent être basés sur une méthode analytique, des lois non linéaires, et des combinaisons de la vitesse de variation des températures de peau (dT_{sk}/dt) et/ou hypothalamus (dT_{hy}/dt).

► **Calcul Analytique**

Le travail pour étudier les sensations de manière analytique a été développé par Galéou [1989, 1991] dans notre équipe. Le modèle nommé 'TRIM' fonctionne à partir de Tableaux reliant

les sensations locales aux variables physiques et physiologiques locales. Ces Tableaux sont les résultats d'une synthèse bibliographique et d'expériences. TRIM permet de prévoir les sensations globales et locales. Les sensations peuvent également être modifiées dans le cas de conditions très hétérogènes (par exemple, différence verticale de température d'air, etc.). Il fonctionne en autonomie et également en couplage avec le 'modèle de l'habitant' (décrit dans les paragraphes précédents). Plus d'information sur le fonctionnement de TRIM et les différentes plages de sensations sont présentées dans *l'Annexe 1C*.

Althabégoity (1996) et Piniec (1999) ont montré que, dans le cas d'une voiture, il semble important d'intégrer au modèle la température de l'air inspiré et le flux solaire reçu. On peut écrire les sensations en termes de température de sensation (T_s) pour chaque segment du corps i par la relation :

$$T_{s,i} = (1-\alpha).T_{sk,i} + \alpha.T_{a,1}$$

$T_{a,1}$ Température de l'air au niveau de la tête (température inhalée par le sujet)

$T_{sk,i}$ Température cutanée du segment i

α Facteur de pondération relatif au segment i

La sensation S_i été ensuite calculée en fonction de $T_{s,i}$ en comparant sa valeur à une échelle donnée dans un Tableau de référence. Les Tableaux ont été validés pour plusieurs cas en été et en hiver. Les sensations thermiques de la saison estivale prennent en compte l'influence du soleil. L'expression finale déduite est :

$$S_i = Se_i + 0.03.(10 - Se_i).(\alpha_{sol,i}Ray)$$

Se_i Sensation calculée par le Tableau pour le segment i, en fonction de $T_{s,i}$

$\alpha_{sol,i}$ Coefficient de pondération par segment, par exemple, 0.2 pour le tronc

Ray Apport énergétique total dû au soleil. Lorsque l'ensoleillement est maximum, la sensation sur certains segments peut être augmentée de trois points.

Tous les Tableaux qui ont été établis font partie d'une recherche très fine effectuée dans les voitures sur deux individus, ainsi on peut conclure que les équations restent très personnalisées.

► **Lois non linéaires**

Dans sa bibliographie, Galéou (1991) a noté que les relations entre la sensation thermique et la température cutanée T_{sk} ne sont pas linéaires. Pour le cas d'un individu au repos, la sensation thermique globale et/ou locale (S) est exprimée de la façon suivante :

$$S_g = \alpha_0 + \alpha_1 T_{sk} + \alpha_2 T_{sk}^2 + \alpha_3 T_{sk}^3$$

α_0, α_1, α_2 et α_3 dépendent de chaque segment.

► **Utilisation de vitesse de variation**

La réponse instantanée aux conditions passagères est corrélée à celles des récepteurs thermiques du corps, qui réagissent différemment aux conditions statiques et dynamiques. Dans les conditions d'équilibre, les thermorécepteurs envoient un signal statique au cerveau. Ce signal est basé sur la température de peau et la température centrale. Quand les conditions changent, les thermorécepteurs envoient non seulement le signal statique, mais également un signal dynamique qui correspond à la vitesse de variation de ces deux températures.

Hensel (1981) a proposé que les sensations chaudes et froides puissent être exprimées en fonction de la température de la peau (T_{sk}), de la vitesse de variation de la température de peau (dT_{sk}/dt), et de l'aire de stimulation (F) :

$$\text{Sensation} \rightarrow f\,(T_{sk}, dT_{sk}/dt, F)$$

Ring et de Dear (1991) ont développé un modèle de sensation thermique basé sur la capacité des humains à détecter instantanément des changements de l'environnement thermique par les thermorécepteurs cutanés. Leur modèle prend en compte la partie statique et dynamique et l'équation s'écrit en terme de fréquence d'impulsion (Hz) des thermorécepteurs (R) :

$$R(x,t) = K_s.T(x,t) + K_d.\partial T(x,t)/\partial t$$

K_s et K_d sont les constantes pour les parties statique et dynamique respectivement en Hz/K et x représente la profondeur du thermorécepteur.

Les thermorécepteurs des différentes parties du corps ont des sensibilités thermiques différentes. Pour relier la fréquence de réponse des thermorécepteurs à la sensibilité thermique, Ring et al. (1993) ont créé un modèle de stimulus thermique dynamique (DTS - Dynamic Thermal Stimulus) en assignant différents facteurs d'aires (ASFs - Area Summation Factors) aux différentes régions basées sur leur sensibilité thermique. Le DTS est la somme de toutes les impulsions accumulées par la peau, multipliées par l'ASF approprié :

$$DTS = \sum\{ASF_i.R_i\} = \sum\{ASF_i.(K_{s,i}\, T_{sk,i} + K_{d,i}\, .dT_{sk,i}/dt)\}$$

Les ASF_i sont plus grands pour des thermorécepteurs de chaleur et de froid dans les régions sensibles de la peau (ASF = 5 pour le visage, le cou et la main) et plus petit pour ceux dans les régions moins sensibles (1 et 2 pour le reste du corps).

Fiala et al. (2003) ont ajouté une partie thermo-sensorielle à leur modèle de thermo-physiologie qui prévoit les sensations thermiques d'un sujet assis ou actif. Les régressions ont été faites pour tenir compte de la tendance non linéaire des sensations mesurées.

Le modèle DTS (Dynamic Thermal Sensation) donne la sensation selon l'échelle d'ASHRAE:

$$DTS = 3.\tanh\left[a.\Delta T_{sk,m} + F_2 + \left(0.11\frac{dT^{(-)}_{sk,m}}{dt} + 1.91e^{-0.681t}.\frac{dT^{(+)}_{sk,m}}{dt_{\max}}\right).\frac{1}{1+F_2}\right]$$

$a = 0.30\ K^{-1}$ si $\Delta T_{sk,m} < 0$ et $a = 1.08\ K^{-1}$ si $\Delta T_{sk,m} > 0$; de plus, $dT^{(-)}_{sk,m}/dt = 0$ pour $dT_{sk,m}/dt > 0$. Le terme F_2 est calculé par l'équation suivante où ΔT_{hy} représente les changements de température de l'hypothalamus :

$$F_2 = 7.94 * \exp\left(\frac{-0.902}{\Delta T_{hy} + 0.4} + \frac{7.612}{\Delta T_{sk,m} - 4}\right)$$

Zhang (2003) montre que la sensation thermique locale dépend de la température de peau locale et est bien représentée par une fonction logistique (*Figure 1.7*). Si la température cutanée locale ($T_{sk,loc}$) s'éloigne de la température notée au début (T_{sk,loc_set}), la sensation atteint les limites de -4 ou 4. On atteint la limite du côté chaud plus vite que du côté froid, parce que la gamme de variations de la température de peau du côté chaud est beaucoup plus étroite.

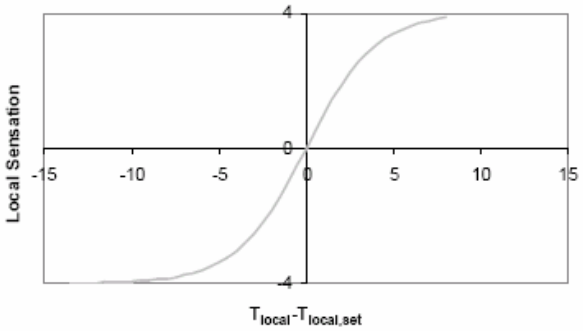


Figure 1.7 : Modèle logistique de sensation [Zhang, 2003]

Un autre modèle numérique, 'TRANMOD' a été créé par Guan et al. (2003a, 2003b) pour le cas de la voiture. Enfin, les nouvelles tendances pour les modèles de sensations sont les modèles qui emploient l'intelligence artificielle neuronale pour prendre en compte les effets psychologiques et

sociaux. En fait, la plupart des industries du véhicule utilisent ce type de modèle, mais les détails ne sont pas accessibles au grand public [Piniec, 1999].

Malgré le fait qu'il existe des modèles plus complexes que TRIM, nous avons choisi de l'utiliser pour les raisons suivantes :

- Il est basé sur une importante recherche bibliographique.
- Il a été validé par les physiciens, psychologues et physiologistes,
- Les tableaux sont simples à utiliser et éventuellement modifiables.
- Toutes les données sont disponibles au laboratoire ce qui n'est pas le cas des modèles décrits dans la littérature.
- Il fait partie des outils d'évaluation de notre équipe et forme une chaîne cohérente avec notre modèle de thermo-physiologie.

1.3.4 - Le Mannequin Thermique

Pour mesurer expérimentalement les flux de chaleur on utilise des mannequins thermiques secs et humides de forme humanoïde et parfois articulés pour pouvoir reproduire les mouvements (marche, etc.). Ces mannequins sont souvent régulés en densité de flux ou en température de surface et utilisés en chambre climatique ou en site réel. Un des premiers mannequins (un seul segment) a été créé pour l'armée américaine au début des années 40. Ensuite, d'autres mannequins ont été fabriqués avec différents matériaux et beaucoup plus de segments et les contrôles électroniques ont été améliorés. On peut résumer les étapes importantes dans le développement des mannequins par le *Tableau 1.2*.

No	No des segments	Matériaux	Contrôles	Flexibilité	Date
1	one-segment	copper	analogue		USA 1945
2	multi-segment	aluminium	analogue		UK 1964
3	radiation manikin	aluminium	analogue		France 1972
4	multi-segment	plastics	analogue	moveable	Denmark 1973
5	multi-segment	plastics	analogue	moveable	Germany 1978
6	multi-segment	plastics	digital	moveable	Sweden 1980
7	multi-segment	plastics	digital	moveable	Sweden 1984
8	fire manikin	aluminium	digital		USA
9	immersion manikin	aluminium	digital	moveable	Canada 1988
10	sweating manikin	aluminium plastic aluminium	digital digital digital	 moveable moveable	Japan 1988 Finland 1988 USA 1996
11	female manikin	plastics single wire	digital, comfort regulation mode	moveable	Denmark 1989
12	breathing thermal manikin	plastics singel wire	digital, comfort regulation mode	moveable, breathing simulation	Denmark 1996
13	sweating manikin	plastic	digital, 30 dry and 125 sweat zones	realistic movements	Switzerland 2001
14	self-contained, sweating field manikin	metal,	digital, 126 zones	articulated	USA 2003
15	virtual, computer manikin	numerical, geometric model	heat and mass transfer simulations	articulated	China 2000 UK 2001 Sweden 2001 Japan 2002
16	one segment, sweating manikin	breathable fabric	digital, water heated	moveable	China 2001
17	one segment manikin	wind proof fabric	digital, air heated	moveable	USA 2003

Tableau 1.2 : Quelques étapes importantes du développement des mannequins thermiques [Holmer, 2003]

Depuis un certain temps la recherche utilisant les mannequins thermiques est en pleine croissance. L'industrie automobile et les fournisseurs de vêtements de sport utilisent ces mannequins pour valider les caractéristiques de leurs produits [Rönnlund et al., 1999 ; Sari, 1999].

La recherche scientifique utilise les mannequins pour mieux comprendre l'impact d'un environnement thermique. Par exemple, McCullough et al. (1985) ont établi une base de données pour l'isolation de nombreux types de vêtements. Gaspar (2004) montre la séparation entre les flux convectifs et radiatifs pour calculer les coefficients d'échanges grâce à un mannequin.

Les mannequins peuvent fonctionner en cinq modes de contrôle :

1. Mesure seulement - pas d'échauffement
2. Chauffé avec une température constante et homogène (exemple : corps à 34°C)
3. Chauffé à température constante et hétérogène - la distribution en températures baisse du tronc aux pieds
4. Chauffé avec une puissance constante
5. Chauffage basé sur l'équation de confort - plus près du fonctionnement de l'homme.

Les mannequins sont supposés avoir les mêmes échanges de chaleur que l'homme, mis à part qu'ils ne transpirent pas. L'équation de confort de Fanger (1970) donne la température moyenne de peau en condition de la neutralité thermique :

$$T_{sk} = 35.77 - 0.028.Q_m$$

Q_m représente le flux total perdu. Comme le mannequin ne transpire pas, Q_m ne peut pas être mesuré directement. En considérant des conditions intérieurs classiques : à 24°C et 50 % d'humidité relative, on peut estimer les pertes latentes et on obtient :

$$Q_m = 1.96.Q_t - 21.56$$

Q_t est le flux sensible perdu par convection et rayonnement qui correspond alors au flux perdu par le mannequin sec. Par insertion de l'équation montrée ci-dessus dans la première équation on obtient la relation suivante :

$$T_{sk} = 36.4 - 0.054.Q_t$$

Les mannequins thermiques sont souvent complexes, délicats et chers; ils restent très utilisés pour les raisons suivantes. Ils permettent :

1. La simulation appropriée de l'échange thermique du corps entier.
2. La mesure du flux global et local.
3. Une méthode réaliste pour évaluer des pertes de chaleur sèche.
4. La mesure de l'isolation thermique d'habillement.
5. L'instrumentation rapide, précise et la répétition des expériences.

1.4 - Le confort adaptatif

1.4.1 - Définition

La définition de l'approche adaptative de Nicol (2003) est la suivante : *"If a change occurs such as to produce discomfort, people react in ways that tend to restore comfort".* Si un changement a lieu produisant l'inconfort, les gens réagissent de façon à revenir au confort. Autrement dit, cette approche considère que l'homme peut agir sur son environnement en fonction de ses besoins. Donc, s'il n'est pas confortable, par exemple, quand il a froid - il peut déclencher le chauffage ou mettre plus de vêtements, et, inversement, s'il a chaud - il peut utiliser une climatisation, adopter une posture plus confortable ou enlever un vêtement.

La contrainte à laquelle l'homme doit faire face est le maintien de sa température interne constante quel que soit le climat. Pour cela, il utilise divers processus de régulation physiologique involontaires et/ou des actions comportementales. Il faut préciser que si la régulation physiologique

n'est pas suffisante, les actions comportementales deviennent nécessaires. Ainsi, on peut classer les actions adaptatives en réponse au réchauffement ou au refroidissement, par exemple [Nicol, 2003] :

- régulation de la production de chaleur (on bouge),
- régulation de chaleur perdue (on met un pull),
- régulation de l'environnement thermique (on touche au thermostat),
- choix d'un environnement thermique différent (on ouvre une fenêtre).

(a) Trois catégories d'adaptation thermique

Il est possible de distinguer trois catégories d'adaptation aux conditions intérieures, comme le montre la *Figure 1.8* : les modifications par suite d'actions comportementales, de l'acclimatation et de l'accoutumance. Chacune de ces actions sera discutée ci-dessous.

► **Actions Comportementales**

Les modifications sont faites consciemment - comme le comportement personnel, technologique, culturel (par exemple, le choix des vêtements). C'est ce type d'adaptation qui offre aux personnes le plus de possibilités pour jouer un rôle actif et maintenir leur propre confort (cf. *Figure 1.9*) [Brager et De Dear, 1998].

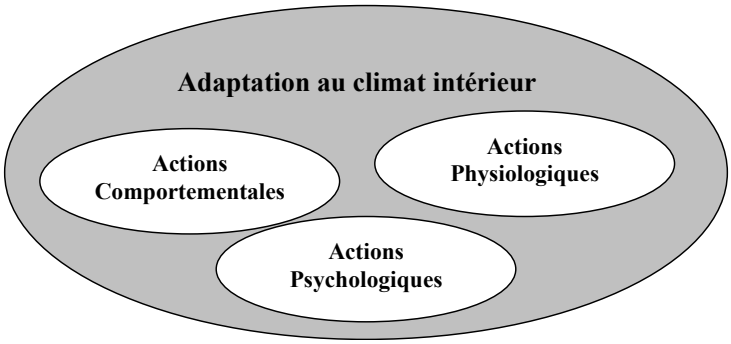


Figure 1.8 : Les trois types d'adaptation thermique aux conditions intérieures [redessiné : De Dear et al., 1997b]

Le degré de réaction des occupants au climat intérieur dépend fortement des *facteurs contextuels*. Le contexte peut être décrit en terme de *'possibilité adaptative*' comparé aux '*contraintes*' ou aux restrictions de degré de liberté, c'est-à-dire dans quelle mesure un bâtiment peut offrir aux occupants des moyens d'intervenir de façon adaptative [Baker et Standeven, 1995]. Les possibilités adaptatives peuvent provenir :

- d'une spécificité du bâtiment lui-même, comme la fonctionnalité des fenêtres, la distance entre les occupants et les fenêtres, la disposition intérieure (bureaux ouverts ou individuels),
- des caractéristiques énergétiques du bâtiment, comme le système de commande de la climatisation - individuelle ou globale - et la proximité des différentes commandes du système,
- des conditions d'organisation sociale régnant dans les bâtiments, par exemple l'existence d'un code strict de l'habillement ou de travail sur un poste fixe toute la journée [Brager et De Dear, 1998].

A l'inverse on peut définir des contraintes :

1. Climatique : les bâtiments en milieu tempéré tendront à offrir plus d'occasions adaptatives à leur occupants, comparés aux bâtiments dans un climat dur ou extrême qui doivent présenter une protection plus stricte contre les éléments.
2. Economique : le coût du contrôle de l'ambiance thermique.
3. Architecturale : les caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment, le positionnement et la taille des fenêtres, les stores solaires, le système local ou centralisé de chauffage/climatisation.
4. Sociale : la possibilité pour l'individu de changer de vêtements, les types d'habillement quand ils sont régis par le climat, la mode ou la religion.

5. Professionnelle : le type de travail, la façon de s'habiller ou de travailler dans des endroits fixes [De Dear et al., 1997b].

L'ajustement comportemental représente le lien de rétroaction le plus immédiat vers l'environnement thermique. Simplement, si un individu ressent un inconfort il peut réagir pour être plus confortable. Ce qui pourrait avoir été précédemment considéré comme la conséquence finale dans le modèle statique d'équilibre thermique (sensation d'inconfort) devient le point initial pour cette rétroaction dans le modèle adaptatif (cf. *Figure 1.9*).

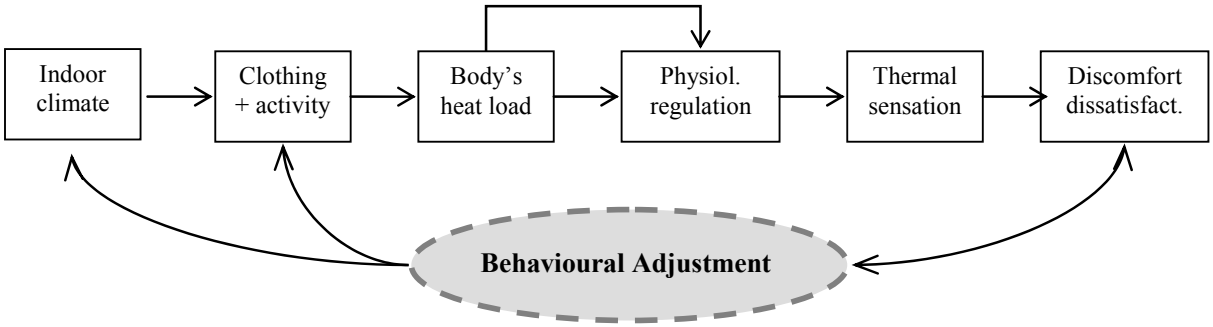


Figure 1.9 : Boucle de rétroaction comportementale [Behavioural feedback loop - redessiné : de Dear et al., 1997b]

► Actions Physiologiques

L'adaptation physiologique peut être décomposée en deux sous catégories :

- l'adaptation génétique : changements provenant de l'héritage génétique d'un individu ou d'un groupe de personnes.

- l'acclimatation : changements du système physiologique de thermorégulation pendant des jours ou des semaines en réponse à un ou une combinaison de facteurs de stress thermique antérieure.

L'acclimatation est une boucle de rétroaction inconsciente atténuée par le système nerveux ; elle affecte directement les températures de consigne de la thermorégulation (cf. *Figure 1.10*).

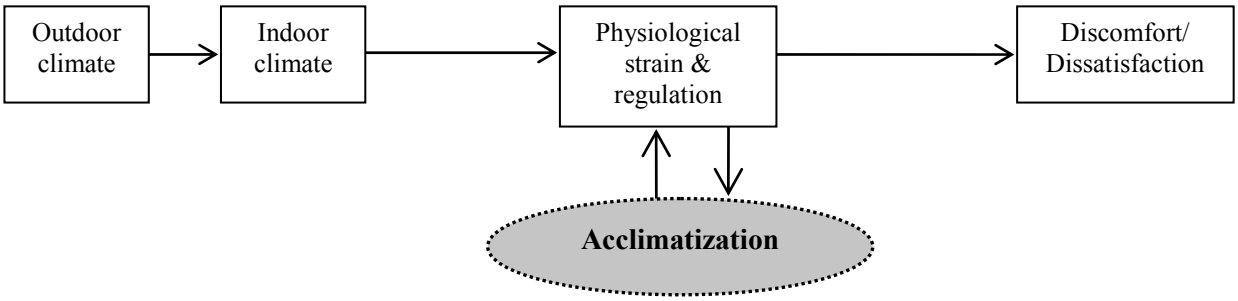


Figure 1.10 : Boucle de rétroaction physiologique [Physiological feedback loop - de Dear et al., 1997b]

► Actions Psychologiques

Cette catégorie regroupe les effets de l'accoutumance et de l'espérance, variables cognitives et culturelles, qui changent la perception d'un individu. Parfois l'adaptation perceptuelle est décrite en psychophysique comme une exposition à un stimulus répété plusieurs fois qui diminue l'importance de la réponse évoquée [De Dear et Brager, 1998]. Bien qu'il soit le moins étudié des trois mécanismes adaptifs, l'adaptation psychologique pourrait réellement jouer le rôle le plus significatif en expliquant les différences entre les réponses thermiques observées et prévues.

Dans la boucle de rétroaction, l'adaptation conceptuelle d'espérance et d'accoutumance est influencée par une expérience thermique présente ou passée du climat intérieur et extérieur. Comme décrit sur la *Figure 1.11*, ceci affecte directement notre sensation thermique et les évaluations cognitives de l'acceptabilité thermique.

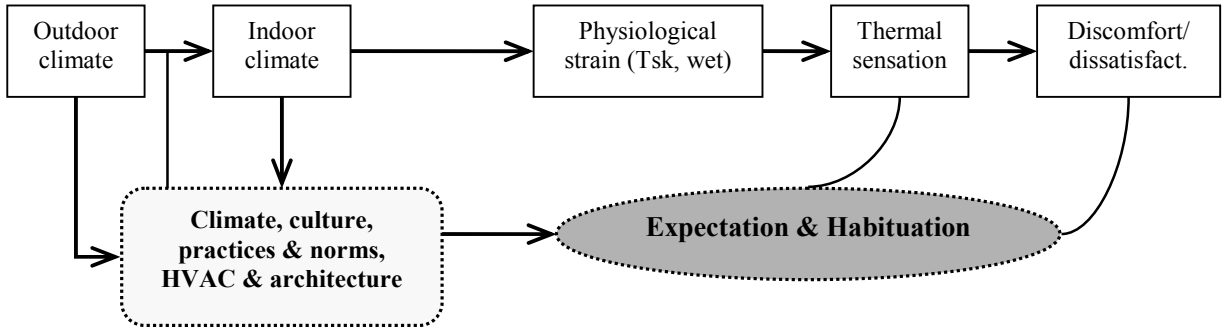


Figure 1.11 : Boucle de rétroaction psychologique [Psychological feedback loop - de Dear et al., 1997b]

(b) La théorie de Humphreys

En 1978, Humphreys a suggéré que la température de confort désirée dans les bâtiments naturellement ventilés pouvait être exprimée par une équation [Humphreys, 1978a] :

$$T_C = aText + b$$

T_C est la température de confort (°C) et peut être décrite comme la température à laquelle le sujet sera confortable (ou neutre) sur l'échelle de confort ou bien la température à laquelle le plus grand nombre de sujets seront au confort. $Text$ est la température extérieure et a, b sont des constantes déterminées expérimentalement. La température extérieure mensuelle moyenne est employée comme représentative de la température extérieure.

La *Figure 1.12* montre les résultats quand la température de confort à l'intérieur d'un local a été tracée en fonction de la température extérieure moyenne mensuelle. On voit une division claire entre les bâtiments en fonctionnement libre (sans climatisation) et ceux qui étaient conditionnés. Pour les bâtiments naturellement ventilés la relation est linéaire tandis que, pour les bâtiments conditionnés, elle est plus complexe. La relation linéaire trouvée dans les bâtiments naturellement ventilés a été également confirmée par De Dear et al. (1997b). La différence est probablement due à l'accumulation des légers effets provoqués par une grande variété d'actions adaptatives qui ensemble, donnent une grande variété de conditions de confort.

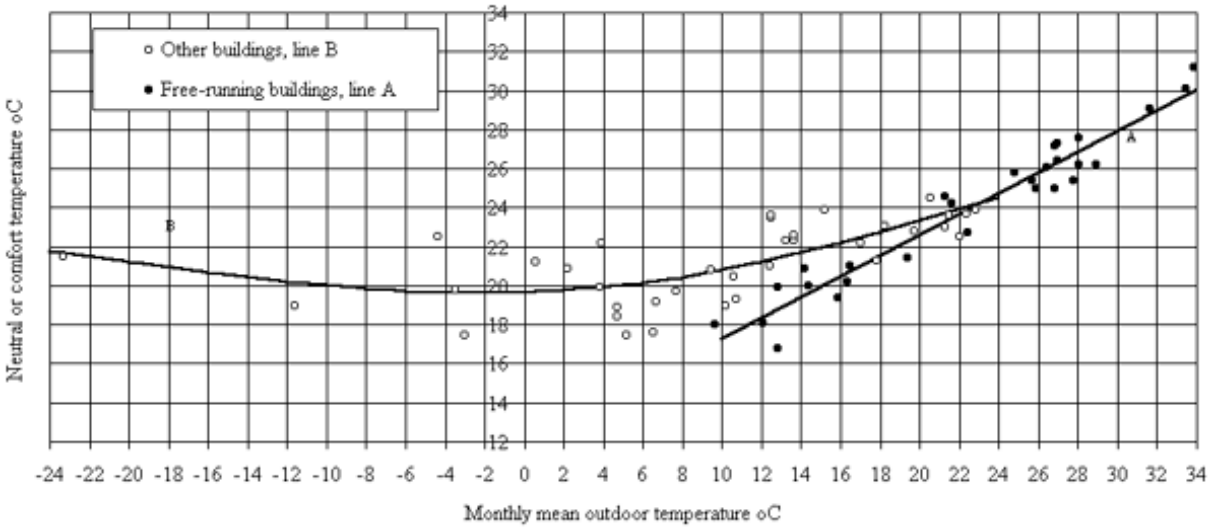


Figure 1.12 : Variation de la température du confort en fonction de la température extérieure pour les bâtiments conditionnées et les bâtiments naturellement ventilés (points foncés) [Humphreys, 1978a]

1.4.2 - Les études sur terrain

Dans les années 80, l'ASHRAE a lancé une série d'études de confort thermique sur le terrain dans des bâtiments dans quatre zones climatiques différentes. Dans le premier projet RP-462 [Schiller et al., 1988], un protocole standard pour les études sur le terrain a été établi, qui consistait

à mettre en place une méthode universelle pour effectuer les travaux expérimentaux sur le terrain. Après consultation avec plusieurs équipes, les données obtenues ont été classées par rapport aux techniques et outils utilisés pour réaliser ces expériences, trois catégories ont été formées :

- *Classe I* : Les études sur terrain utilisant toutes les procédures et les sondes comme définies par les réglementations d'ASHRAE/ANSI 55 (1992) et ISO 7730 (1994).
- *Classe II* : Les études où les mesures des variables environnementales T_a, T_{mrt}, v, RH, Icl, etc., nécessaires au calcul des indices de confort SET* ou PMV/PPD et les évaluations subjectives ont été enregistrées.
- *Classe III* : Les expériences basées sur les mesures simples, par exemple la température de l'air intérieur et l'humidité. Tous les travaux faits par Humphreys et Auliciems ont été rangés dans cette catégorie.

En 1995, le projet RP-884 d'ASHRAE a commencé à rassembler des données brutes recueillies dans le monde entier, qui ont suivi le protocole standard. La base de données mondiale contient des données d'Angleterre, du Pays de Galles, de Bangkok, de Californie, du Michigan, de Montréal, d'Ottawa, de six villes en Australie, de cinq villes du Pakistan, d'Athènes et de Singapour. Cette base de données est disponible et accessible à tous [De Dear, 2002].

Ensuite, en 1997, le projet de '**Smarts Controls and Thermal Comfort**' (SCATs) a été coordonné par l'université d'Oxford Brookes et financé par l'Union Européenne. Ce projet était basé sur la notion de confort adaptatif, avec le but d'installer des systèmes de contrôles fonctionnant sur ce principe dans les bureaux européens. Ce projet s'est terminé en décembre 2000 et a abouti aux conclusions ci-après [McCartney et Nicol, 2001 ; 2002].

(a) Régulation de SCATs

La théorie d'une température de consigne variable vient des études faites par Humphreys (1978b) sur l'habillement des écoliers. L'habillement porté chaque jour a été relié à une moyenne mobile des températures quotidiennes pondérée exponentiellement (*Exponential Weighted Moving Average - EWMA*). Dans ce type de moyenne mobile[1] la valeur la plus récente de la température a poids le plus grand, alors que chaque valeur précédente a un poids qui diminue selon une progression géométrique liée au temps qui s'est écoulé. La moyenne mobile a deux propriétés reliées. Elle lisse la série des températures et elle traduit le changement qui est en train de se produire. Supposant que les changements de température de confort suivent le même genre de série chronologique, donc, l'EWMA est employé pour représenter la température à laquelle les sujets sont sensibles.

Nicol et Raja (1996) ont employé la même théorie pour les études sur le terrain conduites pour des bâtiments à Oxford. La valeur théorique de la température moyenne mobile (running mean temperature), T_{rm}, d'un jour particulier n peut être exprimée comme :

$$T_{rm(n)} = (1-c)\left\{ T_{od,moy(n-1)} + cT_{od,moy(n-2)} + c^2 T_{od,moy(n-3)} + ...\right\}$$

$T_{od,moy(n-1)}$ est la température moyenne extérieure du jour précédent (n-1) et c est une constante ($0 \leq c \leq 1$). Une solution pour une série chronologique infinie (*éq. dessus*) n'est pas pratique, par conséquent la valeur quotidienne de T_{rm} été calculée comme le suggère Wilkins (1995) :

$$T_{rm(n)} = cT_{rm(n-1)} + (1-c)T_{od,moy_{(n-1)}}$$

Il convient de noter que la valeur de $T_{od,moy(n)}$ n'est pas incluse dans la formule parce qu'elle n'est connue qu'à la fin du jour n. En outre, c définit la vitesse à laquelle la moyenne mobile correspond à la température extérieure. Une grande valeur de c implique un grand poids pour des valeurs de $T_{od,moy}$ dans le passé. Un changement de $T_{od,moy}$ donnera une valeur de T_{rm} qui tend vers

[1] *La moyenne mobile est semblable aux calculs d'affaiblissement de demi-vie dans la physique nucléaire.*

la nouvelle valeur de $T_{od,moy}$ avec la demi-vie donnée théoriquement par *0.69/ (1-c)*. Pour $c = 0$, $T_{rm(n)} = T_{od,moy(n-1)}$ et si $c = 1$, $T_{rm(n)} = T_{rm(n-1)}$.

Valeurs théoriques de demi-vie de c

c	0.95	0.90	0.80	0.65	0.35	0.05
Demi-vie (jours)	13.8	6.9	3.5	2.0	1.0	0.7

Dans les études de Nicol et Raja (1996), la valeur de c est prise égale à 0.8, ce qui donne une demi-vie de 3.5 jours (ce qui veut dire que le temps mis par des personnes pour réagir à un changement de temps extérieur est d'environ la moitié d'une semaine).

En conclusion, la température de confort intérieur, T_C, basé sur la T_{rm} est exprimée par l'équation suivante :

$$T_C = dT_{rm(n)} + e$$

Les auteurs ont remarqué qu'en appliquant l'équation au dessus sans modification, la température intérieure serait trop basse quand la température extérieure est très froide. Par conséquent, certaines limites ont été imposées. Alors, la forme finale d'équation (1.7) est :

$$T_C = dT_{rm(n)} + e \qquad T_{rm} > f°C$$

$$T_C = g \qquad T_{rm} < f°C$$

où d, e, f et g sont des constantes. Ces constantes sont empiriques et proviennent d'une analyse des données d'étude sur le terrain [McCartney et Nicol, 2002]. L'utilisation de la température d'EWMA a été basée sur le bon sens et non pas sur l'analyse détaillée de série temporelle [Nicol et Raja, 1996].

Une critique de la théorie de confort adaptatif était sa complexité et la difficulté à l'appliquer aux bâtiments. En réponse à cette critique, *l'Algorithme de Commande Adaptative (Adaptative Control Algorithm - ACA)* a été développé lors du projet SCATs. Le but de l'ACA était de fournir aux concepteurs de bâtiments une méthode simple de commande des températures internes en utilisant les principes de la théorie de confort adaptatif.

Au lieu de maintenir une température constante toute l'année ou deux températures saisonnières de consigne, l'ACA propose une température de consigne intérieure variable en fonction de la température extérieure basée sur la température de confort. Pour les pays participants (France, Grèce, Portugal, Suède et Angleterre) des températures de consignes ont été déterminées en utilisant la valeur de c=0.8. On peut trouver dans le *Tableau 1.3* les différentes valeurs obtenues [Nicol et McCartney, 2000].

Level 1 indique que l'étude est faite par une méthode transverse où un grand groupe de personnes a été interrogé périodiquement, par exemple une fois par mois.

Level 2 donne les résultats obtenus par méthode longitudinale, c'est-à-dire qu'un petit groupe de personnes interrogées a été suivi pendant une durée de quelques mois. Par exemple, elles répondent au questionnaire quatre fois par jour, pendant 3 à 12 mois [McCartney et Nicol, 2002].

L'ACA a été appliqué pour tous les bâtiments étudiés et donnant la température de confort :

$$T_c = 22.88\ °C \qquad T_{rm} < 10°C$$

$$T_c = (0.302T_{rm} + 19.39)\ °C \qquad T_{rm} > 10°C$$

	Level 1		Level 2	
	Trm < 10	**Trm > 10**	**Trm < 10**	**Trm > 10**
FRANCE	0.049T+22.58	0.206T+21.42	0.041T+21.29	0.188T+20.10
GRECE	----	0.205T+21.69	----	0.244T+18.89
PORTUGAL	0.381T+18.12	----	0.45T+16.37	----
SUEDE	0.051T+22.83	----	0.061T+23.03	0.084T+22.24
ANGLETERRE	0.104T+22.58	0.168T+21.63	0.047T+21.10	0.188T+19.55
TOUS	**22.88**	**0.302T+19.39**	**21.61**	**0.267T+18.88**

Tableau 1.3: ACA pour chaque pays européen étudié

On obtient une courbe comme le montre la *Figure 1.13*.

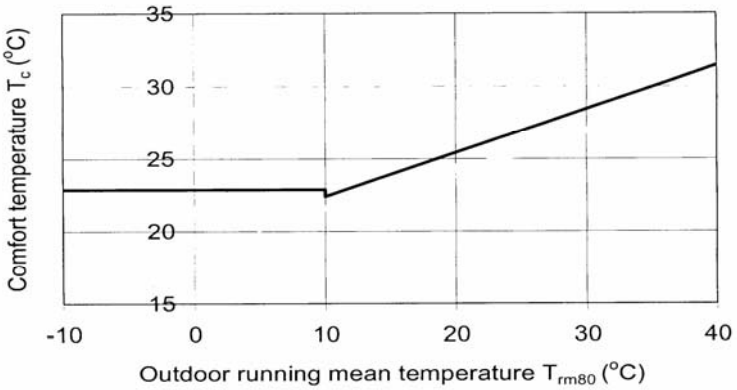


Figure 1.13 : Températures intérieures recommandées en fonction de Trm [Nicol et McCartney, 2000]

(b) Effets Vestimentaires

D'après plusieurs études [Humphreys, 1978a], le temps mis par les gens pour adapter leur habillement à leur environnement varie d'un jour à moins d'un mois. Humphreys a proposé la relation suivante entre l'isolation des vêtements Icl et la température extérieure :

$$Icl_n = a + b * T_{od,moy} + c * Icl_{n-1} \pm e$$

Icl_n est la valeur au jours n de l'habillement (isolation vestimentaire en clo ou nombre de couches des vêtements), Icl_{n-1} est la valeur de l'habillement pour le jour précédent (n-1), $T_{od,moy}$ est la température du jour n, e est une limite d'erreur et *a*, *b*, *c* sont des constantes qui ont été estimées par des observations. L'équation indique donc que ce qui est porté aujourd'hui dépend de la température extérieure du jour et de celle du jour précédent.

D'autres corrélations analytiques pour les isolations thermiques des vêtements ont été proposées. Pour tous les bâtiments européens, Icl a été lié à T_{rm} (r^2=0.20), comme le montre le *Tableau 1.4* [Nicol et McCartney, 2000] :

	Level 1	Level 2
FRANCE	Icl=0.979-0.0197.Trm	Icl=0.816-0.0136.Trm
GRECE	Icl=1.072-0.0164.Trm	Icl=0.844-0.0130.Trm
PORTUGAL	Icl=1.376-0.0406.Trm	Icl=1.201-0.0346.Trm
SUEDE	Icl=0.927-0.0157.Trm	Icl=0.769-0.0100.Trm
ANGLETERRE	Icl=0.854-0.0125.Trm	Icl=0.730-0.00972.Trm
TOUS	**Icl=0.950-0.0145Trm (R^2=0.200)**	**Icl=0.848-0.0136Trm (R^2=0.208)**

Tableau 1.4 : Equation vestimentaires pour chaque pays européen étudié

Le comportement vestimentaire, ou plutôt la quantité de vêtements portée par des individus dans les bureaux et dans les centres commerciaux a été étudié par Morgan et De Dear (2003). Le choix des vêtements portés dépend du sexe, du type de travail, et de l'existence ou non d'un code d'habillement, de la température intérieure et finalement des conditions météorologiques.

1.5 - Régulation des bâtiments

La consommation énergétique d'un bâtiment est fortement liée au niveau de confort désiré à l'intérieur. La température voulue est maintenue par le système de régulation en fonction de la chaleur perdue à travers les parois et par ventilation. Ces déperditions dépendent de la différence entre les températures intérieure et extérieure. La sensibilité de l'occupant au climat intérieur a également des conséquences sur la façon dont il le commande plus ou moins étroitement, ce qui a des répercussions énergétiques. Le succès d'un bâtiment dépend du confort ou de l'inconfort de l'environnement intérieur, ce qui est important pour les habitants. Les mesures prises par les occupants pour reconstituer leur confort peuvent avoir un coût énergétique élevé, par exemple l'ouverture d'une fenêtre quand le chauffage est en marche peut être une manière coûteuse de refroidir un bâtiment surchauffé [Nicol, 2003].

1.5.1 - Types des régulateurs

En général, on peut réguler la température interne d'un bâtiment de différentes manières. Selon le mode, la température de consigne peut être fixe ou variable.

(a) Température de consigne fixe

Les indices de confort (PMV/PPD) sont donnés par les normes [ANSI/ASHRAE (1992) et ISO 7730 (1994)] et prescrivent des températures intérieures présentant une légère différence saisonnière pour s'adapter aux différences d'habillement, estival et hivernal. Ces normes sont supposées être universelles et applicables à tous les types de bâtiments, zones de climat et populations. Ce n'est naturellement pas possible, parce qu'il y a une exagération du besoin de climatisation pour les pays chauds [De Dear et Brager, 1998]. Des travaux de critiques de ces normes sont en cours [Cardiergues, 2003] ; par ailleurs, ces recommandations sont parfois différentes de celles que l'on peut trouver dans les réglementations thermiques.

On a constaté une insatisfaction croissante liée aux températures statiques de confort, ainsi qu'une mauvaise gestion des ressources d'énergie, ce qui conduit à créer un intérêt pour développer une régulation de température variable.

(b) Température de consigne variable

La recherche bibliographique montre que la régulation variable peut être obtenue par plusieurs méthodes : (1) en utilisant un contrôleur 'fuzzy' (flou), (2) en utilisant l'algorithme de confort adaptatif comme il est développé dans des projets de SCATs ou (3) en développant l'adaptation comportementale.

■ **Logique Floue :** Le contrôleur par logique floue a été développé pour les deux types de bâtiments - naturellement ventilés [Eftekhari et Marjanovic, 2003] et conditionnés [Fraisse et al., 1997, 1999 ; Dounis et Manolakis, 2001]. Il est basé sur la théorie rigoureuse de sous-ensembles flous, qui constitue une prolongation de l'algèbre classique (logique binaire). Dans la logique classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble (c'est-à-dire 0 ou 1). La théorie floue de sous-ensemble permet à l'élément d'être entre 0 et 1. On peut facilement passer d'un sous-ensemble à un autre sous-ensemble. Par exemple, une température de consigne de 20.5°C peut être dans les sous-ensembles chaud ou froid ; on peut définir le placement de cette température à 70 % dans le sous-ensemble chaud et à 30 % dans le sous-ensemble froid.

La *Figure 1.14* montre l'exemple d'un système qui fonctionne avec cette logique. La tâche de la première partie de l'interface de 'fuzzification' est de convertir les mesures expérimentales en variables floues. Ensuite, le régulateur prend la décision de mettre en route ou pas (ON/OFF) les systèmes (chauffage, climatisation ou ventilateur). Enfin, l'interface de 'defuzzication' utilise le signal pour la mise en route des fonctions désirées. L'avantage de la logique floue se situe dans sa capacité de reproduire les comportements humains.

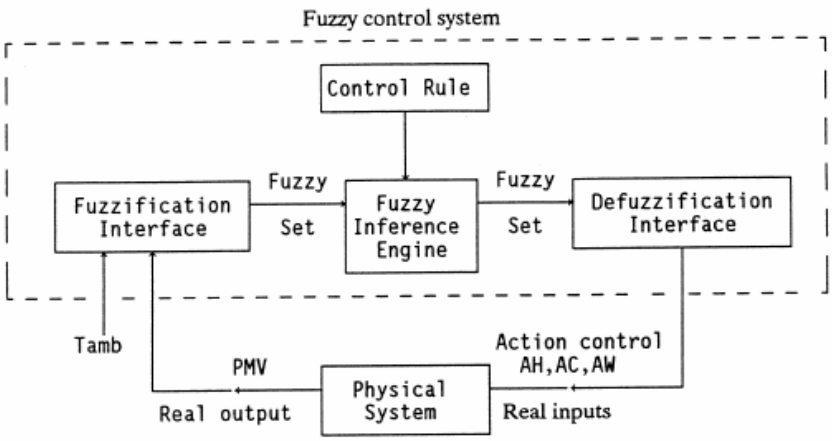


Figure 1.14 : Exemple d'une système fonctionnant sur la principe de logique floue [Dounis et Manolakis, 2001]

Les nouvelles tendances sont des contrôleurs qui emploient l'intelligence artificielle neuronale (ANN) avec logique floue [Guillemin et Morel, 2002].

■ **SCATs :** Le projet de SCATs a développé un algorithme adaptatif (ACA) pour commander la température de consigne intérieure dans les bureaux. L'ACA produit une température de consigne intérieure variable en fonction de la température extérieure. Pour la période hivernale (cf. *Figure 1.13*), on constate une température de consigne à peu près constante si la température de l'air extérieure (T_{ext}) est inférieure à 10°C. La température de consigne varie de manière linéaire quand T_{ext} est supérieure à 10°C [Nicol et McCartney, 2000].

1.6 - Systèmes de HVAC locaux

Plusieurs études montrent le potentiel d'économies d'énergie que l'on peut réaliser par une baisse de la température d'air à l'intérieur d'un bâtiment et la possibilité pour les habitants d'atteindre leur température de confort grâce à un système de chauffage local [Nelson et Langness, 1992 ; Sørlie et al., 1993 ; Wyon, 1996 ; Melikov et al., 1998 ; Quintela et al., 2000].

Une température de consigne unique ne convient pas à tout le monde, car il existe des différences entre les individus. Souvent ces différences sont liées à l'état physiologique et ou psychologique des gens ou à des différences d'habillement, d'activité, mais aussi aux préférences diverses de la température et vitesse d'air, ou à cause du temps nécessaire au corps pour réagir aux changements de température ambiante, etc. [Melikov et al., 1998]. Les différences dans les préférences de température d'air peuvent aller jusqu'à 10°C [Grivel et Candas, 1991]. L'isolation thermique des vêtements des individus peut changer de 0.4 à 1.2 clo et encore plus dans les situations hivernales, et l'activité métabolique peut s'étendre entre 1 et 2 met [ASHRAE, 1997]. Par conséquent, il n'est pas étonnant de trouver un grand nombre d'occupants qui se plaignent d'inconfort local et/ou global.

La solution peut être de fournir à chaque individu les moyens de chauffer ou refroidir son corps, c'est-à-dire de produire et réguler son propre micro-environnement. Il faut noter que nous nous concentrerons seulement sur l'aspect du chauffage local pendant la saison hivernale. Il existe

plusieurs travaux sur des systèmes de ventilation personnalisés [Arens et al., 1998 ; Faulkner et al., 2002 ; Melikov, 2004], mais cela pourra faire l'objet d'une étude ultérieure.

Ces vingt dernières années, les ingénieurs HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning Systems) ont développé des systèmes de ventilation ou de chauffage personnalisés ou locaux pour compenser les différences inter-individuelles. Souvent, dans les bâtiments, les occupants ont deux causes de gêne. La première est le courant d'air : malgré les normes, on n'a pas suffisamment connaissance des limites de vitesse d'air maximales que les gens peuvent accepter dans les conditions chaudes. Le deuxième facteur est d'arriver à économiser l'énergie consommée par les systèmes de chauffage dans les conditions hivernales tout en gardant le confort des individus.

Le but d'un système de ventilation personnalisé (PV) ou d'un système de chauffage local (LHS) est de procurer des conditions optimales à proximité de l'utilisateur. Ainsi, globalement, le bâtiment peut être plus chaud ou plus froid. Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des nombreux systèmes de PV et LHS, dont certains sont en voie d'expérimentation ou d'utilisation dans les bâtiments modernes.

1.6.1 - Systèmes de ventilation personnalisée (PV) à air froid/chaud

Dans un point donné du local, la vitesse de l'air varie en permanence au cours du temps. Le courant d'air est défini comme le refroidissement local non désiré d'une partie du corps, provoqué par le mouvement d'air (ISO 7730). Il a été identifié comme un des facteurs les plus gênants dans les bureaux. La perception (gêne) du courant d'air dépend de la vitesse et de la température de l'air, du taux de la turbulence, de la direction, de la partie du corps exposé et de l'état thermique général de la personne. Une personne qui a chaud peut percevoir le mouvement d'air comme agréable, tandis que le même mouvement d'air peut être perçu comme une gêne par une personne qui a froid [Parsons, 1993].

La recherche bibliographique présente un large panel de toutes les expériences conduites, soit dans une chambre climatique, soit dans un bureau. On peut trouver des expériences faites avec un simple ventilateur ou avec un système complexe à très faible débit d'air focalisé sur le visage. Quelques exemples ont été sélectionnés ci-dessous.

Exemples de systèmes PV existants

Une équipe de Berkeley [Arens et al., 1998] a testé une gamme de températures élevées (25 à 31°C) en chambre climatique ; les participants (habillés et en activité de bureau) étaient libres d'ajuster le mouvement d'air suivant leurs préférences. Le ventilateur utilisé peut fonctionner avec trois vitesses différentes et selon deux modes : fixe ou turbulent. Les conclusions établies ont montré que, pour une vitesse d'air de 1.4 m/s, plus de 80 % des sujets à 1.2 met sont confortables jusqu'à 29°C, et, pour une activité de 1.0 met, jusqu'à 31°C.

Les réponses en sensations ont indiqué que la tête était la plus fraîche. Il y avait une différence de températures entre les parties supérieures et inférieures du corps. La partie inférieure du corps était perçue comme ayant chaud. Une ambiance intérieure qui produit une tête fraîche et des pieds chauds est préférable, mais il est souvent difficile de produire cela avec un système classique de refroidissement d'air. Le mode turbulent du ventilateur a créé une gêne liée à des causes non thermiques. Les participants ont été dérangés, leurs cheveux déplacés et ils avaient les yeux irrités. Enfin, une zone d'usage a été proposée comme une alternative au système de refroidissement global pour laquelle un individu peut contrôler le mouvement d'air.

Des efforts ont été faits pour le développement d'un système **TAC** (*Task/Ambient Conditioning*) qui crée un microenvironnement choisi par l'homme. La *Figure 1.15* montre un exemple de TAC [Akimoto et al., 2004]. La boîte de refroidissement d'air est installée sous le bureau et mélange l'air intérieur avec l'air rafraîchi ; les deux diffuseurs placés sur la table

distribuent l'air renouvelé. Il y a également un contrôleur de débit d'air entrant, un panneau radiatif et une lumière de bureau. Le système est aussi équipé d'un capteur qui arrête le TAC complètement après environ 15 min d'absence de l'individu.

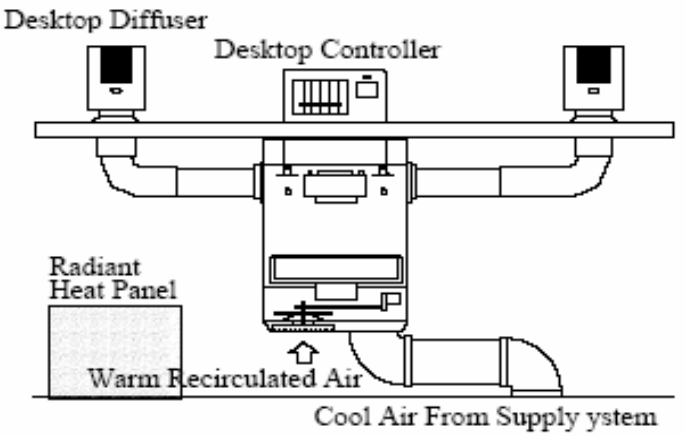


Figure 1.15 : Une exemple de Task/Ambiant Conditioning (TAC) [Akimoto et al., 2004]

Les expériences ont été faites avec 61 participants (38 hommes et 23 femmes). Tous les participants ont testé des conditions de référence, c'est-à-dire à 26°C et 50 % RH. Ensuite, la moitié est restée dans les mêmes conditions et l'autre moitié a subi de nouvelles conditions de 30°C et 50 % RH. Les questionnaires subjectifs montrent que les femmes et les hommes sont confortables avec le TAC, même à 30°C et 50 % RH. Aucun inconfort lié à la sécheresse n'a été exprimé. Akimoto et al. (2004) remarquent que les hommes ont plus ajusté le débit de l'air que les femmes. Les hommes préfèrent un débit plus élevé. L'analyse des sensations thermiques montre que les inconforts locaux disparaissent avec le TAC, mais les femmes n'ont pas été satisfaites de l'air reçu sur certaines parties du corps comme le tronc et les jambes.

Une étude a été faite récemment pour un système de ventilation intégré sur une chaise (cf. *Figure 1.16*). Les premières études ont été faites avec un mannequin thermique. Les essais ont été faits avec huit types de souffleries qui fournissent des vitesses d'air de 0.1 à 3.0 m/s. D'autres analyses ont été effectuées suivant la taille et la géométrie des souffleries. L'expérimentation est en cours pour vérifier les autres paramètres de ce système [Niu et al., 2004].

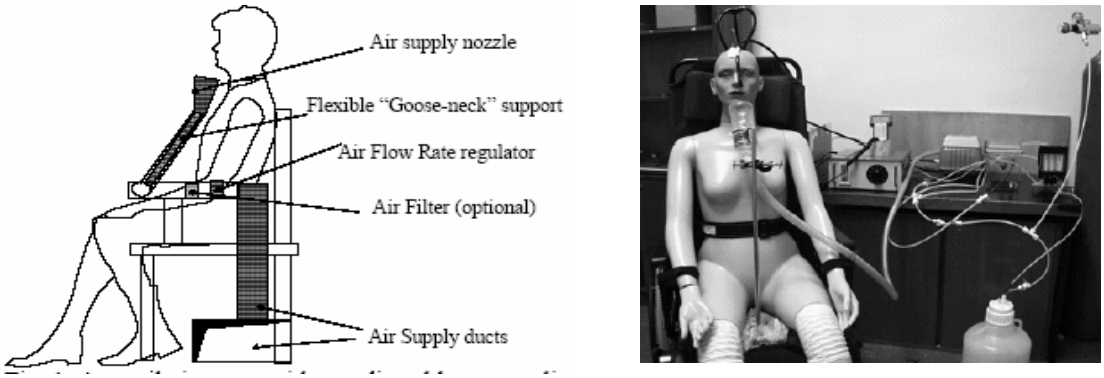


Figure 1.16 : Un système de ventilation personnalisée intégré sur une chaise [Niu et al., 2004]

Kaczmarczyk et al. (2004) ont effectué des expérimentations avec différents 'Air Terminal Device' (ATD) pour une ventilation précise locale. Avant d'utiliser les ATD avec des sujets dans un bureau (*Figure 1.17*), ils ont faits des tests avec un mannequin ; puis 30 personnes ont participé à cette expérience pour des conditions intérieures de 23°C et 26°C. La plupart des sujets parviennent à un état thermique neutre avec cet ATD. Le débit d'air est préféré sur le visage plutôt que sur l'abdomen. Globalement les conditions locales créées par ces systèmes ont été acceptables.

Figure 1.17 : Systèmes de 'ventilation personnelle' expérimentés par les participants [Kaczmarczyk et al., 2004]

1.6.2 - Systèmes de chauffages radiatifs locaux (LHS)

Un ***système de chauffage local*** *(Local Heating System – LHS)* est un système contenant plusieurs panneaux chauffants qui peuvent fonctionner individuellement ou ensemble, en association à différents niveaux de puissance. Les panneaux qui sont souvent utilisés dans les bureaux sont mis en place à proximité des occupants, c'est-à-dire au niveau des pieds ou des jambes/cuisses ou du dos. Donc, la chaleur est focalisée sur une partie seulement ou sur plusieurs parties du corps en même temps.

L'individu qui utilise un tel système peut régler la puissance des panneaux comme il veut, en fonction de son état de confort, global ou local. Ainsi, grâce au LHS il peut créer son propre microclimat pour améliorer son confort. Des études sur le terrain ont été faites soit avec des mannequins en chambre climatique, soit avec des personnes en chambre climatique ou dans des bureaux.

Exemples de LHS existants

Dans la littérature, un des premiers prototypes d'un système de chauffage local a été un panneau chauffant (1.00 m x 1.05 m) placé sous le bureau [Nelson et Langness, 1992]. Plusieurs types d'essais ont été réalisés en chambre avec 36 hommes et 60 femmes. Parmi ces sujets, personne n'a utilisé les vêtements additionnels qui avaient été prévus. Les études montrent que la température moyenne des panneaux chauffants était entre 36 - 38°C dans le cas réel. Quelques observations importantes ont été faites, notamment que les gens interviennent plusieurs fois par jour sur la consigne. Il apparaît également qu'on a tendance à augmenter la consigne du système quand la température extérieure baisse. La chaleur reçue sur les pieds n'était pas suffisante, la position des jambes et des cuisses des individus étant pliées en position assise. Ce type de bureau est utilisable avec une température d'air d'environ 19.5°C.

Sorlie et al. (1993) ont fait des expériences avec un mannequin pour établir la limite acceptable pour une température basse. Avec un panneau local de puissance 120 W, l'ambiance globale est à environ 17 - 18°C. Une suggestion pour la conception du bureau était de fermer un côté pour que la chaleur produite crée un microclimat. Une des conclusions de ce travail était, que pour les bâtiments légers, le chauffage global peut être arrêté complètement pendant la nuit, ce qui finalement rend le bâtiment plus économe.

Melikov et al. (1998) utilisent un système de chauffage local avec quatre panneaux, comme le montre la *Figure 1.18*. Les expériences ont été faites avec 18 personnes dans une chambre climatique. Les gens débutent avec un seul panneau et ajoutent les autres au cours du temps si nécessaire. Ils agissent davantage sur le panneau situé dans le dos. S'ils sont libres de créer leur propre microclimat avec la possibilité de changements vestimentaires, une température d'air

moyenne de 20°C est acceptable. Il est évident qu'une baisse de la température dépend de la surface du corps qui reçoit la chaleur et de la taille des panneaux.

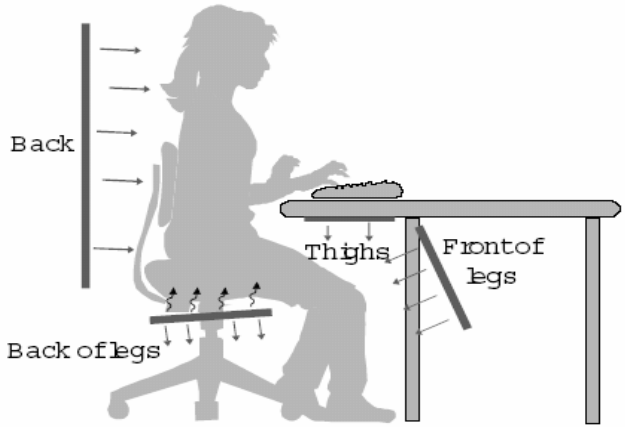


Figure 1.18 : Les positions des panneaux pour chauffage local [Melikov et al., 1998]

L'habillement est un facteur important quand le chauffage local est utilisé. La sensation de froid locale est plus souvent exprimée quand les segments sont couverts de vêtements moulants, et moins quand il y a une couche d'air isolante entre la surface de peau et l'habillement. Melikov et al. (1998) ont observé que les sujets pourront améliorer la sensation thermique locale de certaines parties du corps dans la mesure où ils modifieront leur habillement.

D'autres études faites au Portugal [Gaspar et al., 2004] proposent un LHS avec des panneaux à basse consommation d'énergie. Les essais ont été faits avec un mannequin dans une chambre climatique, et avec 18 personnes (9 femmes et 9 hommes) dans l'habitat. Trois panneaux sont placés sous le bureau en position horizontale, verticale et de chauffe-pieds (*Nous détaillerons une partie de ces résultats dans le Chapitre 3*).

Figure 1.19 : Système de chauffage local avec une chaise [Madsen, 2002]

D'autres exemples de chauffage local portent sur l'utilisation d'une chaise munie d'un panneau qui apporte de la chaleur sur le dos (*Figure 1.19*) [Madsen, 2002]. Les essais avec un mannequin montrent que ce système est efficace, car il réduit les sensations d'inconfort froid sur le dos, le cou et les épaules. En ajoutant un chauffe-pieds, on obtient un effet plus confortable. Avec ce chauffage la température du dos du mannequin augmente de 2°C et le flux sensible a été réduit de 60 W m^{-2} à 20 W m^{-2}.

Dans le projet européen '*Friendly Heating*' (EVK4-CT-2001-00067), un nouveau système de chauffage est prévu pour procurer le confort thermique aux personnes et, en même temps, éviter les risques de dégradation des objets d'art exposés dans les églises. C'est le système de chauffage local du banc ou du siège, qui fournit la chaleur seulement là où elle est nécessaire. Le prototype est installé dans une église italienne (*Figure 1.20*). Ce travail mènera également à un modèle numérique sur le système de chauffage local de banc [Neilen et al., 2004].

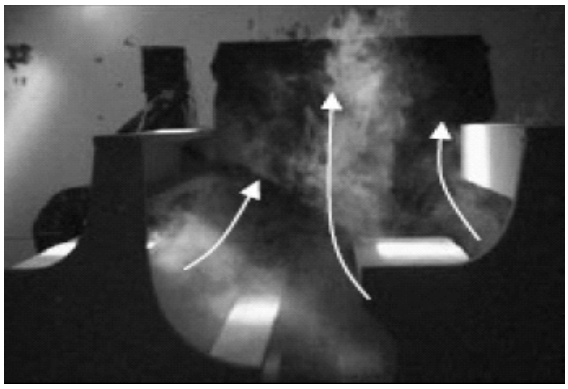


Figure 1.20 : Système de chauffage local sur des bancs dans une l'église [Neilen et al., 2004]

Les systèmes de chauffage jouent sur tous les modes de transfert thermique, mais surtout la convection et le rayonnement. La *Figure 1.21* illustre les différents modes. Le système à air forcé (*à gauche*) emploie principalement la convection pour fournir la chaleur à l'occupant. Le système chauffe l'air d'abord et ensuite l'air chauffe l'occupant. Avec un système de chauffage radiant (*à droite*), l'occupant et les parois sont chauffés d'abord et ensuite les surfaces de la pièce chauffent l'air environnant. Ces deux systèmes ont été étudiés par DeGreef et Chapman (1998).

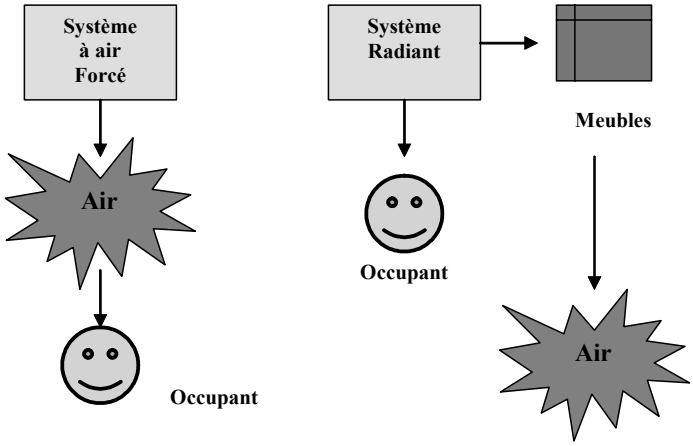


Figure 1.21: Systèmes de chauffage à air forcé et radiants [redessiné par DeGreef et Chapman, 1998]

Pour les systèmes à convection, le transfert convectif représente plus de 70 % des échanges thermiques. Avec le chauffage radiatif, l'échange de chaleur par convection représente approximativement la moitié des échanges. Les systèmes de chauffage radiatif génèrent plus d'hétérogénéités dans un bureau qu'un système qui fonctionne par convection [DeGreef et Chapman, 1998].

1.7 - Conclusion

Les conditions de confort thermique obtenues sur le terrain sont souvent différentes des valeurs prédites par les indices de confort. Un modèle statique permet d'expliquer partiellement l'adaptation en analysant les variables affectées par les ajustements (personnel : vêtements) ou les interventions environnementales (température de l'air intérieur), mais il élimine explicitement toutes les notions d'adaptation physiologique et psychologique.

En revanche, le modèle adaptatif utilise une perspective phénoménologique qui souligne comment les gens interagissent avec leur environnement. '*Si un changement a lieu produisant l'inconfort, les gens réagissent en faisant des actions pour maintenir le confort'* [Nicol, 2003]. Le confort thermique est considéré comme une partie d'un système autorégulateur connu sous le nom de 'modèle adaptatif'. Ce modèle adaptatif relie les températures ambiantes intérieures de confort aux paramètres météorologiques extérieurs [De Dear et Brager, 1998].

L'intérêt de cette approche repose sur deux raisons principales :

→ il y a des doutes sur la possibilité d'un transfert direct des résultats obtenus dans les laboratoires (chambres climatiques) à la vie réelle qui est plus complexe ; il y a des différences d'attentes, de motivations, des différences sociales, etc.,

→ d'après de nombreuses études mondiales [De Dear, 2002], les gens acceptent un ensemble divers d'environnements thermiques que les indices de laboratoire ne prévoient pas. L'utilisation de ces indices conduirait à des dépenses d'énergie plus importantes [Humphreys et Nicol, 1998].

Ainsi, on s'intéresse à cette approche adaptative pour construire un modèle qui prenne en compte des comportements simples afin de l'intégrer dans un système de simulation du bâtiment. Notre objectif est de déterminer s'il existe une part quantifiable dans le fonctionnement adaptatif : si on suppose qu'une partie du comportement des personnes est purement liée à des problèmes de thermique (flux, température) ou à des variables quantifiables ou mesurables (sensation, vêtement, etc.), par comparaison avec les résultats expérimentaux en site réel, on peut espérer évaluer la part totalement subjective. L'autre objectif est d'avoir des outils nous permettant de quantifier le coût énergétique du comportement des usagers d'un bâtiment vis-à-vis du systèmes de chauffage et de climatisation.

CHAPITRE 2
Modélisation d'un 'régulateur comportemental' global

2.1 - Introduction

Comme il est décrit dans la bibliographie, le degré de réaction des occupants au climat intérieur dépend fortement 'des possibilités adaptatives' comparées aux 'contraintes' ou aux restrictions, c'est-à-dire les moyens d'intervention qu'un bâtiment peut offrir aux occupants.

Dans un habitat, l'homme peut agir de deux façons majeures : des ajustements personnels (changement de posture, enlever/ajouter un vêtement…. indirectement liés à la consommation d'énergie) ou externes (mise en route de la climatisation ou du chauffage, ventilateur, ouvrir les fenêtres/portes/stores… liés directement à l'énergie consommée).

Le rôle d'une adaptation psychologique reste un mystère et est donc difficile à quantifier (cf. C*hapitre 1*). Nous nous sommes intéressés aux ajustements personnels et externes qui sont plus fréquents et faciles à faire quotidiennement. Ces comportements peuvent être conseillés et mis en place sans beaucoup de difficultés dans des bureaux.

L'objectif du *Chapitre 2* est d'évaluer l'effet de la régulation comportementale grâce à la création d'un modèle de régulateur qui représente partiellement l'adaptabilité de l'être humain, en considérant qu'il peut agir en fonction de ses sensations thermiques.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la construction de ce modèle simplifié de comportement humain, à la description des variables et à son intégration dans le logiciel TRNSYS pour la simulation du bâtiment. La deuxième partie présente des résultats pour les saisons estivale et hivernale. Un certain nombre d'évidences sont retrouvées, mais l'intérêt réside dans les conclusions qui sont tirées en terme de coût énergétique de l'impact de ce régulateur comportemental comparé à d'autres types de régulateurs existants.

2.2 - Régulateur Comportemental

2.2.1 - Présentation

Il est indispensable de commencer par décrire les composants qui interviennent quand on envisage de réguler la température interne d'un bâtiment (*Figure 2.1*) ; chaque variable, son importance, l'effet qu'elle peut avoir sur l'homme et la manière dont il peut agir sur celle-ci sont discutées ci-dessous.

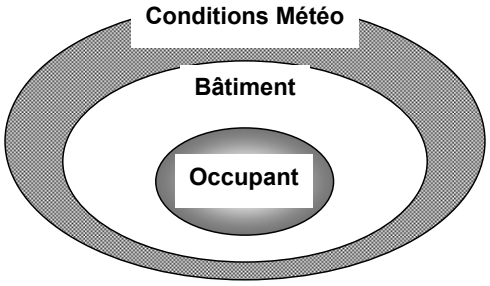


Figure 2.1 : Principales variables du problème

(a) Météo

Le climat joue un rôle important sur la culture et les attitudes thermiques des personnes et aussi sur l'architecture des bâtiments. Il y a de nombreuses façons par lesquelles le climat influence les gens et celles-ci jouent un rôle cumulatif dans leur réponse au climat intérieur [Nicol, 2000; Humphreys, 1978a], comme il a été constaté lors des observations faites en conditions réelles [de Dear et al., 1997b].

(b) Bâtiment

Les caractéristiques du bâtiment influent de façon essentielle sur les conditions intérieures.

- L'enveloppe du bâtiment modifie la transmission des conditions météorologiques selon sa masse et son isolation. Elle ne peut pas être contrôlée, mais le choix de l'enveloppe conditionne les besoins énergétiques et le comportement thermique au cours du temps.
- La transmission directe du rayonnement solaire à travers les fenêtres peut être contrôlée par l'utilisation de stores, rideaux ou volets.
- Les entrées d'air extérieur par les portes et les fenêtres, ou par la ventilation, peuvent être contrôlées de diverses façons.

Les variations de la température intérieure des bâtiments sont retardées par rapport à celles de la température extérieure en fonction des caractéristiques physiques des bâtiments. La température intérieure moyenne répondra à un changement d'ensoleillement et de température extérieure sur une certaine période de temps. L'amplitude des oscillations de température autour de sa valeur moyenne est également affectée. Ainsi, le bâtiment lourd (forte inertie) avec de petites fenêtres répondra généralement plus lentement et les amplitudes d'oscillation diurne seront plus faibles que celle d'un bâtiment léger avec des grandes fenêtres.

En été, dans les bâtiments naturellement ventilés, le contrôle d'ambiance thermique est possible s'il y a des moyens disponibles, par exemple des fenêtres ouvrables, des stores, ou l'intensité d'éclairage. La variation du taux de ventilation peut réduire l'utilisation d'énergie pour la climatisation pendant l'été.

(c) Occupant

Les gens tendent à passer la plupart de leur journée à l'intérieur, donc il est évident que le bâtiment et les contrôles mis à leur disposition jouent un rôle important. Une étude conduite au Japon [Iwashita et Akasaka, 1997] a prouvé que les occupants des habitats sans climatisation donnent un vote thermique 'pas très chaud' ou 'chaud' et leur comportement indique plus de tolérance à la chaleur. Par exemple, s'ils peuvent employer une ventilation naturelle par l'ouverture des fenêtres, leur température préférée en été est plus haute que la température de confort prévue par l'équation de Fanger.

Donc, il est évident que dans le cas d'un bureau, un occupant qui préfère déclencher une climatisation consomme plus d'énergie que celui qui préfère ouvrir les fenêtres/portes. Mais la question intéressante soulevée est : 'quelles sont les raisons qui conduisent les personnes à adopter différents comportements pour se rafraîchir ?' Les études dans ce domaine sont loin d'aboutir et, par conséquent, il n'est pas envisageable de modéliser actuellement les raisons d'ordre psychosociologiques.

2.2.2 - Principe de fonctionnement du modèle

Il n'est pas envisageable de prendre en compte tous les phénomènes et types de réactions comportementales. Dans un premier temps, nous avons décidé de simplifier le nombre de variables : l'homme et sa déclaration de confort seront donc représentés par les équations du PMV.

La façon dont l'individu agit sur son climat dépend de son confort et des possibilités d'intervention ; par conséquent en fonction du vote de confort, le sujet va interagir sur les autres composants du système, qui seront :

- modification de sa tenue vestimentaire (Icl),
- modification de la température de consigne du régulateur (T_{reg}) de température intérieure.

Ces '*réactions comportementales*' font l'objet du modèle de régulateur comportemental global (GBR - Global Behavioural Regulator). La *Figure 2.2* représente les connections qui existent entre les divers éléments. Finalement, les deux variables à analyser sont donc la consommation énergétique du bâtiment et le confort de l'occupant afin de déterminer l'effet de la prise en compte du comportement. Dans cette étude, on se concentre sur les deux changements décrits précédemment : Icl et T_{reg} qui peuvent facilement être contrôlées.

- **L'ajustement de la tenue vestimentaire**, est peut-être le plus important de tous les ajustements de confort disponibles pour les occupants. Chacun d'eux a une température de confort différente de celle d'un autre parce qu'ils portent des vêtements différents. La vitesse d'évolution avec laquelle la température de confort peut changer, dépend de la rapidité avec laquelle les gens adoptent des vêtements appropriés.
- **L'ajustement de la température de consigne** : comme cela a déjà été remarqué, les modifications de la température de consigne du chauffage et de la climatisation modifient la consommation d'énergie. Il peut donc être intéressant de voir, par rapport à un bâtiment non climatisé, les changements de confort dans un bâtiment climatisé (dans ce cas, le climat intérieur est partiellement découplé du climat extérieur).

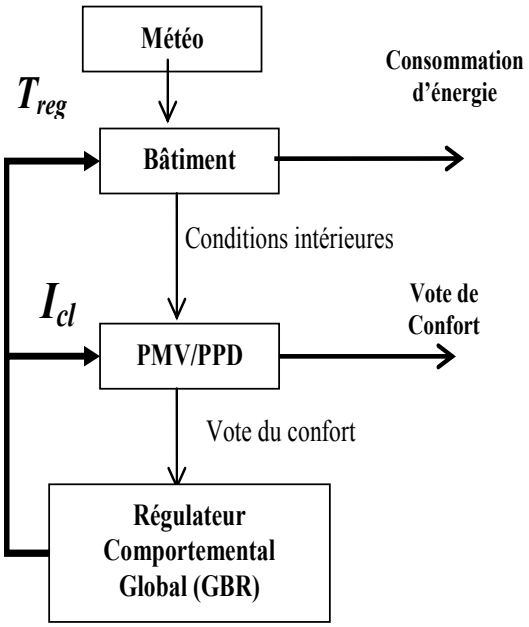


Figure 2.2 : Variables qui interviennent sur la régulation du climat intérieur d'un bâtiment

Le point de départ pour définir des niveaux de confort est basé sur la norme ISO 7730. La valeur recommandée pour un confort optimal est le PPD ≤ 10 %, ce qui entraîne des valeurs de -0.5 < PMV < +0.5. En raison de variations physiologiques, les gens évaluent le climat de différentes manières ; c'est pourquoi, même avec un PMV égal à zéro, 5 % d'une population ont (très) chaud ou (très) froid ; 40 % se trouvent légèrement tiède ou froid et seulement 55 % des gens décident zéro (neutre). Cette 'échelle neutre' représente une différence de température opérative de 4 – 5°C [Van der Linden et al., 2002].

On suppose qu'une variation du PMV entre -0.5 et +0.5 ne cause pas de problème d'inconfort, mais pour GBR on a séparé la zone neutre en deux :

- Le PMV entre -0.2 to +0.2 représente une zone de confort où aucun changement de vêtements et/ou température de consigne n'est permis.
- Si les valeurs de PMV sont comprises entre -0.2 à -0.5 ou entre +0.2 à +0.5, des petits changements d'habillement (± 0.1 clo en hiver ou en été) ou de température de consigne de la régulation ±0.5°C sont possibles (*Figure 2.3*). Les petits ajustements des vêtements correspondent à desserrer la cravate, relever les manches, enlever une écharpe, etc.

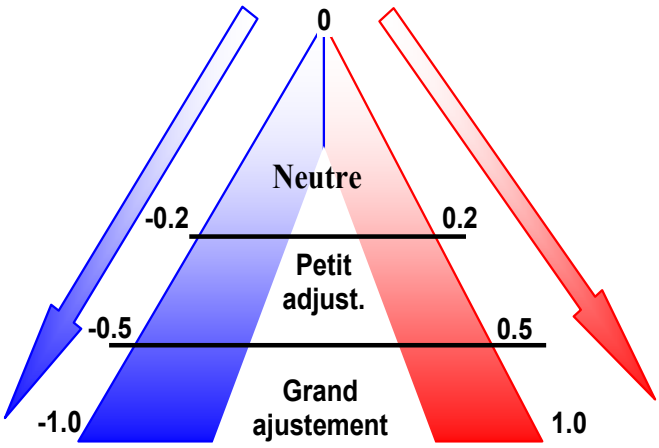


Figure 2.3 : Découpage de l'échelle du PMV pour les petits et grands ajustements vestimentaires et régulations

Quand les valeurs de PMV sont au-dessus de -0.5 ou +0.5, de plus grands ajustements sont admis ; par exemple, un vêtement entier peut être enlevé ou ajouté (±0.25 clo en hiver ou ±0.20 clo en été) ou la température de consigne peut être augmentée/diminuée de ±1.5°C.

Plusieurs modes de fonctionnement sont possibles pour prendre en compte les différents comportements humains. Les modes que l'on a choisis sont :

1. V : ajustements de vêtements seulement.
2. T : ajustements de température de consigne seulement.
3. V-T : en hiver, l'occupant peut ajouter des vêtements s'il a froid, avant de toucher le thermostat, et lorsqu'il a chaud, il baisse d'abord le thermostat et puis change ses vêtements ; en été, l'occupant enlève ses vêtements quand il a chaud avant de mettre la climatisation en route et, quand il a froid, il augmente la température de consigne et change ses vêtements.
4. T-V : identique au mode 3, mais ajustement d'abord du thermostat et puis celui des vêtements.
5. VT ou TV : il peut réagir sur deux ajustements au même moment.

Dans cette étude, l'accent sera mis sur le *mode 3*. Cette décision a été prise après plusieurs simulations dans les divers modes. En fait, l'occupant est considéré comme quelqu'un qui est conscient de ses actions. Ainsi, ce mode reste plus économe que les autres au niveau énergétique. Au début de chaque journée, l'isolation vestimentaire et la température de consigne peuvent être initialisées à leurs valeurs standards ($I_{cl,std}$ et $T_{reg,std}$), c'est-à-dire en conditions hivernales 1.0 clo et 19°C et en conditions estivales 0.5 clo et 26°C. Cette option sera nommée *"RESET"* par la suite.

Par ailleurs, des limites hautes (Clmax, $Tmax_2$, etc.) et basses ($Clmin_2$, Tmin, etc.) ont été fixées pour ces deux variables (*Figure 2.4*). L'intérêt de travailler avec ces limites est de mieux modéliser le comportement varié lié aux ajustements imposés. Ainsi, on peut espérer trouver des valeurs différentes de T_{reg} et I_{cl} pour chaque jour. Au lieu d'une valeur standard de I_{cl} en début de journée, un I_{cl} variable en fonction de T_{rm} (cf. *Chapitre I*) sera également testé.

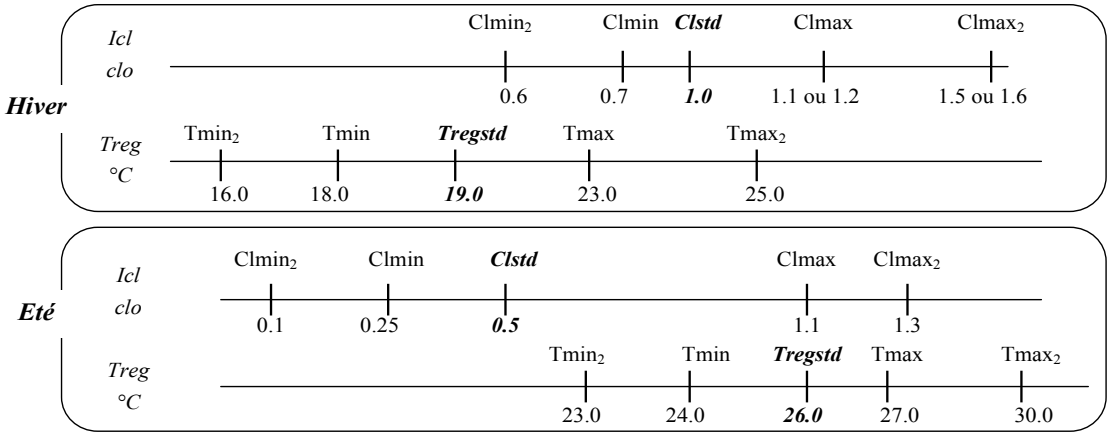


Figure 2.4 : Limites de vêtement (Icl) et de température de consigne (Treg) pour le régulateur GBR

Quelques exemples pour présenter le fonctionnement lié à ces limites :

- *Situation hivernale :* en début de simulation, le sujet est dans les conditions standards : $I_{cl,std}$ = 1.0 clo ; $T_{reg,std}$ = 19.0°C.

temps	sensation	A	B	C
t	Il a froid	**Ajout d'un pull + 0.25 clo** Icl → 1.25 clo. *Clmax est dépassé,*	**Petit ajustement + 0.1 clo** Icl→ 1.1 clo	**Petit ajustement + 0.1 clo** Icl→ 1.1 clo
t+dt	Il continue d'avoir froid	*il ne peut plus ajouter Icl.* **Augmentation de Treg**	**Ajout d'un pull +0.25 clo** Icl→ 1.35 clo. *Clmax est dépassé*	**Petit ajustement + 0.1 clo** Icl→ 1.2 clo *Clmax est dépassé*
t +2dt	Toujours froid	**Augmentation de Treg**	*il ne peut plus ajouter Icl.* **Augmentation de Treg**	*il ne peut plus ajouter Icl.* **Augmentation de Treg**

- *Situation estivale : en début de simulation, le sujet est dans les conditions standards : $I_{cl,std}$ = 0.5 clo ; $T_{reg,std}$ = 26.0°C.*

temps	sensation	A	B	C
t	Il a chaud	**Enlève une chemise -0.2 clo** Icl → 0.3 clo.	**Petit ajustement - 0.1 clo** Icl→ 0.4 clo	**Petit ajustement - 0.1 clo** Icl→ 0.4 clo
t+dt	Il continue d'avoir chaud	Autre grand ajust. **-0.2 clo** Icl → 0.1 clo. *Clmin2 est dépassé*	**Enlève une chemise -0.2 clo** Icl→ 0.2 clo. *Clmin est dépassé*	**Petit ajustement - 0.1 clo** Icl→ 0.3 clo
t +2dt	Toujours chaud	*il ne peut plus enlever de vêt.* **Baisse de Treg**	*il ne peut plus enlever de vêt.* **Baisse de Treg**	**Petit ajustement - 0.1 clo** Icl→ 0.2 clo *Clmin est dépassé*

2.2.3 - Intégration dans le système de simulation

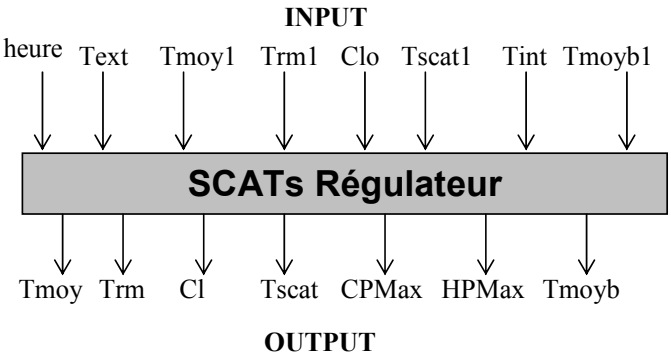
Pour la simulation de l'ensemble, nous avons travaillé avec le logiciel TRNSYS (*TRansient simulation SYStem*) (2000), qui permet la simulation des systèmes thermiques en régime dynamique. Sa structure modulaire permet d'ajouter facilement un élément manquant pour réaliser la simulation de l'ensemble souhaité. Ainsi, tous les éléments donnés sur la *Figure 2.2* font partie de la bibliothèque des modules existants auxquels nous avons ajouté le module représentant le GBR. TRNSYS gère les couplages et assure la résolution numérique.

Dans la nomenclature de TRNSYS, les *paramètres* sont constants pour toute la simulation, les *inputs* ou entrées peuvent varier et sont en général calculées par d'autres modules. Enfin les *outputs* ou sorties sont le résultat du module et peuvent être connectées en entrée d'autres modules.

Un modèle pour le régulateur SCATs a également été créé et intégré dans le système de simulation pour permettre des analyses comparatives. Les parties suivantes présentent le régulateur SCATs et puis le GBR. Ces deux modules permettent de calculer la température de consigne souhaitée, celle-ci étant ensuite utilisée par le module de régulation thermique de l'ambiance.

(a) Régulateur SCATs

On peut résumer les *paramètres*, *entrées*, et *sorties* du régulateur comme le montre la *Figure 2.5*. Les paramètres constants c, b, d sont utilisés pour le calcul de la moyenne mobile et la température de régulation, comme il a été décrit dans le *Chapitre 1*.



Paramètres			
n°	**nom**	**Définition**	**Un**
1	c	Constant – demi-vie = 0.8	-
2	Tmin	Limite minimale de Trm = 10.0°C	°C
3	b	constant = 0.302	-
4	d	constant = 19.39	-
5	HX	Puissance de chauffage	kJ/h
6	CX	Puissance de climatisation	kJ/h

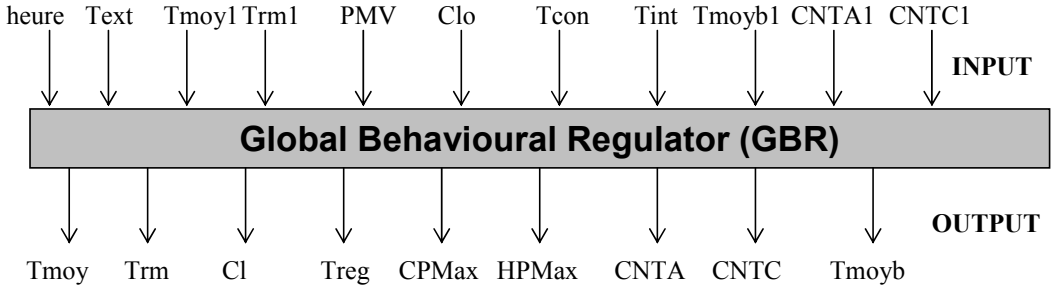
Entrées ou Inputs			
n°	**nom**	**Définition**	**Un.**
1	heure	temps	h
2	Text	température extérieure	°C
3	Tint	température intérieure	°C
4	Tmoy1	température moyenne ext. (J-1)	°C
5	Trm1	moyenne mobile ext. (J-1)	°C
6	Clo	l'isolation vestimentaire	clo
7	Tscat1	régulation température (J-1)	°C
8	Tmoyb1	température moyenne int. (J-1)	°C

Sorties ou Outputs			
n°	**nom**	**Définition**	**Un.**
1	Tmoy	température moyenne ext. (J)	°C
2	Trm	moyenne mobile ext. (J)	°C
3	Cl	l'isolation vestimentaire	clo
4	Tscat	régulation température (J)	°C
5	Tmoyb	température moyenne int. (J)	°C
6	CPMax	Puissance de climatisation	kW
7	HPMax	Puissance de chauffage	kW

Figure 2.5 : Représentation du module régulateur SCATs

(b) Régulateur GBR

Dans ce modèle, il y a quatre paramètres. Le 'c' permet le calcul de T_{rm} ; une partie du régulateur SCATs reste ainsi commune au GBR. Cependant, on ajoute 'le mode de fonctionnement' comme un paramètre additionnel. Les entrées et les sorties sont résumées en *Figure 2.6.*



Paramètres			
n°	**nom**	**Définition**	**Unité**
1	mode	5 modes de fonctionnement du modèle	-
2	c	Constant – demi-vie = 0.8	
3	HX	Puissance de chauffage	kJ/h
4	CX	Puissance de climatisation	kJ/h

Entrées ou Inputs			
n°	**nom**	**Définition**	**Unité**
1	heure	temps	h
2	Text	température extérieure	°C
3	Tint	température intérieure	°C
4	Tmoy1	température moyenne ext. (J-1)	°C
5	Trm1	moyenne mobile ext. (J-1)	°C
6	Clo	l'isolation vestimentaire	clo
7	Tcon	régulation température (J-1)	°C
8	Tmoyb1	température moyenne int. (J-1)	°C
9	PMV	Vote Moyenne Prévisible	-
10	CNTA1	Compteur Treg (h-1)	-
11	CNTC1	Compteur vestimentaire (h-1)	-

Sorties ou Outputs			
n°	**nom**	**Définition**	**Unité**
1	Tmoy	température moyenne ext. (J)	°C
2	Trm	moyenne mobile ext. (J)	°C
3	Cl	l'isolation vestimentaire	clo
4	Treg	régulation température (J)	°C
5	Tmoyb	température moyenne int. (J)	°C
6	CNTA	Compteur Treg	-
7	CNTC	Compteur vestimentaire	-
8	CPMax	Puissance de climatisation	kW
9	HPMax	Puissance de chauffage	kW

Figure 2.6 : Représentation du module régulateur comportementale (GBR)

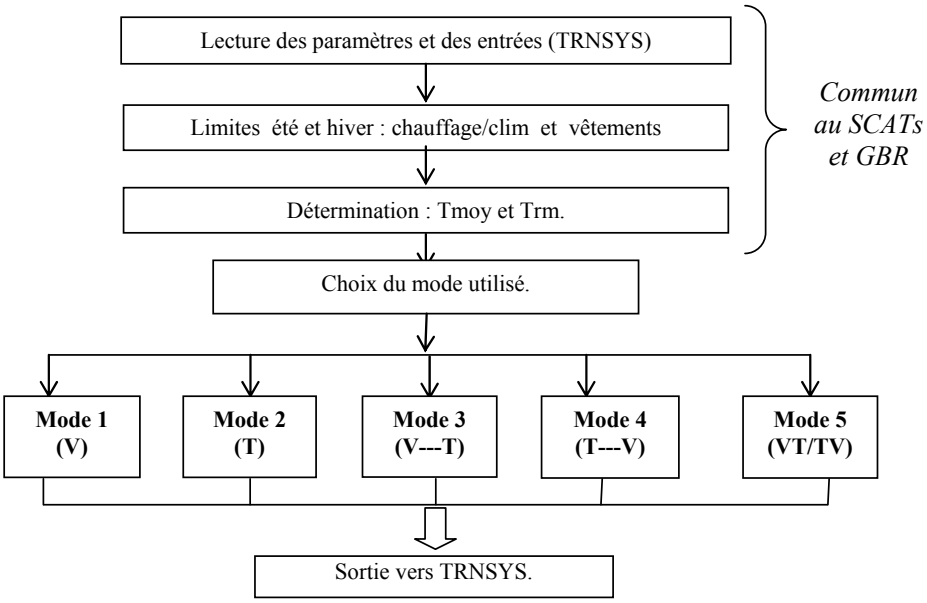


Figure 2.7 : Organigramme simplifié du modèle GBR

Il faut noter que certaines variables restent les mêmes dans les deux régulateurs, par exemple le T_{moy}, $T_{rm,}$ etc., car ces variables sont utilisées pour quantifier les ambiances intérieure et extérieure. Dans ce régulateur, afin de suivre le comportement, on peut compter le nombre de fois où un changement est fait sur les vêtements (I_{cl}) ou la température de consigne (T_{reg}).

L'organigramme de la *Figure 2.7* résume les étapes de calcul dans le GBR. Il faut noter que T_{moy} est la même que T_{od} définie dans le *Chapitre 1*. Les valeurs de T_{moy} et T_{rm} sont calculées seulement dans le premier pas de temps chaque jour. Selon le "mode" de régulation choisi, les nouvelles valeurs de I_{cl} et T_{reg} sont déterminées en fonction de la valeur du vote de confort (PMV) pour chaque pas de temps.

2.2.4 - Conditions de simulations générales

(a) Conditions météorologiques

Pour les simulations, les données météorologiques d'Agen (Sud-Ouest, France) qui sont disponibles dans la bibliothèque de TRNSYS sont utilisées. Elles peuvent être faites sur une année entière, mais nous analyserons séparément été et hiver. Pour cela, nous avons défini une période de chauffage et une de climatisation, comme le montre la *Figure 2.8*.

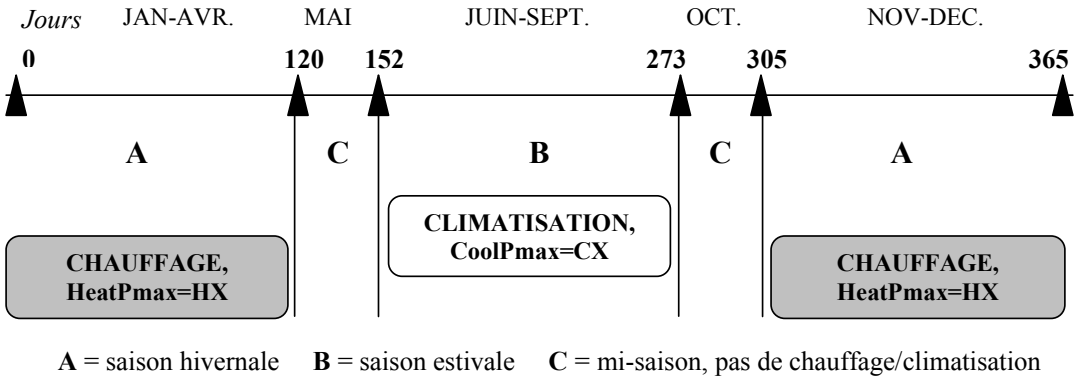


Figure 2.8 : La période de chauffage et climatisation

(b) Le bâtiment

Un bureau de volume 50 m^3, a été créé avec les dimensions indiquées *Figure 2.9*. Il s'agit d'une 'cellule type' utilisée dans des études précédentes dans le laboratoire. Il a une fenêtre sur le mur Est (surface = 3.5 m^2).

On a choisi deux types de murs - lourd et léger. La composition des murs est présentée par le *Tableau 2.1*. La même valeur de résistance thermique a été gardée pour les deux types de murs (R=0.577 kJ h^{-1} m^{-2} K^{-1}), ce qui permet l'analyse comparative au niveau du confort et de la consommation d'énergie entre un bâtiment à forte inertie thermique (*HWB - Heavy Weight Building*) et un bâtiment à faible inertie thermique (*LWB – Light Weight Building*). Dans les deux cas le plafond et le plancher (en contact avec le sol) sont identiques et l'influence des apports solaire sur le bâtiment est prise en compte sur les murs et par transmission à travers la fenêtre.

Les conditions de simulations pour le bureau sont restées simples, c'est-à-dire qu'il n'a pas de gains de chaleur ou de changements dans les stores, etc., et qu'on ne tient pas compte des emplois du temps, journées de travail, jours fériés, périodes de vacances, etc., notre but étant essentiellement de regarder les comportements opérés. Le taux de ventilation dans la plupart des simulations est resté fixe à 0.5 vol/h.

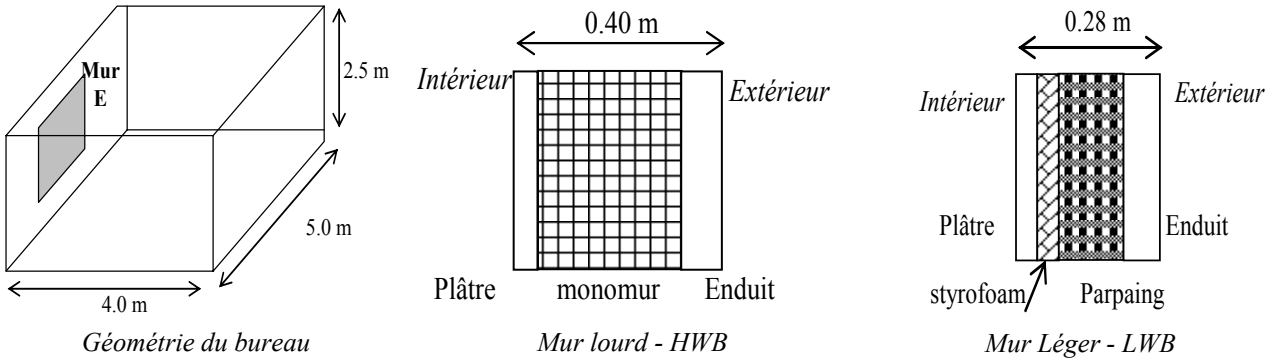


Figure 2.9 : Géométrie du bureau et composition des murs

Matériaux	Epaisseur (m)	Conductivité ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)	Capacité thermique volumique ($kJ\ m^{-3}\ K^{-1}$)
enduit	0.015	1.15	2000
plâtre	0.010	0.35	1300
Brique monomur	0.375	0.18	720
parpaing	0.200	1.05	845
styrofoam	0.055	0.03	36

Tableau 2.1 : Propriétés thermiques des matériaux utilisés pour les murs

2.3 - Résultats : Eté

Les résultats pour la saison estivale sont divisés en deux sous-parties : bâtiment Naturellement Ventilé (NV) et bâtiment avec climatisation.

►**Conditions de simulations :** Nous avons choisi de montrer des résultats sur quatre journées relativement chaudes. Le sujet a une activité sédentaire de M = 70 W m^{-2} et, au départ, une isolation vestimentaire de Icl = 0.5 clo. L'humidité n'est pas contrôlée et est fixée à 50 %, la vitesse de l'air est supposée faible, de 0.1 m/s.

►**Conditions météorologiques :** L'ambiance externe est montrée sur le premier graphe de la *Figure 2.10* pour plusieurs journées chaudes. Nous avons choisi de travailler sur les quatre journées les plus chaudes, comme le montre le deuxième graphe. La *température moyenne de l'air extérieure* (T_a ou T_{ext}) est de 24.7°C. Le même graphe montre *la température moyenne mobile extérieure* (T_{rm}) et le flux solaire horizontal.

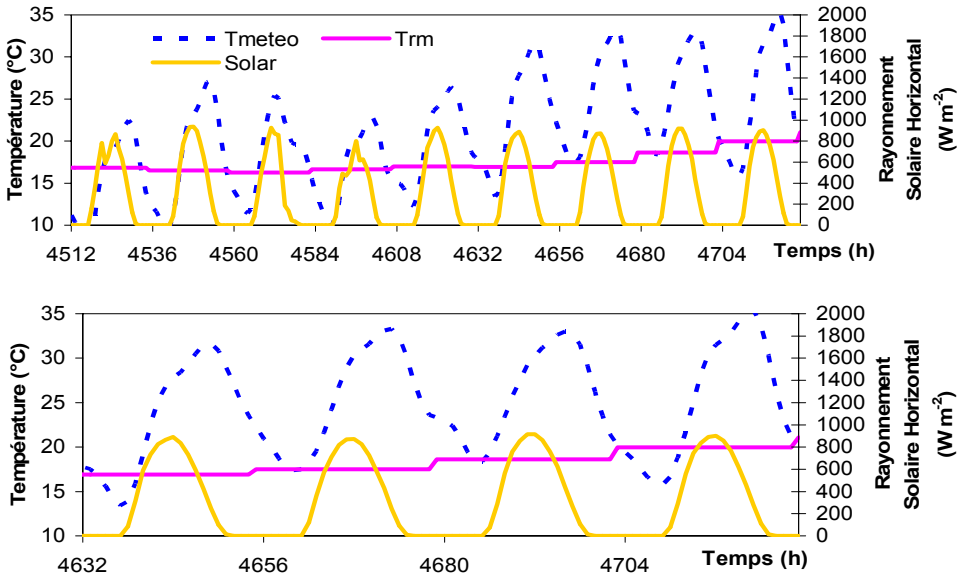


Figure 2.10 : Conditions météo d'Agen en été

Chaque variable étudiée sera discutée séparément. Tous les résultats sont présentés en valeur moyenne. *Il faut noter le positionnement de la fenêtre à l'Est. Si la position était au Sud, les résultats seraient bien sûr modifiés*.

►**Inertie des bâtiments :** D'après la *Figure 2.11* en l'absence de climatisation, il est évident qu'un bâtiment léger (LWB) réagit plus vite aux conditions météorologiques qu'un bâtiment lourd (HWB). Pour la période étudiée, la température moyenne des murs et de l'air intérieur est d'environ 26°C pour le cas lourd et 28°C pour le cas léger. Mais si l'on regarde le moment le plus chaud de la journée, la différence de température entre les deux bâtiments est de 4 ou 5K. La différence entre les températures maximale et minimale (ΔT_{in}) dans le cas léger est de 14.4K. Dans le cas lourd elle est de 7.5°C pour les quatre jours.

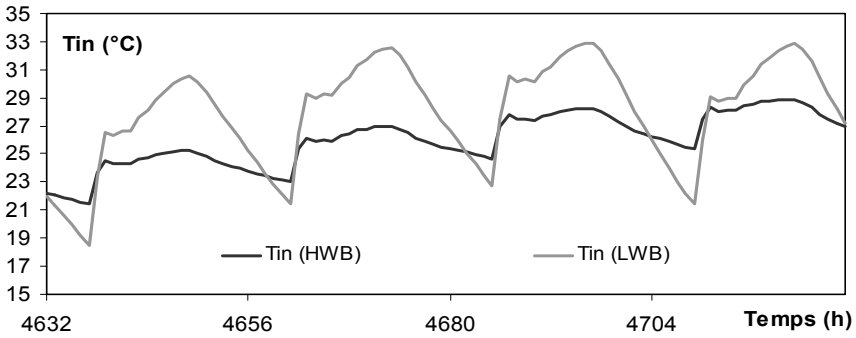


Figure 2.11 : Températures d'air dans le bâtiment léger (LWB) et lourd (HWB)

On peut remarquer que *la valeur moyenne de la température de l'air intérieure* (T_{in}) correspond à un PMV conforme aux recommandations de la norme, mais que les variations de la température laissent redouter un inconfort.

2.3.1 - Bâtiments Naturellement Ventilés (NV)

Les effets de certaines variables sont discutés ci-dessous : isolation vestimentaire, augmentation de la vitesse de l'air, métabolisme, etc.

(a) Isolation vestimentaire

Dans les bâtiments NV, souvent le comportement 'personnel', qui est le plus important, n'était pas suffisamment pris en compte dans la modélisation. Les changements de vêtements sont parfois une action essentielle pour arriver à un niveau de confort tolérable (mais pas nécessairement idéal). Ainsi, on a fait des simulations pour un cas avec des vêtements fixés à 0.5 clo sans ajustement (noté Icl = 0.5), puis avec des ajustements (noté Icl = var).

Les effets du changement des vêtements dans les deux types de bâtiments sont représentés dans les *Figures 2.12 et 2.13*. Il faut noter que la valeur de l'isolation vestimentaire était réinitialisée à 0.5 clo en début de journée (option *RESET* du modèle). Considérant toujours un cas de bureau, la norme ISO 7730 définit l'isolation minimale pour l'été égale à 0.3 clo. Mais, avec la GBR on donne plus de liberté de changement, donc le niveau vestimentaire minimal peut être 0.1 ou 0.2 clo (comme expliqué précédemment). Si les conditions intérieures sont à peu près stables, l'isolation moyenne est de 0.34 clo (pour le bâtiment léger) et de 0.35 clo (pour le lourd). En fait, il n'y a pas une grande différence. Ces moyennes globales cachent les variations d'ajustements. On trouve, par exemple pour le quatrième jour, que les valeurs moyennes journalières sont d'environ 0.33 clo (LWB) et 0.25 clo (HWB).

Si on compare le jour et la nuit, la différence entre les deux bâtiments est plus visible. Dans un bâtiment de forte inertie, la température pendant la nuit baisse moins que dans un bâtiment léger ; donc l'habillement est plus faible.

La variation de 0.25 clo pour les vêtements dans un bâtiment léger résulte d'une grande variation de T_{in} (δ = 3.0°C). Les occupants réagissent plus dans un bâtiment léger, 33 fois, contre 19 fois dans un bâtiment lourd (sur quatre jours).

Une étude conduite par Baker et Standeven (1995) montre que sur 864 heures (5 semaines), les sujets réagissent 62 fois par rapport à leurs habits et 273 fois par rapport aux fenêtres ou aux stores. Ils remarquent environ 2 changements journaliers pour une température moyenne de T_{in} = 30.5°C. Dans nos simulations, on en trouve environ 5 par jour. Cependant, il faut prendre en compte la remise à Icl = 0.5 clo en début de journée et noter que les T_{in} sont différentes.

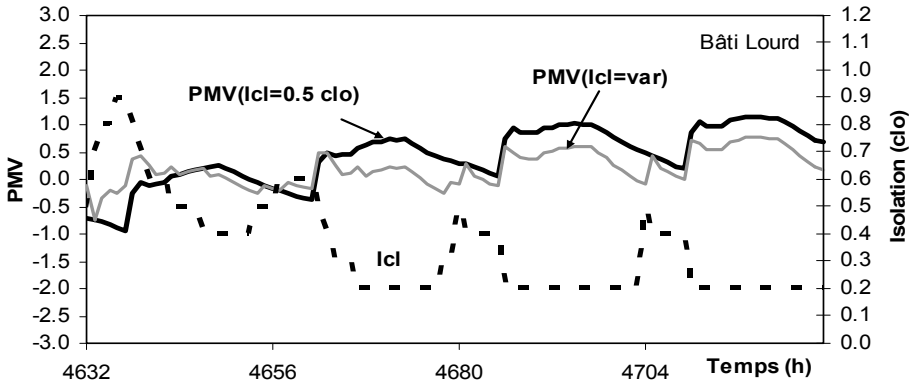


Figure 2.12 : Evolution du PMV et de Icl avec et sans changement de tenue vestimentaire.
Cas du *bâtiment lourd*

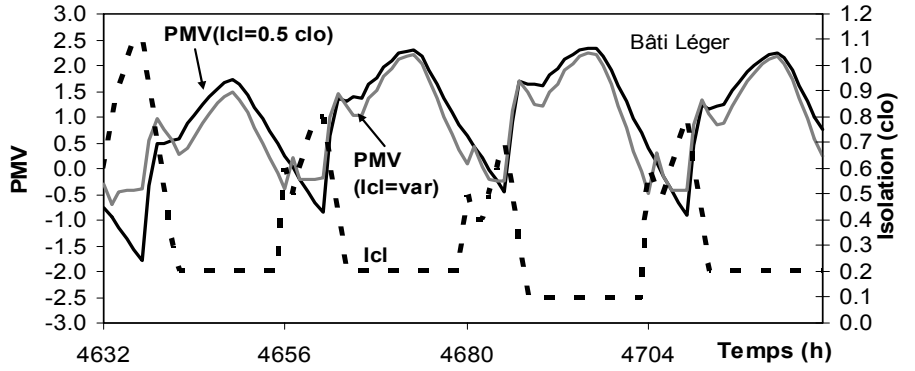


Figure 2.13 : Evolution du PMV et de Icl avec et sans changement de tenue vestimentaire.
Cas du *bâtiment léger*

(b) Confort (PMV/PPD)

Les *Figures 2.12 et 2.13* présentent les évolutions du PMV avec des tenues vestimentaires fixe et variable pour les deux types de murs. On voit que, pour une forte inertie, les valeurs de PMV sont entre -0.9 et 1.2 et, pour une faible inertie, entre -1.8 et 2.3. Quand il fait très chaud, la différence en PMV entre les deux bâtiments est d'environ 1.3.

Au niveau confort, le bâtiment à forte inertie donne des conditions beaucoup plus agréables ; les valeurs des PMV ne sont pas toujours dans la zone neutre, mais elles sont plutôt acceptables. Il apparaît que l'on peut éviter la climatisation dans les bâtiments lourds, car le PMV ne dépasse jamais 1.5. Il est évident que, quand le bâtiment léger 'chauffe', même si les gens réagissent sur leurs vêtements, ce comportement ne suffit pas pour les ramener au confort. Le PMV dépasse parfois la valeur 2, ce qui montre que les bâtiments légers ont besoin de climatisation. Nous verrons plus tard l'intérêt de ces résultats en comparaison avec les bâtiments climatisés.

Le *Tableau 2.2* résume les résultats. Les PPD moyens sont 7.9 % (δ = 3.0) pour le bâtiment lourd et 33.4 % (δ = 23.4) pour le bâtiment léger avec ajustements vestimentaires.

Bâtiment	Tin (°C)	Icl (clo)	Nombres de heures PMV > 0.5	PPD (%)	*PPD* (%)*
Léger	28.0	0.34	66	33.4	*42.6*
Lourd	26.0	0.35	21	7.9	*14.5*

Tableau 2.2 : Valeurs moyennes de Tin, Icl et PPD
dans les bâtiments léger et lourd (note : PPD* (%) - cas Icl fixé)

L'inconfort global est quatre fois plus élevé dans un bâtiment léger que dans un bâtiment lourd. Quand l'habillement est fixe, les PPD moyens obtenus sont 14.5 % (δ = 7.7) et 42.6 % (δ = 24.4) respectivement. Bien que l'homme puisse se déshabiller jusqu'à 0.1 ou 0.2 clo, il est toujours inconfortable. D'ailleurs, dans le cas du bâtiment lourd, il est intéressant de voir que, sans dépense d'énergie, on arrive à réduire de presque 50 % le nombre de personnes inconfortables. Ces chiffres montrent clairement qu'avec un bâtiment à forte inertie et en ajustant la tenue vestimentaire on peut améliorer le confort des occupants de façon très significative.

(c) L'effet d'augmentation de vitesse locale

La vitesse de l'air joue un rôle direct sur le confort. Dans un bâtiment naturellement ventilé, elle est liée le plus souvent à l'ouverture des fenêtres et, donc, à un changement du taux de renouvellement d'air neuf qui va influencer le comportement thermique du bâtiment lui-même.

Pour étudier cette variable, nous avons donc utilisé trois valeurs du taux de renouvellement d'air (*ACH – Air Change per Hour*) et nous avons à chaque fois modifiée la vitesse d'air sur le sujet. On suppose que la vitesse d'air sur le sujet est directement liée au taux de renouvellement d'air ce qui correspond à l'effet d'une fenêtre ouverte. Tous les résultats sont résumés dans le *Tableau 2.3* où les deux premières lignes donnent les conditions de simulation. La température de l'air intérieure (T_{in}) et l'isolation vestimentaire (Icl) sont présentées en valeurs moyennes et δ représente l'écart moyen par rapport à la moyenne arithmétique d'une variable.

	Bâtiment Lourd			**Bâtiment Léger**		
ACH (vol/h)	**0.5**	**1.0**	**2.0**	**0.5**	**1.0**	**2.0**
V (m/s)	**0.1**	**0.5**	**1.0**	**0.1**	**0.5**	**1.0**
Tin (°C)	26.0	25.7	25.4	28.0	27.6	26.9
δTin	*1.5*	*1.6*	*1.8*	*3.0*	*3.1*	*3.4*
Icl (clo)	0.35	0.58	0.71	0.34	0.47	0.52
δIcl	*0.16*	*0.20*	*0.20*	*0.21*	*0.30*	*0.35*
compteur Icl	19	35	41	33	49	52
PPD (%)	7.9	7.3	7.9	33.4	24.4	24.8
δPPD	*3.0*	*3.0*	*3.5*	*23.4*	*18.0*	*19.4*

Tableau 2.3 : Effet de l'augmentations de vitesse d'air dans des habitats lourd et léger en été

Lorsque l'on analyse pour des valeurs croissantes d'ACH, on peut noter les points suivants :

- l'ambiance intérieure (T_{in}) devient un peu plus fraîche, ce qui entraîne une réduction du PPD, surtout dans un bâtiment léger où on voit que ACH = 2 donne un PPD inférieur de 10% à celui obtenu avec ACH = 0.5 ;
- l'augmentation de la vitesse d'air entraîne une augmentation de l'habillement moyen pour les deux types de bâtiments.

Les valeurs moyennes ne montrent pas les tendances journalières ; on a donc décidé de regarder le troisième jour en détail pour le cas du mur lourd. La température de l'air pour plusieurs vitesses est présentée sur la *Figure 2.14*. Un ACH de 2 vol/h permet à la température intérieure de tomber autour de 23.7°C pendant la nuit, ce qui entraîne que le PMV est égal à -0.1. L'après-midi autour de 15 h, quand la température extérieure est maximale, l'air qui rentre dans le bâtiment est chaud et augmente la température intérieure. C'est la seule fois où T_{in} (ACH = 2.0) dépasse légèrement T_{in} (ACH = 0.5 ou 1.0) pendant quelques heures. Avec ACH égale à 1 ou 2, la valeur du PMV est inférieure de 0.4 par rapport au PMV obtenu avec ACH = 0.5.

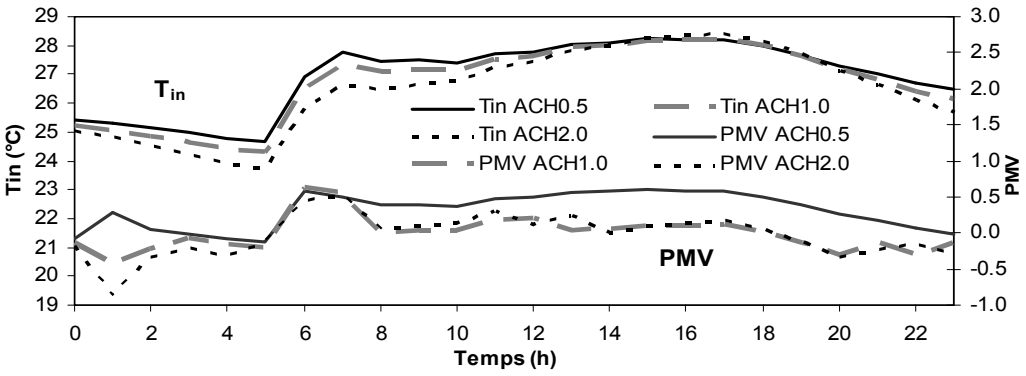


Figure 2.14 : Variations de Tin et PMV pour une journée chaude
avec 3 taux de renouvellement d'air (*bâtiment lourd*)

Pour chaque taux de renouvellement d'air, les valeurs d'isolation vestimentaire sont indiquées sur la *Figure 2.15*. Il est normal que, lorsque les vitesses de l'air augmentent, l'individu se couvre davantage. Pour les conditions calmes (ACH = 0.5 vol/h et v = 0.1 m s^{-1}), mis à part quelques heures tôt le matin, pendant la plupart de la journée l'isolation des vêtements est de 0.2 clo.

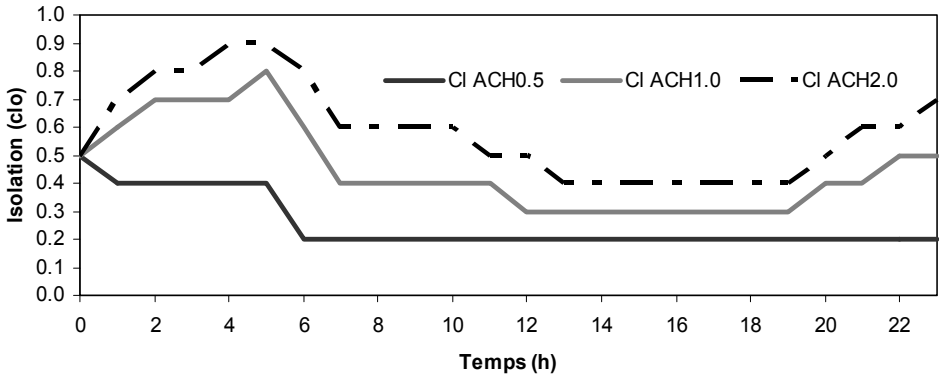


Figure 2.15 : Changements d'isolation vestimentaire pour une journée chaude
avec différents taux de changement d'air (*bâtiment lourd*)

Dans les bâtiments naturellement ventilés, les tendances du PPD moyen sont les mêmes pour les deux types de murs, mais les amplitudes de variations des PPD sont plus élevées dans le cas du bâtiment léger. L'augmentation de la vitesse est favorable dans un bâtiment léger (résultats non présentés) mais pas dans un bâtiment lourd. Ceci peut s'expliquer simplement par le fait que, dans les bâtiments de forte inertie, les individus sont confortables avec une vitesse de l'air faible comme 0.1 ou 0.5 m s^{-1}. Une vitesse plus forte commence à gêner les gens. Dans les bâtiments à inertie faible, l'ambiance est plus chaude, donc les vitesses de l'air plus fortes sont agréables même s'il y a besoin de se couvrir un peu plus. Il faut noter que ces résultats ne s'appuient que sur le PMV ; pour une analyse plus complète, il faudrait y associer le calcul du l'indice lié au courant d'air (DR – *Draught Risk*) [ISO 7730].

Il faut rappeler que la valeur d'isolation vestimentaire obtenue à la fin de chaque pas de temps dépend de l'ajustement qui a été effectué précédemment ; si l'homme est déjà arrivé à la limite minimum, il est normal qu'il ne puisse plus enlever ses vêtements même s'il a toujours chaud.

Dans le cas NV, la possibilité la plus simple serait d'essayer d'ouvrir la fenêtre. Toutefois nous n'avons pas modélisé cette possibilité car on ne connaît pas la relation entre l'ouverture de la fenêtre, le débit d'air entrant et la vitesse de l'air sur la personne.

(d) Métabolisme

Le confort thermique d'un individu dépend des conditions thermiques mais aussi de son activité ; nous avons donc testé dans quelle mesure cette variable peut avoir une influence dans notre cas d'étude. Nous avons fait varier le métabolisme de 45 à 140 W m^{-2} pour les deux types de bâtiments. Les résultats donnés sur la *Figure 2.16* montrent l'évolution du PPD moyen en fonction du métabolisme.

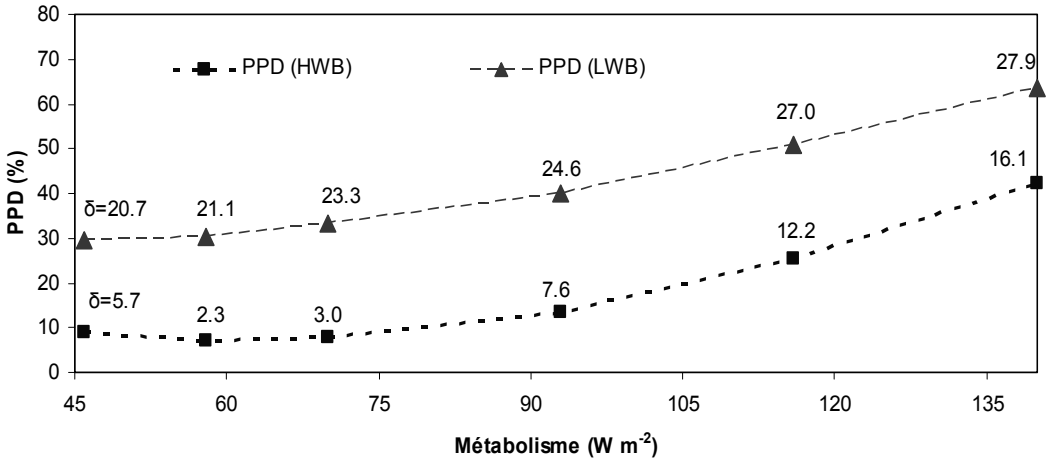


Figure 2.16 : Influence de l'activité sur le PPD

On trouve que, dans le cas du bâtiment lourd, si les activités sont entre 46 – 70 W m^{-2}, le PPD est inférieur à 10 %, ce qui n'est pas le cas pour un bâtiment léger. Au niveau de l'habillement, l'isolation varie de 0.7 à 0.1 clo pour le HWB et 0.5 à 0.1 clo pour le LWB.

Dans une situation de ventilation naturelle, la différence de température pour les deux types de murs crée une grande différence de confort et elle joue un rôle plus important que les vêtements. Pour les faibles activités, le changement d'isolation vestimentaire permet au sujet de maintenir un niveau de confort acceptable. Par contre, plus l'activité augmente moins le confort est assuré, même avec une tenue vestimentaire minimale. Le changement d'habillement améliore certainement la situation, mais l'homme est toujours inconfortable pour des activités élevées. Bien sûr les résultats ne prennent pas en compte l'adaptation psychologique, difficile à mesurer ou à modéliser d'après De Dear et Brager (1998). Dans les pays chauds, les gens sont capables d'accepter des températures plus élevées qu'en Europe. Alors, le confort est-il amélioré significativement avec la climatisation ? Si la réponse est oui, nous voulons savoir quel en est le coût énergétique.

2.3.2 - Bâtiments Climatisés

Dans cette section, les résultats présentés concernent les bâtiments avec climatisation. Les conditions météorologiques sont les mêmes que celles présentées précédemment (cf. *Figure 2.10*).

(a) Conditions de Simulations

Le système de climatisation est basé sur la température de l'air intérieur du bâtiment et il est régulé par un contrôleur qui a une bande morte de ±0.5°C. La puissance de la climatisation dépend du système de régulation ; une puissance de 0.36 kW peut être assurée si nécessaire. Les simulations sont faites pour une activité de bureau (1.2 met = 70 W m^{-2}).

La température de consigne de la régulation (Treg) est déterminée par les trois types de régulateurs : fixe, SCATs et GBR.

- **Fixe :** Pour la régulation fixe, la température est celle recommandée par la norme [ISO 7730]. La température de consigne peut être dans la gamme de 23 à 26°C. On a choisi 24.5°C car l'isolation vestimentaire reste fixe à 0.5 clo.

- **SCATs :** Une température de régulation variable est produite par l'algorithme SCATs et l'isolation vestimentaire Icl = 0.5 clo identique au cas précédent. Il faut rappeler que la température de la consigne donnée par le régulateur SCATs est différente pour chaque jour car elle dépend de T_{rm}.
- **GBR :** Le GBR fonctionne en mode 3, c'est-à-dire que l'individu change d'abord les vêtements avant de toucher à la température (T_{reg}). Chaque début de journée (mode "*RESET*"), les valeurs sont réinitialisées $T_{reg,std}$ = 26.0°C et $I_{cl,std}$ = 0.5 clo. Cette température de consigne a été choisie d'après la RT 2000. Il faut rappeler que l'ajustement personnel peut être fait avec deux niveaux d'isolation, c'est-à-dire un petit ajustement de ±0.1 clo, ou un grand changement de ±0.2 clo.

Les simulations avec chaque régulateur sont représentées *uniquement pour le cas d'un bâtiment lourd* (cf. *Figure 2.17*) : variations de la température de régulation (T_{reg}), la température de l'air intérieur (T_{in}), la température des surfaces (T_{surf}), le signal de fonctionnement de la climatisation (CP), l'isolation vestimentaire (Icl) et PMV. Les résultats pour un bâtiment léger sont résumés dans le *Tableau 2.4* présenté un peu plus loin.

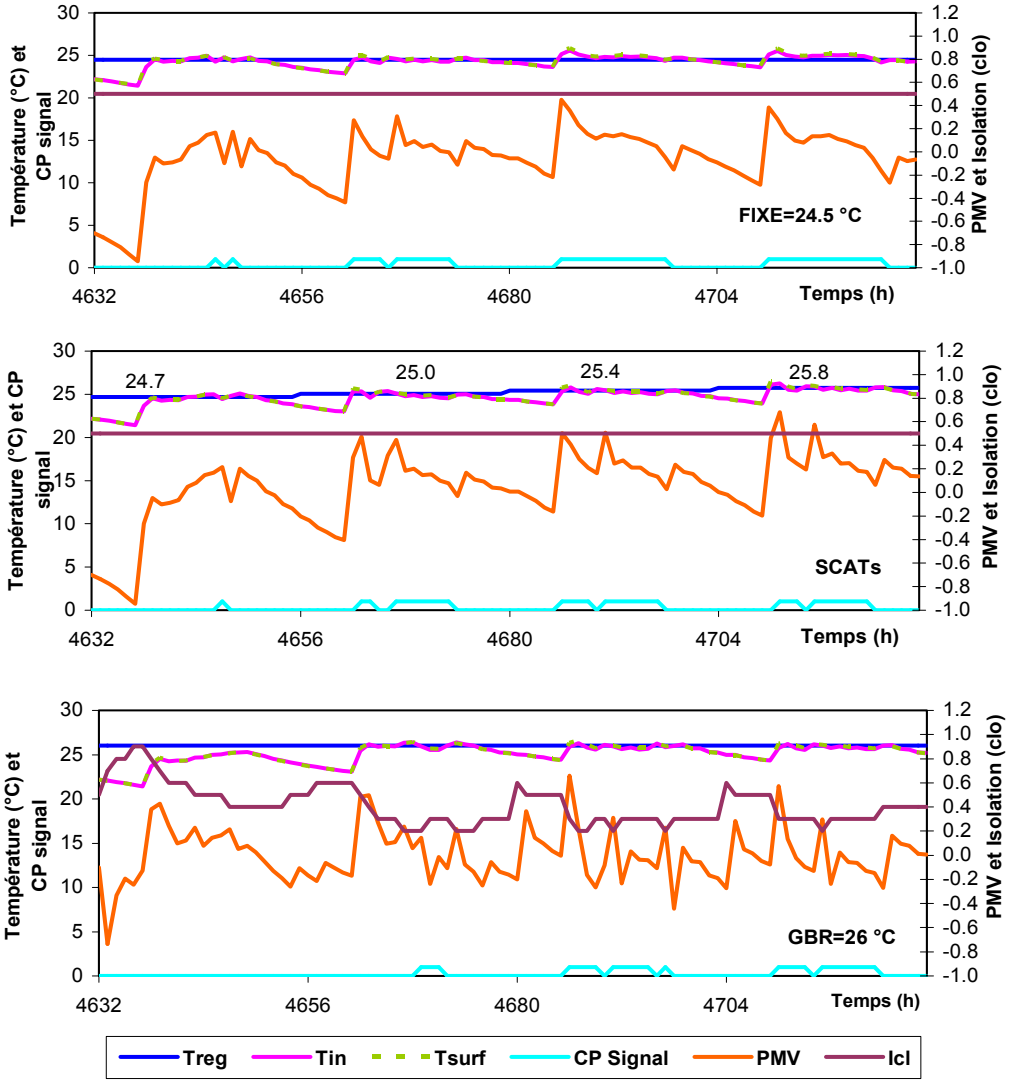


Figure 2.17 : Température de régulation (Treg), de l'air intérieur (Tin), et des surfaces (Tsurf), signal de fonctionnement de la climatisation (CP), isolation vestimentaire (Icl) et PMV pour les trois types de régulation (*bâtiment lourd*)

Lorsque la température de consigne est élevée (cas de GBR), il est normal que T_{in} et T_{surf} soient élevées aussi. Les oscillations dans les cas "fixe" et "SCATs" sont liées au fonctionnement du contrôleur, mais dans le cas GBR, elles sont aussi liées à des ajustements des vêtements et à la

réinitialisation de T_{reg} et I_{cl}. Le comportement vestimentaire montre qu'en moyenne, une l'isolation de 0.4 clo est maintenue, pour un confort nettement amélioré.

Les résultats pour un bâtiment lourd montrent que, à part quelques incidents d'inconfort, la plupart du temps les gens sont confortables. Si la combinaison des possibilités d'ajustements des vêtements et de la température de consigne est disponible, le PPD est légèrement amélioré (6.0 %) par rapport au cas "fixe" (6.5 %) ou "SCATs" (6.9 %). Le comportement vestimentaire peut expliquer la différence des valeurs de PPD parce que, même si la possibilité de changer la température de consigne est disponible, elle n'a pas toujours été utilisée. Il faut noter que, bien que le sujet puisse modifier la température de consigne, il n'a pas eu besoin d'y toucher ; dans ces conditions, l'ajustement vestimentaire est suffisant. Les variations du PPD dans ce cas sont deux fois plus grandes pour les régulateurs "SCATs" et "fixe" que celles obtenues pour GBR (*Tableau 2.4*).

(b) Inertie des bâtiments

Les résultats pour les deux types de bâtiment sont résumés dans le *Tableau 2.4*. L'énergie totale correspond à l'énergie nécessaire pour la climatisation en quatre jours. Il faut noter que, même si la température de consigne ne change pas, il y a tout de même des différences sur T_{in} entre les deux bâtiments ; dans les deux cas la température de régulation donnée par le "SCATs" est semblable car elle ne dépend que des conditions météorologiques.

Bâtiment	**Lourd - HWB**			**Léger - LWB**		
Régulateur	**Fixe**	**SCATs**	**GBR**	**Fixe**	**SCATs**	**GBR**
Treg ± δTreg (°C)	**24.5**	25.2 ± 0.4	26.0	**24.5**	25.2 ± *0.4*	26.0 ± *0.2*
ICl ± δICl (clo)	**0.5**		0.4 ± *0.13*	**0.5**		0.4 ±*0.19*
PPD ± δPPD (%)	6.5 ± *1.9*	6.9 ± *2.2*	6.0 ± *1.0*	10.9 ± *6.1*	11.5 ± *6.5*	9.1 ± *4.5*
Energie Totale (kJ)	52 000	40 300	31 200	68 900	62 400	50 700
" " " (kW h)	14.4	11.2	8.7	19.1	17.3	14.1

Tableau 2.4 : Tableau récapitulatif pour les trois régulations et les deux types de bâtiment

(c) Isolation vestimentaire

Pour le GBR, la tenue vestimentaire moyenne dans les deux types de bâtiment est égale à 0.4 clo. Il est intéressant de remarquer que le nombre de fois qu'un individu fait des ajustements d'habillement est de 32 fois (bâtiment lourd) et 52 fois (bâtiment léger).

Les tendances des courbes correspondent à ce qu'on a déjà vu dans les bâtiments naturellement ventilés. On constate qu'un bâtiment léger climatisé nécessite un peu plus d'isolation vestimentaire pendant la nuit qu'un bâtiment léger naturellement ventilé. Malgré cette différence, l'isolation vestimentaire journalière reste près de 0.2 clo.

(d) Confort (PMV/PPD)

Les PPD varient peu en fonction du type de régulation (fixe, SCATs ou GBR), mais passe de 6 - 7 % pour le bâtiment lourd à 10 - 11 % pour un bâtiment léger. D'autre part, quand l'isolation vestimentaire n'est pas réinitialisée, le PPD obtenu par GBR est 5.9 % pour le cas lourd ; il n'y a donc pas de variation majeure.

L'amplitude des variations du PPD est 3 fois plus grande dans le cas léger que dans le cas lourd ; ceci est lié aux plus grands écarts de température d'air intérieur du bâtiment. Même si la résistance thermique des parois est identique, il apparaît que l'inertie du bâtiment a une influence notable sur le confort quel que soit le mode de régulation.

(e) Consommations énergétique

D'une part, la consommation d'énergie dépend de l'inertie thermique du bâtiment, d'autre part, elle est bien dépendante de la température de consigne. Pour le bâtiment léger, il y a une plus forte consommation d'énergie car la climatisation marche plus souvent. En fait, approximativement

environ 20 MJ de plus sont consommés pour le bâtiment léger avec n'importe quel type de régulateur. Enfin, on constate une forte baisse de la consommation avec le régulateur GBR.

(f) Métabolisme

Les variations de PPD moyen en fonction de l'activité de l'individu dans un bureau de forte inertie sont présentées dans la *Figure 2.18* en utilisant les trois régulations. Les deux régulateurs "fixe" et "SCATs" ont des températures de consigne identiques aux cas précédents ; 24.5°C et 25.2°C respectivement.

Avec le GBR, quand l'activité change, l'individu utilise les possibilités d'ajustement mis à sa disposition : changement d'isolation vestimentaire ou de température de consigne (lorsque la limite de l'habillement est atteinte). En raison de ce comportement, on trouve des températures de consigne (T_{reg}) qui vont de 26.5°C à 24.5°C quand le métabolisme augmente.

Les variations du PPD moyen pour les régulations "fixe" et "SCAT"s sont à peu près identiques. Il faut noter que le PPD élevé pour les faibles activités est lié à un PMV négatif où l'individu a plutôt froid. Par contre, la courbe donnée par le GBR est évidemment assez différente, car les PPD moyens sont entre 6 – 21 %. Si on regarde les résultats pour des activités autour de 70 W m^{-2} (entre 58 et 93 W m^{-2}), les PPD moyens sont assez faibles ; ceci est dû au fait que l'homme peut avoir un comportement plus libre que dans le cas standard (comme avec un régulateur fixe, par exemple).

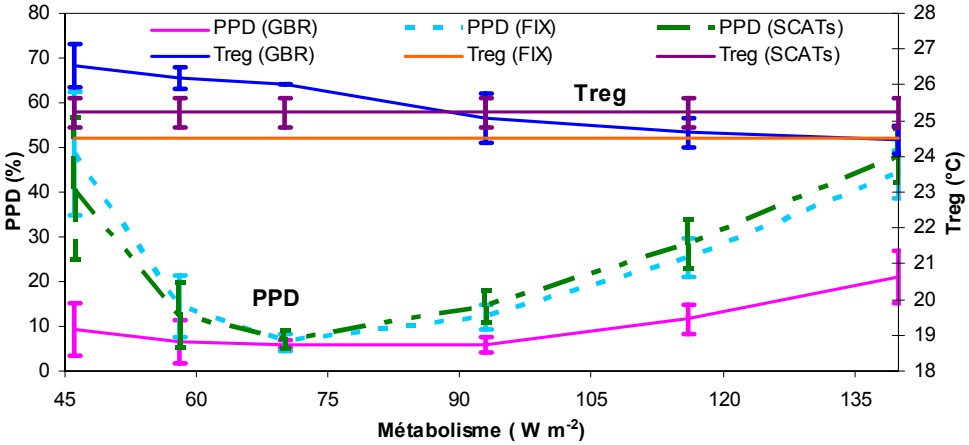


Figure 2.18 : Influence de l'activité sur le PPD pour les trois types de régulateur (*bâtiment lourd*)

Enfin, pour souligner l'importance du comportement vestimentaire, on va prendre quelques exemples. Une activité faible comme 46 W m^{-2} exige un habillement de 0.9 clo ; en comparaison une activité élevée comme la gymnastique douce (140 W m^{-2}) exige 0.1 clo seulement. Le compteur de l'ajustement vestimentaire montre que, si une personne est en train de lire (58 W m^{-2}), il va faire 30 changements et il touche 2 fois la température de la consigne pour la période de quatre jours. Dans cette situation, la consommation d'énergie est approximativement 31 MJ. Les énergies consommées pour les régulateurs "fixe" et "SCATs" ne changent pas, c'est-à-dire 52 et 40 MJ respectivement. Avec GBR pour les quatre journées étudiées, les consommations varient de 57 MJ pour une forte activité à 29 MJ lors du repos.

2.3.3 - Eté caniculaire

Comme les conditions météorologiques d'Agen ne sont pas très chaudes, nous avons décidé de créer les conditions d'un été caniculaire en ajoutant 5°C à la température de l'air extérieur. Ceci nous permet d'observer surtout les comportements d'un occupant sur la température de consigne, utilisant le régulateur GBR, qui ne sont pas évidents dans les résultats précédents. La *Figure 2.19* donne les températures extérieures et intérieures, la température de consigne et le signal de

fonctionnement de climatisation pour le cas d'un *bâtiment lourd*. La T_{reg} baisse jusqu'à 23°C et la climatisation fonctionne de façon continue.

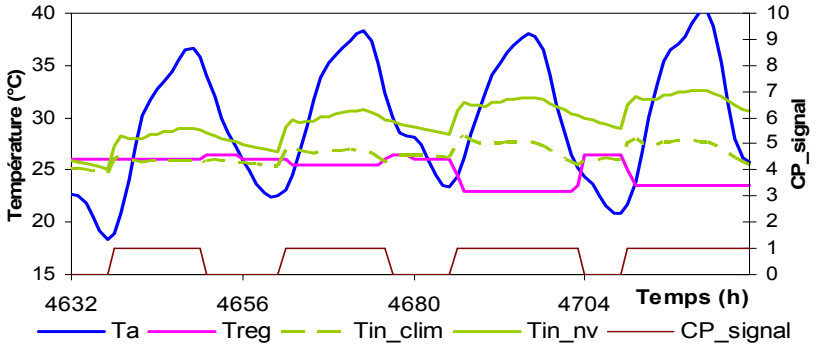


Figure 2.19 : Température de régulation (Treg), température de l'air intérieure (Tin) et signal de fonctionnement de la climatisation (CP), pour un bâtiment lourd (NV ou climatisé) avec les conditions météorologiques très chaudes

La *Figure 2.20* présente les isolations vestimentaires et le PMV pour cet été caniculaire. Sur la journée la plus chaude (jour 4), la T_{in} dans un bâtiment NV est d'environ 32.5°C et, avec climatisation, on obtient une T_{in} de 28°C, ce qui donne une réduction de PMV de 2.1 à 0.5 ; il y a très peu de différence sur Icl qui reste au minimum (0.1 ou 0.2 clo). On observe moins de fluctuations dans la courbe de PMV si on compare à la *Figure 2.17*, car les changements vestimentaires (9 fois) sont trois fois moins fréquents et, la plupart de temps, le régulateur marche sans arrêt.

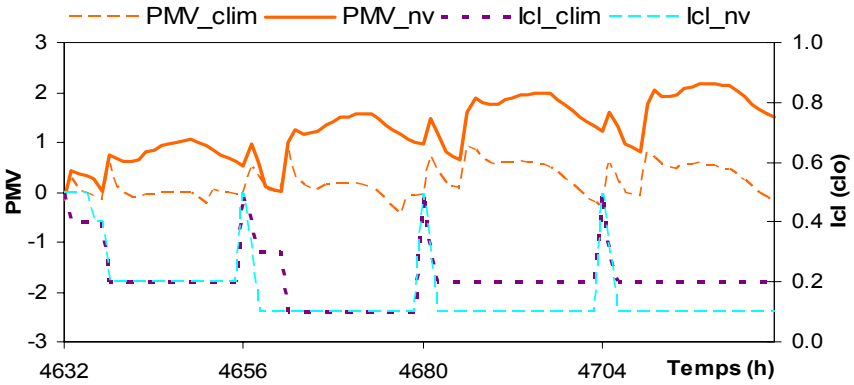


Figure 2.20 : Isolation vestimentaire (Icl) et PMV pour un bâtiment climatisé (clim) ou non (NV)
Conditions météorologiques très chaudes (*bâtiment lourd*)

On peut faire une synthèse comparative pour les différentes conditions de météo pour le cas d'un bâtiment lourd :

Bâtiment		**Naturellement Ventilé**		**Climatisé**	
	Météo	**Agen**	**Canicule**	**Agen**	**Canicule**
Treg	(°C)			26.0	25.0
Tin	(°C)	26.0	29.7	25.0	26.5
Icl	(clo)	0.35	0.16	0.4	0.21
Compteur Treg				0	10
Compteur Icl		19	8	32	9
PPD	(%)	7.9	42	6.0	7.8
Energie Totale	(kW h)			8.7	23.1

Tableau 2.5 : Résumé pour un bâtiment naturellement ventilé ou climatisé
pour deux conditions météorologiques

En cas de canicule, l'énergie consommée est presque trois fois plus importante ; l'intervention sur les vêtements ne suffit pas alors l'occupant touche à la température de consigne

environ 10 fois par rapport aux conditions de base. Par contre, grâce à la climatisation, on arrive à réduire de 42 % le PPD observé dans le cas NV, à 8 % dans le cas climatisé.

2.3.4 - Comparaison entre les bâtiments naturellement ventilés et climatisés

Les résultats donnés dans le *Tableau 2.6* récapitulatif montrent très clairement qu'en climat d'été la possibilité qu'un individu a d'agir sur le climat intérieur et sur sa tenue vestimentaire joue un rôle tout d'abord sur son confort, mais également sur les économies d'énergie (climatisation).

Une bâtiment à forte inertie semble préférable, car, les amplitudes de variation de température étant moins importantes, le sujet a moins besoin d'avoir des actions comportementales. Mais cela ne suffit pas lorsque la météo est caniculaire (cf. *Tableau 2.5*), car on est obligé de baisser la température de la consigne pour atteindre le confort, entraînant ainsi plus de consommation d'énergie. Il est possible d'approfondir cet aspect en considérant l'effet du store, mais le comportement sur les stores n'a pas été étudié dans ce travail.

	Variables		Bâtiment Lourd	Bâtiment Léger
Naturellement Ventilé	**Tin ± δTin**	(°C)	26.0 ± 1.5	28.0 ± 3.0
	Icl ± δIcl	(clo)	0.35 ± 0.16	0.34 ± 0.21
	Icl compteur		19	33
	PPD± δPPD	(%)	7.9 ± 3.0	33.4 ± 23.4
Climatisé	**Treg ± δTreg**	(°C)	26.0	26.0 ± 0.2
	Tin ± Tin	(°C)	25.0 ± 0.9	25.2 ± 1.5
	Icl ± δIcl	(clo)	0.4 ± 0.13	0.4 ±0.19
	PPD± δPPD	(%)	6.0 ± 1.0	9.1 ±4.5
	Energie Totale	(kW h)	8.7	14.1

Tableau 2.6 : Résumé des valeurs obtenues dans un bâtiment naturellement ventilé ou climatisé pour les conditions météorologiques d'Agen avec le GBR

Enfin, il est évident que la réglementation actuelle fixe la température optimale pour des tenues vestimentaires et des activités standard. Dans le cas où l'un de ces paramètres s'éloigne de ces valeurs, la consigne réglementaire en température n'est plus adaptée.

2.3.5 - Analyse des résultats

Dans la démarche adaptative, les études sur le terrain ont montré que la température de confort et l'isolation vestimentaire sont des fonctions de la température extérieure ou plutôt de T_{rm} (cf. *Chapitre 1*). Dans ces observations, il est difficile de savoir quelle est la part objective et celle subjective, ainsi que l'effet cumulatif c'est-à-dire le fait que les personnes, s'habillant plus légèrement lorsque le climat se réchauffe, auront alors besoin d'une température de confort plus haute. Nous avons donc essayé d'analyser les résultats de simulation de la même façon. Nous avons tenté de trouver une corrélation[1] entre T_{reg} et T_{rm}, d'une part et Icl et T_{rm} d'autre part.

(a) Traitements des données

On dispose de tous les résultats concernant la saison estivale, soit quatre mois (Juin - Septembre). Nous avons traité les résultats de simulations de manière simple et sélective. D'abord, toutes les données correspondant à la gamme des conditions de confort (-0.5<PMV<+0.5) ont été retenues. Ensuite, on n'a sélectionné que les valeurs correspondant à une journée 'normale' entre 8 h et 19 h. Deux valeurs moyennes – la température de l'air intérieure (T_{in_moy}) et l'isolation vestimentaire (I_{cl_moy}) - ont été calculées pour chaque jour. Enfin, ces moyennes, qui correspondent donc à des conditions de "confort", ont été tracées en fonction de la moyenne mobile T_{rm} (cf. *Chapitre 1*).

[1] Il faut noter que le 'r' utilisé est le coefficient de corrélation pour déterminer la relation entre deux propriétés, exemple T_{in} et T_{rm} ou Icl et T_{rm}. La valeur du coefficient de détermination (R^2) vient d'une régression linéaire ajustée aux observations.

(b) Analyses et discussions

Parmi les cas traités, seulement quelques résultats intéressants sont présentés.

► **Ambiance intérieure de "confort" par rapport à l'ambiance extérieure**

La *Figure 2.21* montre les tendances de T_{in_moy} et I_{cl_moy}, en fonction de T_{rm} pour le cas d'un bâtiment lourd naturellement ventilé (HWB-NV). Lorsqu'une régression linéaire est tracée, on trouve un coefficient de détermination (R^2) environ 0.2 pour T_{in_moy} et I_{cl_moy}.

En revanche, pour le cas d'un bâtiment léger (cf. *Figure 2.22*), il y a beaucoup plus de dispersion, ainsi 'R^2' est autour de zéro. Pour les bâtiments de faible inertie, la demi-vie dans le calcul de T_{rm} (c = 0.8) est peut être estimée trop grande, car les conditions intérieures changent vite et, donc, les gens agissent plutôt selon les changements instantanées de la température extérieure. Comme nous l'avons expliqué, notre choix de 'c' reste celui de l'étude menée sur le terrain, mais nous pensons qu'il est nécessaire de choisir d'autres valeurs selon le climat et le bâtiment.

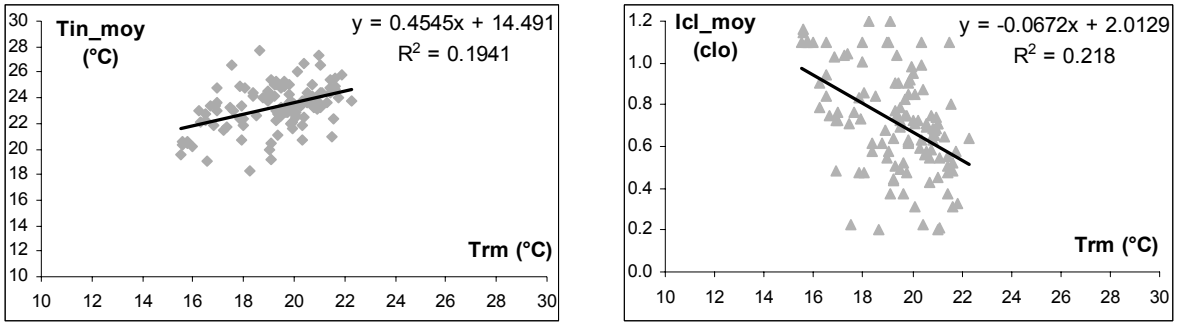


Figure 2.21 : Tin_moy et Icl_moy en fonction de Trm (bâtiment *lourd naturellement ventilé*)

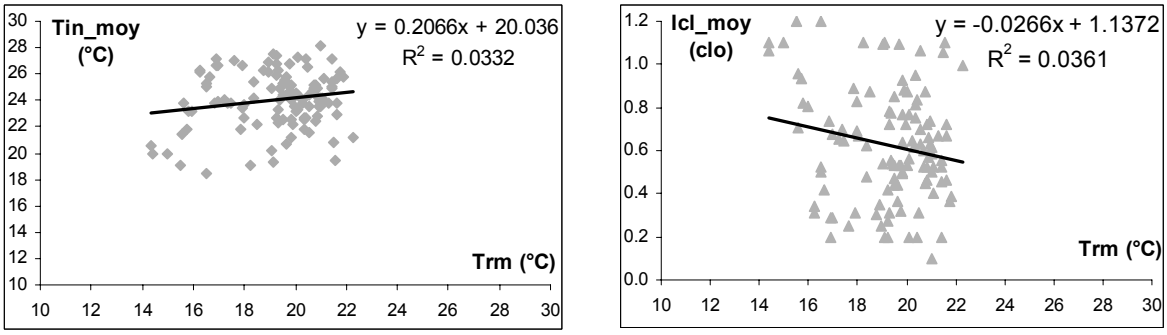


Figure 2.22 : Tin_moy et Icl_moy en fonction de Trm (bâtiment *léger naturellement ventilé*)

On considère T_{in_moy} comme la température de confort (T_C), car cette moyenne a été calculée avec des valeurs de T_{in} qui correspondent aux valeurs de PMV neutre (-0.5<PMV<+0.5) ; on peut donc comparer nos équations avec celles d'études faites sur le terrain (cf. *Tableau 2.7*).

Type du Bâtiment	Equation Linéaire	Coeff. de Corrél. (r)	Référence
NV - Lourd	Tc = 0.46Trm+14.7	0.25	*Tc = température du confort* calculée à partir de votes '0' sur l'échelle de confort. Tc a été obtenue pour les gens qui partagent le même bâtiment, donc il reflète une condition moyenne du bâtiment et ne tient pas compte de la température locale. Pas de fenêtre dans le bâtiment léger. *Etude d'Oxford* [Nicol et Raja, 1996].
	Icl = 1.30-0.034Trm	-0.44	
NV- Léger	Tc = 0.31Trm+16.4	0.16	
	Icl = 0.60+0.002Trm	-0.03	
NV : tous les bâtiments	Tc = 0.21Trm+21.42	----	*SCATs projet*, [Nicol et McCartney, 2000]. Equation obtenue pour la France sur une moyenne de 5 bâtiments en région Lyonnaise (NV et ventilé mécaniquement). Détails sur les bâtiments [Stoops, 2001].
	Icl = 0.979-0.0197Trm (R^2 = 0.44)	----	

Tableau 2.7 : Equations de régression entre Tc, Icl et Trm

L'équation de bâtiment NV lourd est proche celle obtenue par l'étude d'Oxford et celle de bâtiment NV léger proche de celle du projet SCATs.

La climatisation fonctionne très peu avec les conditions météorologiques d'Agen ; ainsi, on trouve presque les mêmes tendances dans les courbes de T_{in_moy} et I_{cl_moy} pour les deux types de bâtiments climatisés. Par conséquent, avec les conditions météorologiques utilisées, les conditions thermiques "confortables" peuvent être atteintes sans climatisation. En climat plus chaud ou pendant la canicule, les conclusions ne seraient probablement plus valables ; par exemple, la *Figure 2.23* présente les tendances de T_{in_moy} et I_{cl_moy} par rapport à T_{rm} pour un bâtiment lourd lorsque la température de consigne est entre 23 et 26°C.

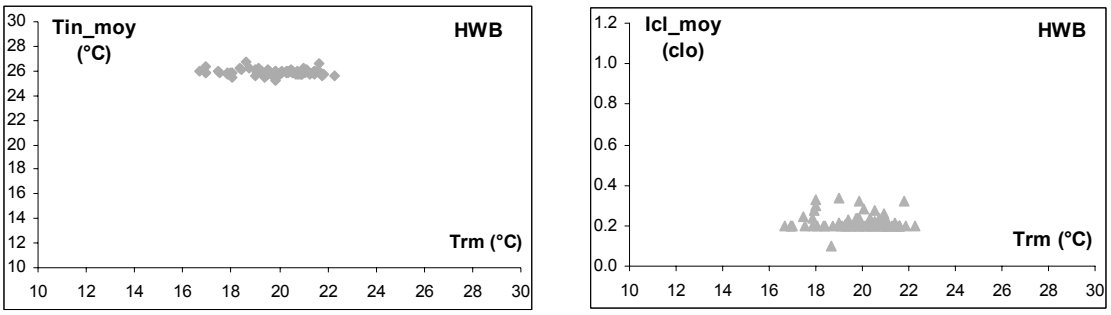


Figure 2.23 : T_{in_moy} et I_{cl_moy} en fonction de Trm (bâtiment *lourd climatisé*) (Météo : caniculaire)

La température de confort et l'isolation vestimentaire sont moins dispersées que dans un bâtiment non climatisé. Ceci est dû au fait que le climat interne d'un bâtiment climatisé reste beaucoup plus homogène. Il est intéressant de remarquer qu'avec la météo d'Agen la climatisation a fonctionné 24 heures sur la période de quatre jours et, avec la météo caniculaire, il fonctionne encore 40 heures de plus. Lorsqu'on considère une saison caniculaire, on obtient 476 heures, qui deviennent pénalisantes en terme de coût énergétique. L'avantage est que, même s'il fait 40°C à l'extérieur, un occupant peut maintenir son confort à partir des actions comportementales.

► **Isolation vestimentaire par rapport d'ambiance externe**

Plusieurs études faites sur terrain en Angleterre [Nicol et Raja, 1996], au Pakistan [Nicol et. al, 1999], et en Australie [Morgan et de Dear, 2003] montrent que, dans les conditions de confort, une forte corrélation existe entre l'habillement des occupants et les conditions climatiques. Au Pakistan, deux tiers des changements en température de confort étaient dus aux changements vestimentaires. Dans cette expérience, il a été montré que 1°C de changement en T_{rm} engendre un changement d'isolation de 0.033 clo. On voit que les gens s'habillent moins quand il fait chaud en général, quel que soit le bâtiment (cf. *Figures 2.21 et 2.22*) ; dans notre cas, 1°C de changement de T_{rm} produit un changement isolation vestimentaire de 0.067 clo (HWB) et de 0.027 clo (LWB).

Dans un bâtiment à forte inertie, l'habillement est fortement lié à la météo des jours antérieurs car les températures évoluent plus lentement à l'intérieur qu'à l'extérieur. Cependant, dans le cas où il fait longtemps chaud, une forte inertie alliée à une contrainte sur l'habillement peut engendrer des situations où la climatisation est utilisée davantage.

2.3.6 - Conclusions

Il est évident qu'un bâtiment climatisé consomme plus d'énergie que s'il est naturellement ventilé. Toutefois le type de régulation joue également un rôle important. En effet pour les trois types de régulation (GBR, SCATs et Fixe), le PMV reste quasiment en permanence entre -0.5 et 0.5, mais les différences de consommation sont significatives. On se rend compte que si le sujet peut agir sur sa tenue vestimentaire ou éventuellement sur son métabolisme, il attendra avant de réduire la température de consigne de la climatisation et les économies peuvent être importantes. On peut imaginer que si on avait envisagé la possibilité d'utiliser un ventilateur, l'effet aurait encore été

accru. Pour maintenir un bon niveau de confort en été, il faut donc avoir un bâtiment à forte inertie et laisser un maximum de degré de liberté au sujet.

Dans la démarche adaptative, la température de confort mesurée sur le terrain est nettement différente suivant que les bâtiments sont climatisés ou non (cf. *Chapitre 1*). Il a été noté que ces différences sont pour partie liées à l'accumulation de petits ajustements adaptatifs, en particulier vestimentaires. Le modèle que nous avons utilisé pour représenter le comportement de l'être humain n'a évidement que la composante objective ; par conséquent, les résultats que nous avons présentés permettront de déterminer quelle est la part subjective du comportement. Il faut noter que le régulateur GBR est utilisé dans le mode 'économe en énergie' puisque le sujet touche d'abord sa tenue avant d'intervenir sur la température de consigne. On peut aussi souligner que, par rapport à ce qui pourrait se passer dans la réalité, le sujet agit avec modération sur la commande, ce qui n'est pas forcément toujours le cas. Dans la réalité, les comportements ne sont pas aussi subtils et immédiats.

2.4 - Résultats : Hiver

2.4.1 - Bâtiments régulés globalement

La plupart des bureaux en France sont régulés en hiver autour d'une température prescrite par la norme [RT 2000]. Dans cette partie, on s'intéresse à la différence de consommation d'énergie en utilisant un régulateur 'adaptatif' et un régulateur classique. L'hypothèse est que l'espace du bureau est chauffé de façon uniforme. Comme dans la section précédente les discussions portent successivement sur les effets de l'inertie des bâtiments, l'isolation des habillements, le confort et la variation de métabolisme.

(a) Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques d'Agen pour la saison hivernale (novembre - avril) ont été adoptées. La dernière semaine de novembre a été choisie pour le dépouillement des résultats. Durant cette semaine (qui était une des semaines les plus froides), la température extérieure varie de -6°C à 11.7°C (cf. *Figure 2.24*). La température moyenne extérieure est de 2.2°C. Notons que les courbes de T_{od} et T_{rm} sont très différentes car la semaine précédante est moins froide.

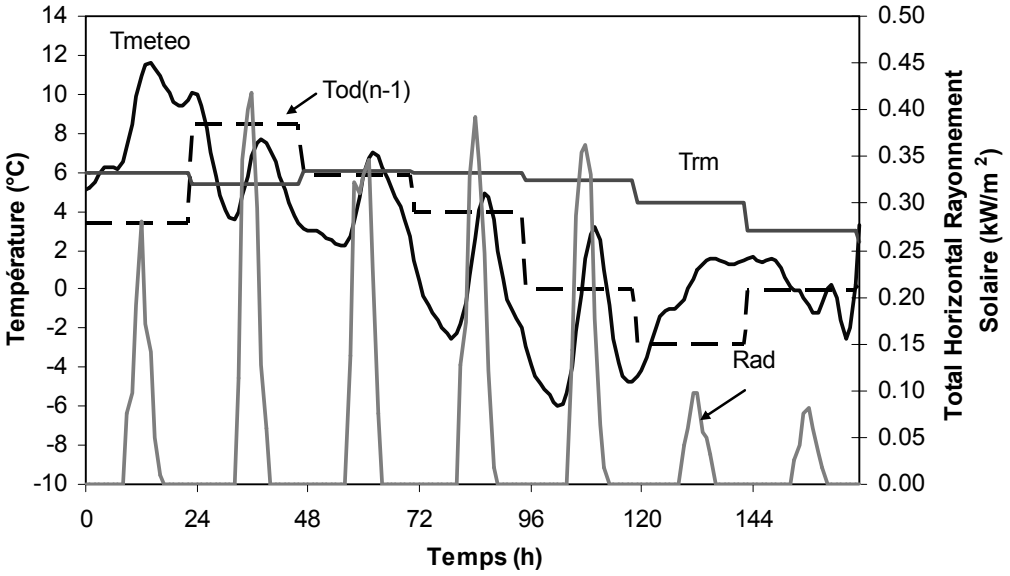


Figure 2.24 : Conditions météo d'une semaine froide en hiver (Agen)

(b) Conditions de simulation

Le système de chauffage est régulé par un contrôleur qui a une bande morte de ±0.5°C et il fonctionne sur la température de l'air intérieur. La puissance fournie par le système est proportionnelle à la différence de température entre les températures intérieure et extérieure.

- Pour le *régulateur SCATs* : La température de régulation est T_{reg} = 22.9°C et l'isolation vestimentaire Icl = 1.0 clo. Il convient de noter que les variables météorologiques utilisées donne une T_{rm} en dessous du 10°C pendant la majeure partie de la saison d'hiver (cf. *Chapitre 1*). Donc, la température du régulateur SCATs reste constante et marche presque comme un régulateur FIX en hiver.
- Pour le *régulateur comportemental - GBR* : T_{reg} est déterminé à chaque pas de temps et les changements d'isolation vestimentaire sont pris en compte ; le mode de régulation est ici aussi le 'mode 3' qui correspond à l'utilisateur économe en énergie. Chaque début de journée, les paramètres T_{reg} et Icl sont réinitialisés (ou '*RESET*') à T_{reg} = 19°C et Icl = 1.0 clo. Cette température correspond à celle indiquée par la 'RT 2000'. Une température basse tel que 18°C est autorisée dans les bureaux ; cependant, nous avons choisi 19°C pour nos simulations car elle est plus proche des recommandations des normes sur le confort [ISO 7730]. Le sujet a une activité de M = 1.2 met = 70 W m^{-2}.

(c) Influence du type de régulateur

La *Figure 2.25* montre la température de régulation (T_{reg}), la température de l'air intérieur (T_{in}), le PMV et la puissance de chauffage (HP). Les températures de surface sont inférieures de 0.2 - 0.3°C à la température d'air intérieur.

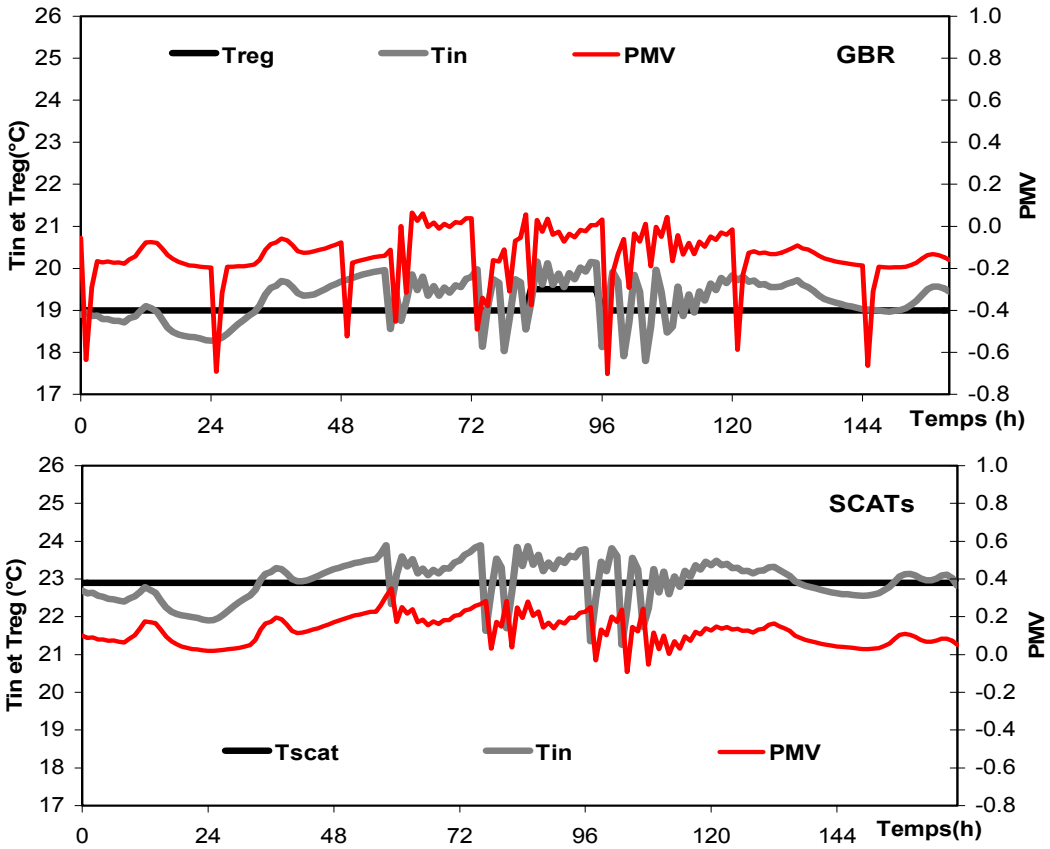


Figure 2.25 : Température de régulation (Treg), température d'air intérieure (Tin), et PMV pour la régulation GBR et SCATs (*bâtiment lourd*)

Dans le cas du GBR, l'individu a besoin d'augmenter à une seule occasion la température de consigne de 0.5°C ; sinon la température reste à 19°C. Ceci se produit le quatrième jour, lorsque la limite vestimentaire atteint 1.4 clo et le PMV est aux alentours de -0.40. Cela signifie que la

personne ayant légèrement froid a augmenté la température de consigne. Plus souvent, le PMV reste dans la zone neutre de -0.20 à 0.20, bien qu'il tende à changer avec la variation de T_{in} et la réinitialisation de Icl à 1.0 clo chaque matin.

Dans le cas du régulateur SCATs, les températures moyennes de T_{in} et T_{surf} pendant la période simulée sont 23.0°C et 22.6°C. Les valeurs de PMV restent dans la zone neutre, mais plutôt dans les valeurs positives.

La consommation totale d'énergie avec le régulateur SCATs pour la semaine est d'environ 535 MJ (149 kWh) contre à 425 MJ (118 kWh) pour le GBR, donc presque 26 % d'énergie supplémentaire consommée. D'ailleurs, ceci est cohérent avec le fait que la température de consigne est plus élevée que celle calculée par le GBR.

(d) Isolation vestimentaire

Les variations d'isolation pendant la semaine froide pour le cas d'un bâtiment léger (LWB) et d'un bâtiment lourd (HWB) avec et sans remise sont montrées sur la *Figure 2.26*.

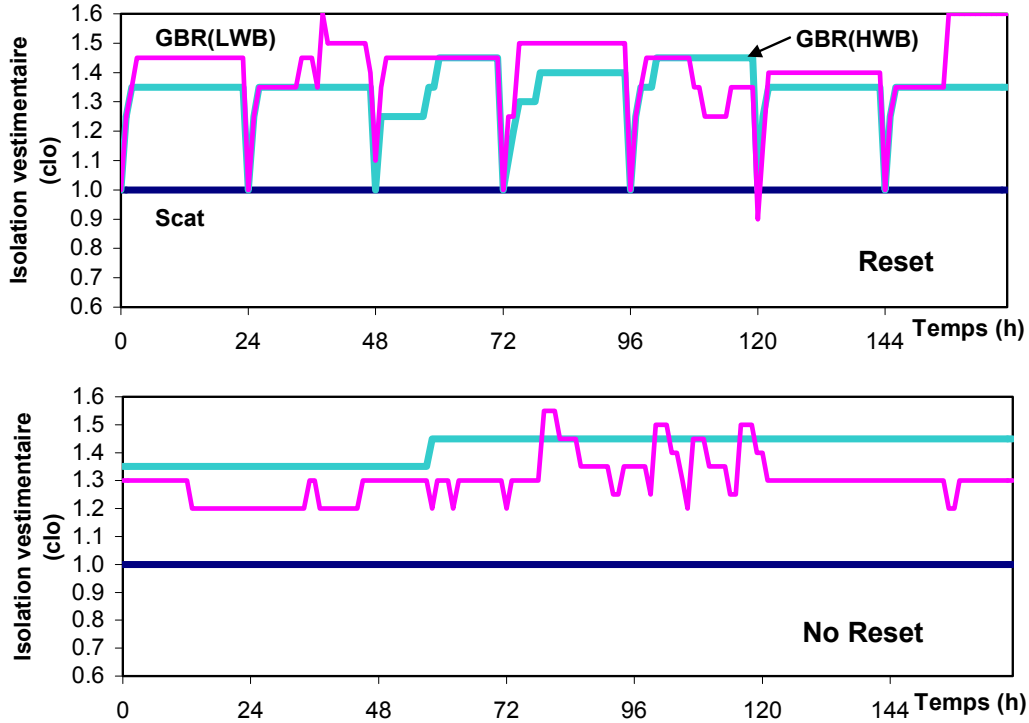


Figure 2.26 : Variations d'isolation pendant la semaine froide en hiver pour le cas léger (LWB) et lourd (HWB) avec remise et sans remise aux valeurs 'standard' le matin

Avec le régulateur SCATs, l'isolation vestimentaire reste à 1.0 clo. Il faut noter que l'on n'a pas utilisé la corrélation entre T_{rm} et les isolations vestimentaires pour chaque jour (cf. *Chapitre 1*). Si cette équation est employée, les valeurs d'isolation obtenues sont entre 0.86 et 0.91 pendant la semaine.

Avec le GBR, un compteur a été ajouté pour calculer le nombre de fois où les changements de vêtements ont été réalisés. Au cours de cette semaine, quand il y a eu des "*RESET*" (ou réinitialisation journalière) - dans le HWB, un total de 18 changements a eu lieu, contre 27 dans le LWB.

Si Icl n'est pas initialisé en début de journée, dans le HWB l'individu fait un seul changement contre 28 changements dans le LWB. Dans le cas d'un bâtiment léger, les tendances à faire des ajustements vestimentaires sont presque semblables, quel que soit l'habillement en début de journée. Cette constatation est tout à fait en accord avec nos conclusions pour les conditions estivales. Ceci signifie qu'il peut être nécessaire dans les bâtiments légers de soulager les

restrictions d'habillement et de permettre à des personnes de choisir leur habillement pour atteindre leur état préféré de confort.

(e) Inertie des bâtiments

Bien que les graphiques ne soient pas présentés ici, quelques valeurs moyennes hebdomadaires des variables sont données dans le *Tableau 2.8*. Avec GBR (no reset) les températures de régulation pour les deux bâtiments sont différentes et, en général, elles sont inférieures à la température de SCATs. Une partie de ces différences peut être expliquée par le fait que les ajustements de vêtements sont possibles, c'est-à-dire en faisant de petits ajustements de 0.1 clo ou plus, comme mettre/enlever un vêtement (une veste, par exemple de 0.25 clo). Quand il y a une remise aux valeurs standard chaque matin avec le GBR, les températures de régulations sont à 19.0°C et 19.5°C pour un bâtiment lourd et léger.

Valeur moyenne sur la semaine	**HWB - Bâtiment inertie lourd**		**LWB - Bâtiment inertie légère**	
	SCATs	**GBR** (no reset)	**SCATs**	**GBR** (no reset)
Treg ± δTreg (°C)	***22.90***	19.50	***22.90***	20.75 ± 0.25
Tin ± δTin (°C)	22.95 ± 0.43	19.74 ± 0.41	22.44 ± 0.81	20.35 ± 0.84
PPD± δPPD (%)	5.45 ± 0.35	5.11 ± 0.10	5.77 ± 0.78	5.55 ± 0.65
Icl ± δIcl (clo)	***1.0***	1.42 ± 0.05	***1.0***	1.30 ± 0.05
Energie Totale *(MJ)*	535	437	523	459
" " " (kW h)	149	121	145	128

Tableau 2.8 : Valeurs moyennes obtenues dans les deux bâtiments avec deux types de régulations

Il est évident que la différence dans l'inertie thermique des murs change les conditions de confort indépendamment du type de régulateur utilisé. La sensation thermique dépend de l'environnement intérieur global, particulièrement des températures des murs. Dans le cas d'un régulateur comportemental global, la légère augmentation d'inconfort dans le bâtiment léger peut être expliquée par les variations observées de T_{reg} et T_{in}, les températures de l'air intérieur dans LWB ayant une plus grande variation journalière que HWB.

(f) Métabolisme

Il est également intéressant de voir le comportement humain pour atteindre le confort lorsque les activités sont diverses et quelles en sont les conséquences. La *Figure 2.27* montre les résultats moyens de PPD et de température de consigne pour les deux régulateurs quand l'activité métabolique varie entre 46 et 140 W m^{-2} dans un bâtiment lourd (moyenne sur un mois).

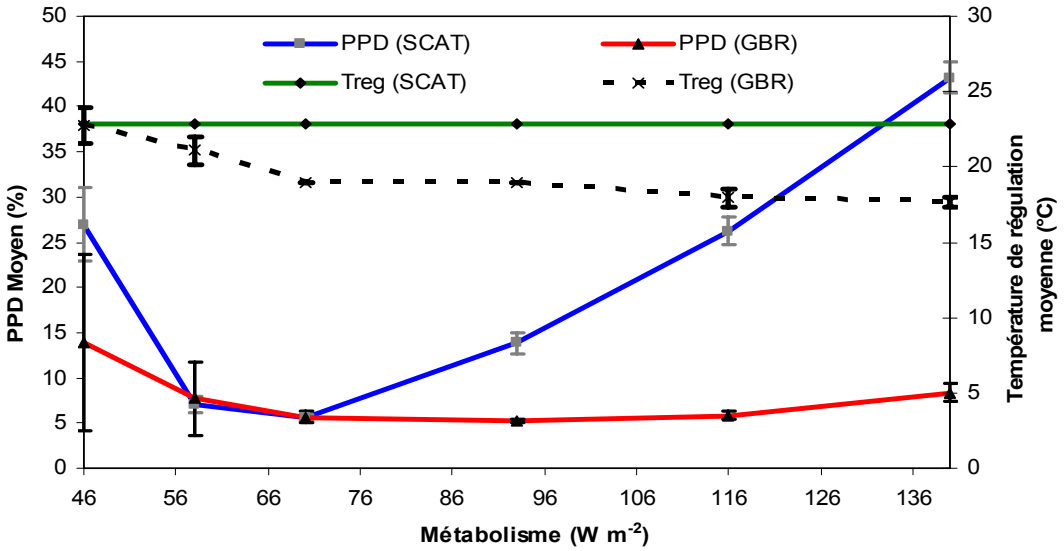


Figure 2.27 : Valeurs moyennes de PPD et de température de consigne pour les deux régulateurs quand l'activité métabolique augmente de 46 à 140 W m^{-2} (bâtiment lourd)

Le graphe montre qu'avec le GBR, pour la plupart des activités 'habituelles', le PPD moyen est inférieur à 10 %. Ce n'est pas le cas pour une température de régulation fixe, car une augmentation de l'activité provoque une forte augmentation du PPD. Ainsi, si l'activité métabolique change et si des actions comportementales sont permises, l'individu peut améliorer son niveau de confort, comparé à une régulation de température fixe. Cet aspect du GBR peut avoir des avantages.

Naturellement, la température d'une consigne fixe peut être abaissée pour des activités plus élevées. Il convient de noter qu'une analyse semblable a été faite également pour le bâtiment léger et que la forme générale des graphiques est la même, mais les écarts du PPD et de la température de régulation sont augmentés.

2.4.2 - Discussion et conclusion

La modélisation du comportement d'un individu n'est pas facile, car souvent les modèles ne tiennent pas compte des changements de l'isolation vestimentaire en réponse aux conditions thermiques. Cependant, Newsham (1997) avait utilisé le modèle 'FENESTRA' pour calculer les ajustements d'habillement toutes les cinq minutes. Mais, dans ses études, l'ajustement de la température de consigne n'a pas été pris en compte. Ses résultats ont montré qu'en hiver, avec un ajustement limité entre 0.75 et 1.0 clo d'une part, et 0.9/1.0 clo avec une température de consigne à 22.35°C d'autre part, des PPD de 7.7 % et 8.1 % ont respectivement été obtenus.

Dans notre étude, plus de liberté est donnée sur la tenue vestimentaire, qui peut aller jusqu'à 1.5 ou 1.6 clo. Les valeurs moyennes d'isolation obtenues par la simulation sont peu réalistes par rapport aux observations sur terrain, par exemple, 1.3 clo [Nicol et al., 1999]. Cependant, le but de cette étude était de regarder le comportement vestimentaire avec un peu plus de liberté et de voir le rôle qu'il pourrait jouer sur le confort, particulièrement lorsque T_{reg} est à 19°C, nettement au-dessous de la température de confort recommandé par le SCATs.

Supposons que nous commençons par une tenue de 1.0 clo, pendant les premières heures de la simulation, les valeurs de PMV sont en dessous de -0.5 et l'individu ajoute un pull de 0.25 clo. Dans les heures qui suivent, il peut faire des changements de 0.1 clo facilement jusqu'à des valeurs d'isolation de 1.35 ou 1.45 clo.

Les valeurs de PPD obtenues dans les deux types de bâtiments sont inférieures à 6.0 %. Dans le cas du GBR, ceci est réalisé avec une température de consigne inférieure mais une isolation des vêtements plus élevée de 0.30 à 0.40 clo. Ceci signifie qu'un changement d'attitude d'habillement pourrait permettre des températures de consigne inférieures ; par conséquent, des économies d'énergie seront réalisées.

La sensation thermique dans les bâtiments légers oscille plus que dans un bâtiment lourd. Une fois le niveau maximum d'habillement atteint, l'individu agit sur la deuxième option disponible. Cela prouve que, dans un bâtiment à faible inertie, l'option pour réaliser le confort à l'aide de l'habillement est plus limitée que dans un bâtiment à inertie plus élevée.

Si les occupants atteignent d'abord la limite maximale d'isolation vestimentaire avant d'avoir la liberté de changer la température de consigne, une économie énergétique notable peut être faite sans changer le niveau de confort.

Plusieurs analyses ont été faites avec d'autres modes de fonctionnement du GBR. Les modes avec les deux ajustements simultanés donnent un PPD inférieur à 10 % pour la plupart des activités habituelles dans le contexte du bureau. Tous les autres modes de comportement sont moins avantageux du point de vue énergétique. Dans l'avenir, encourager les occupants à faire des ajustements personnels peut être une option adaptée pour baisser la demande de consommation des ressources énergétiques dans des proportions quantifiables.

2.5 - Améliorations apportées au GBR

Dans les résultats présentés ci-dessus pour l'été ou l'hiver, nous ne nous sommes pas vraiment focalisés sur les limites vestimentaires. Le modèle fonctionne comme s'il y avait toujours une certaine quantité d'isolation vestimentaire disponible. En réalité, ce n'est pas le cas. Souvent, on observe un habillement prévu par les personnes pour les conditions météorologiques extérieures. En revanche, espérant avoir les conditions intérieures confortables, ils se préparent moins pour des conditions défavorables. D'autre part, même s'il y a un pull disponible, l'individu va-t-il le mettre pour être confortable ? Ainsi, l'aspect aléatoire intervient en partie dans le comportement.

Après ces considérations, nous avons décidé d'améliorer le modèle GBR pour prendre en compte un peu plus les situations réelles. Les trois possibilités suivantes ont été testées :

- modification des limites sur la tenue vestimentaire,
- changement de remise Icl chaque matin,
- fonctionnement aléatoire du mode de régulation du GBR.

2.5.1 - Modification des limites vestimentaires

Nous avons consulté l'étude réalisée par Nicol et ses collaborateurs pendant le projet du SCATs à Lyon (France) pour vérifier les limites du modèle. La base de données dispose des tenues vestimentaires des vrais sujets dans les cinq bâtiments. Tout confondu, les gammes de valeurs obtenues vont de 0.24 à 1.47 clo. La valeur 1.47 clo apparaît une seule fois pour les conditions hivernales, ce qui peut correspondre à une personne frileuse (T_{int} = 21.9°C et la température de confort votée est égale à 1). En général, les résultats des expériences obtenus par Nicol montrent que l'isolation l'hivernale est inférieure à 1.3 clo et supérieure de 0.2 clo en été. Les limites modifiées par rapport à *Figure 2.4* sont marquées en gras dans la figure ci-dessous.

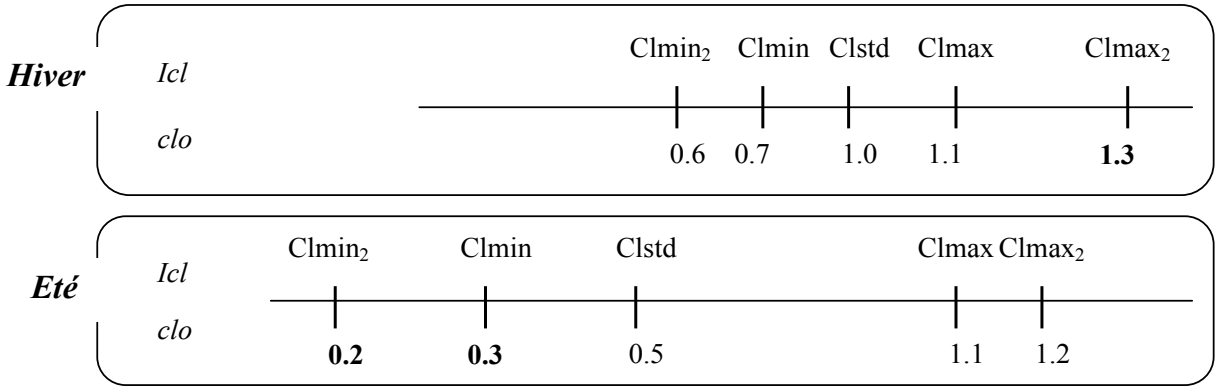


Figure 2.28 : Limites d'Icl modifiées pour le régulateur GBR

La *Figure 2.29* montre les résultats obtenus pour le cas d'un bâtiment lourd avec une limite maximale $Clmax_2$ = 1.30 clo. Il n'y a pas de surprise, car, avec des limites Icl plus basses, l'individu augmente T_{reg}. Ainsi, une réduction de 0.25 ou 0.3 clo, provoque une augmentation d'environ 1°C de la T_{reg}. En conséquence, l'énergie consommée augmente de 5 kWh par rapport au cas précédent.

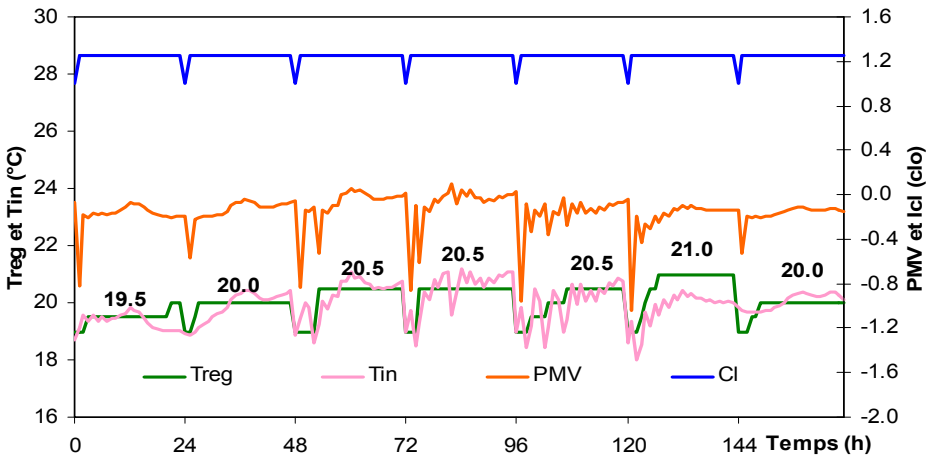


Figure 2.29 : Variations d'isolation Icl, Treg, Tin et PMV pendant la semaine froide avec 'reset aux valeurs standard' (*bâtiment lourd*)

2.5.2 - Changement de remise d'habillement chaque matin

Il faut rappeler que la température T_{rm} prend en compte en partie les conditions météorologiques des journées précédentes. D'autre part, il y a des aspects psychologiques cachés dans les questions que l'individu peut se poser, comme : "Comment j'étais habillé hier ? Est-ce que j'étais suffisamment habillé ? Faisait-il beau ? Est-ce qu'il va pleuvoir aujourd'hui ? etc..". Nous sommes bien informé sur la météo dans notre vie quotidienne (radio, télévision, journaux, etc.). Ceci n'est pas négligeable et a un effet bien plus important que l'on ne pense.

C'est pourquoi il nous semblait intéressant de faire intervenir l'équation suivante donnée dans le *Chapitre 1*, qui relie l'isolation vestimentaire Icl de la journée à la température T_{rm} représentative de l'évolution du climat : $Icl = 0.848 - 0.0136 * T_{rm}$.

Cette valeur de Icl est utilisée pour le reset d'isolation vestimentaire en début de journée. Un exemple de résultat est présenté sur la *Figure 2.30*. L'isolation initiale est d'environ 0.77 clo au lieu de 1.0 clo. On constate que les différences entre les valeurs journalières sont très faibles, de l'ordre de 0.01 à 0.06 clo. Ceci est normal car on voit que la moyenne mobile ne varie pas beaucoup pendant la période étudiée.

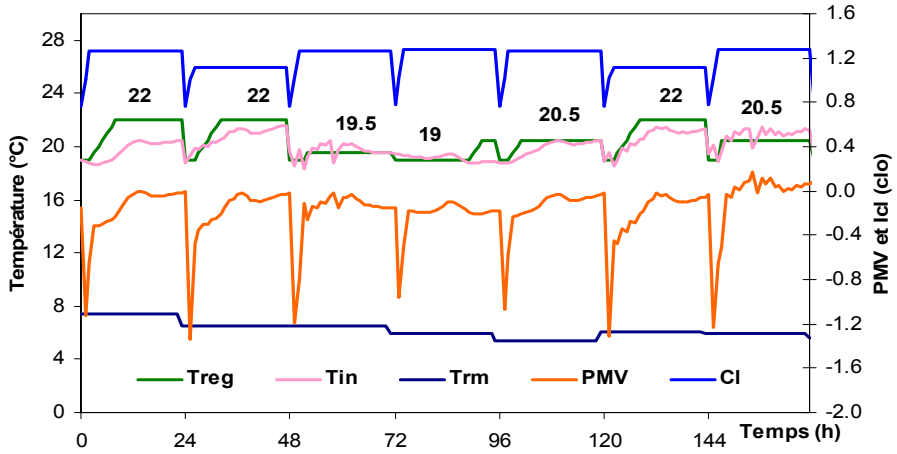


Figure 2.30 : Variations d'isolation Icl, Treg, Tin et PMV pendant la semaine froide avec 'reset Icl = f(Trm)' (*bâtiment lourd*)

Il faut souligner que l'utilisation de la remise à une valeur standard, ou selon l'équation en fonction de T_{rm}, donne des résultats différents. Si on compare les *Figures 2.29 et 2.30*, on voit un changement de ± 1.5°C de la T_{reg}, ce qui a un effet sur la consommation d'énergie.

2.5.3 - Prise en compte d'un fonctionnement aléatoire

Comme on l'a déjà souligné, dans la réalité, les comportements ne sont pas aussi immédiats ou automatiques à chaque instant, c'est-à-dire que, parfois, les gens ne réagissent pas même s'ils le peuvent. Donc, nous avons ajouté dans le modèle GBR un paramètre qui prend en compte l'aspect aléatoire. Par exemple, *une fois sur deux* l'occupant va réagir selon la valeur de PMV et, une fois sur deux, il ne va rien faire même si il a chaud ou froid. On utilise l'équation de Icl = f(T_{rm}) (cf. ci-dessus) pour calculer la valeur d'isolation vestimentaire chaque matin.

Parmi les cas simulés pour l'hiver et l'été, nous avons choisi le cas d'un bâtiment lourd naturellement ventilé en été pour nos discussions. La *Figure 2.31* présente les conditions météorologiques (en moyenne $T_{météo}$ = 21.3°C) et les conditions intérieures (en moyenne T_{in} = 25.3°C). On constate qu'avec la réponse aléatoire, les ajustements sont modifiés. Sur la période de huit jours, on trouve un isolation moyenne de 0.45 clo et PPD moyen de 7.6 %.

Au niveau des ajustements, on trouve 31 petits ajustements et 5 grands ajustements. C'est-à-dire que les petits ajustements sont accomplis presque 3 ou 4 fois par jour, en revanche les grands changements sont moins fréquents.

Nous constatons que l'isolation vestimentaire des sujets peut varier sur une plage très large dans le cas d'un bâtiment naturellement ventilé. Donc, on peut trouver des sensations différentes pour la même valeur de la température de confort. La *Figure 2.32* montre les valeurs possibles pour PMV et Icl selon s'il y a ou non l'option aléatoire.

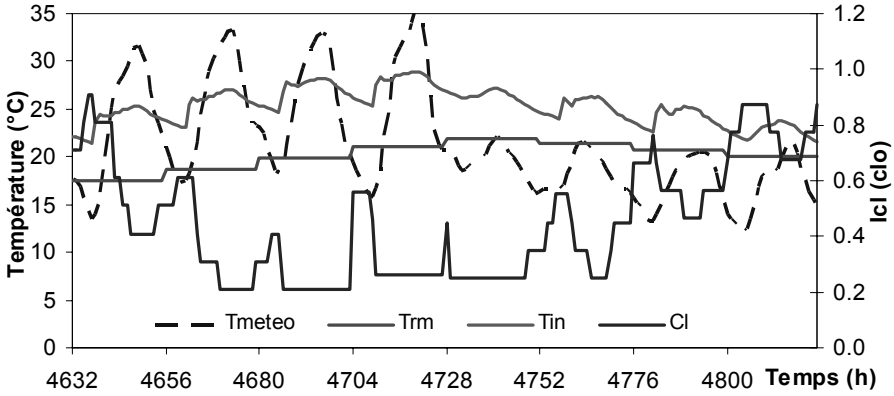


Figure 2.31 : Conditions météorologiques et les conditions intérieures d'un bâtiment lourd, avec les ajustements vestimentaires aléatoire

La courbe de Icl peut être décrite comme un 'S' retourné dans les deux cas, mais elle est beaucoup plus lisse dans le cas 'aléatoire' avec l'option Icl = f(T_{rm}) (*à droite*). On observe que, grâce à la remise de Icl différent chaque matin, le nuage de points des PMV est élargi.

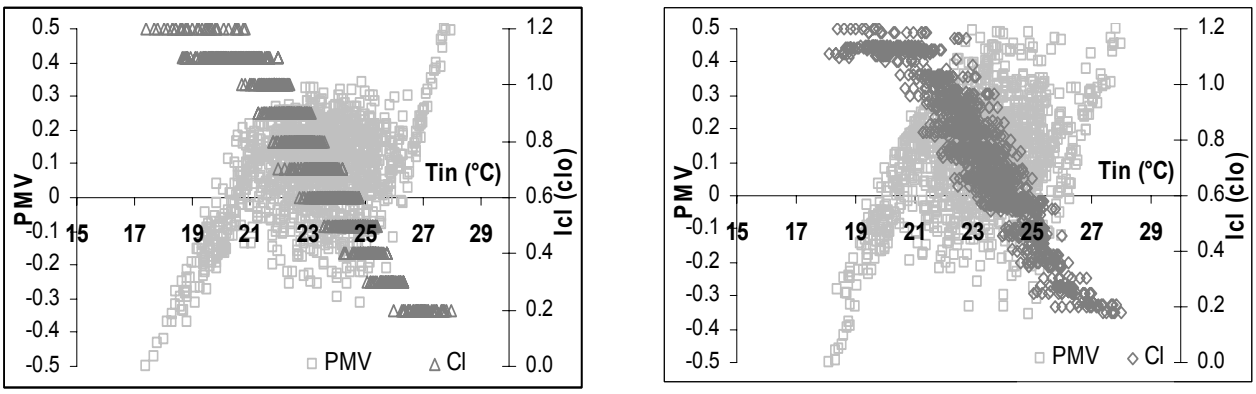


Figure 2.32 : PMV et Icl en fonction de Tin pour le cas sans (gauche) et avec (droite) le comportement aléatoire *(Bâtiment lourd naturellement ventilé)*

2.6 - Conclusion

Le modèle que nous avons développé dans ce chapitre avait pour but de représenter une partie de la complexité du comportement humain face à une situation d'inconfort. Plusieurs conclusions peuvent être émises :

- le modèle est satisfaisant qualitativement : le comportement qu'il prévoit est plausible et reflète bien ce que chacun a expérimenté ;
- le PMV est un indice basé sur des résultats statistiques moyens, il s'ensuit que les valeurs de température de confort obtenues ne sont pas toujours cohérentes avec les valeurs prévues. De plus le PMV est valable que dans un régime permanent et en ambiance homogène. Ces aspects peuvent être améliorés par utilisation d'un modèle thermo-physiologique simple comme le modèle de Gagge (cf. *Chapitre 1*). Par contre, un modèle simple reste insuffisant pour quantifier une ambiance vis-à-vis du chauffage local, donc un modèle thermo-physiologique multi-nœuds est nécessaire.
- le modèle de régulateur local peut être plus représentatif d'un individu si on fait appel à une part aléatoire dans le comportement ;
- enfin, l'intérêt le plus important des simulations est de pouvoir quantifier l'impact énergétique des comportements individuels.

Dans une situation où l'individu est mis devant ses responsabilités, la démonstration a été faite dans un certain nombre de cas (bâtiments de plus ou moins forte inertie thermique, climatisé ou non) que les ajustements individuels produisent des économies d'énergie importantes. C'est là que se situe le nœud du problème, car la diversité des ressentis peut engendrer des ajustements individuels différents.

La conclusion est donc que pour faire une étude plus poussée sur le confort individuel, le perfectionnement du modèle est nécessaire, mais, même avec une représentation très simple du sujet à l'aide du PMV, les premiers résultats sont relativement encourageants.

CHAPITRE 3
Etudes Expérimentales

Nous utilisons des modèles de comportement thermique de l'homme (thermo-physiologie et sensation) et de rayonnement infrarouge qui ont déjà été validés dans diverses configurations plus ou moins complexes, mais jamais dans des configurations telles que le système de chauffage local. Par conséquent, il était important de valider nos modèles par comparaison avec des expériences spécifiques.

Ce chapitre est donc consacré à la description des expériences ; il est divisé en deux parties : la première partie s'intéresse aux expériences faites en chambre climatique avec le mannequin thermique MARIA et la deuxième partie s'intéresse aux expériences effectuées dans un bureau avec des personnes. Ces deux travaux expérimentaux ont été faits au laboratoire du DEM de Coimbra et leurs objectifs sont différents.

Les expériences avec le mannequin ont été faites pour valider le modèle de calcul de flux infrarouge dans le cas d'un système de chauffage local (LHS). Le modèle de rayonnement infrarouge qui sera détaillé dans le *Chapitre 4* est utilisé pour le calcul de flux radiatifs locaux ; la comparaison avec les mesures faites grâce au mannequin nous permettra de valider les résultats et d'analyser les échanges radiatifs locaux lorsqu'un corps est soumis à une ambiance radiative très hétérogène due au (LHS).

Les expériences décrites dans la deuxième partie ont été réalisées avec des sujets dans un bureau et ont été conduites par Gaspar (2004) lors de sa thèse. Nous cherchons à comprendre pourquoi les gens réagissent sur le système de chauffage mis à leur disposition, en fonction des sensations thermiques notées. Les analyses vont nous aider également à mieux comprendre le comportement technologique (changement de puissance/température de panneau), afin de créer le modèle de *régulateur comportement local* (LBR).

3.A - Expérimentation dans une *chambre climatique* avec un *mannequin thermique*

Les expériences se sont déroulées sur une période de deux semaines à Coimbra (Portugal) en octobre 2004. Le protocole expérimental a été élaboré grâce à une collaboration entre nos deux équipes. Le mannequin thermique MARIA a été placé dans la chambre climatique et a été soumis à un certain nombre de conditions thermiques.

3.A.1 - Matériel et Méthode

3.A.1.1 - La chambre climatique

La chambre climatique a les dimensions d'un bureau, c'est-à-dire 4.8 m x 4.8 m x 3 m comme le montre la *Figure 3.1*, avec un volume total d'environ de 69 m^3. Le climat intérieur est contrôlé grâce à un soufflage basse vitesse par la totalité de la surface du plancher grillagé. Les murs étant bien isolés, on peut supposer qu'ils ont une température égale à celle de l'air. Toutes les données de la chambre climatique sont enregistrées et contrôlables par un ordinateur [Gaspar, 2004]. Une fenêtre dans la salle de contrôle permet à l'expérimentateur de suivre visuellement les essais.

3.A.1.2 - Le bureau équipé du LHS

Le bureau est un bureau classique équipé du système de chauffage local. Le dessus *du bureau* (Table Top) fait 0.80 m de large sur 1.60 m de longueur (*Figure 3.2*). La jupe de table qui est à l'avant du bureau mesure 0.45 m de hauteur et fait toute la longueur de la table. Les systèmes de chauffage locaux (LHS) sont intégrés à la structure du bureau.

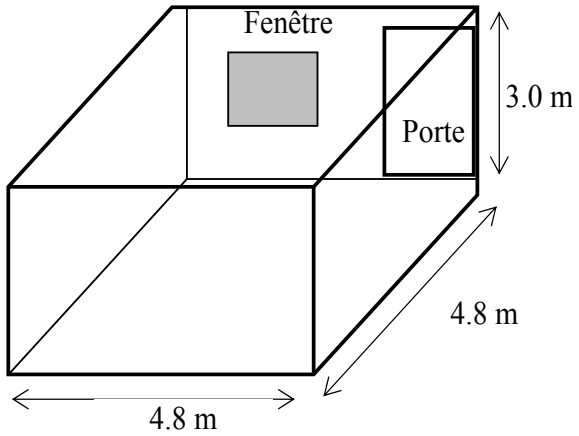


Figure 3.1 : Dimensions de la chambre climatique

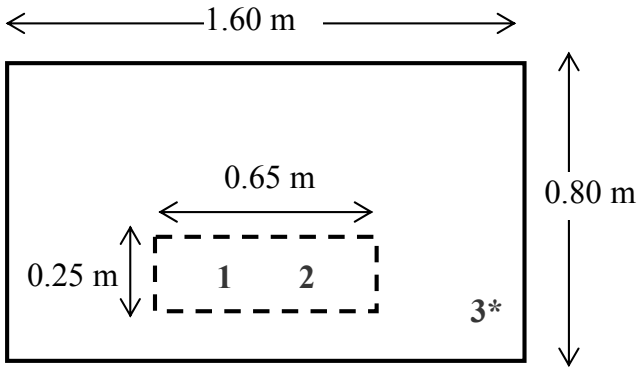
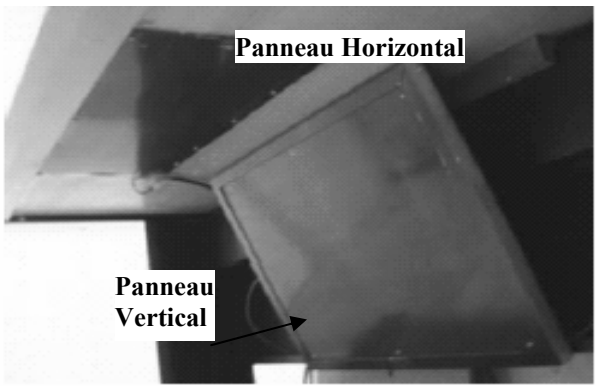


Figure 3.2 : Dimensions du dessus du bureau et position du panneau horizontal en dessous de la table (les numéros indiquent les positions des thermocouples : 1 et 2 sont au-dessus et 3* en-dessous)

Le système de chauffage local se trouve sous le bureau ; il est composé d'un panneau horizontal (fixé sous la table), d'un panneau vertical (proche de la jupe) et d'un chauffe-pieds (*Figure 3.3*) posé au sol. Le panneau vertical est légèrement incliné par rapport à la verticale.



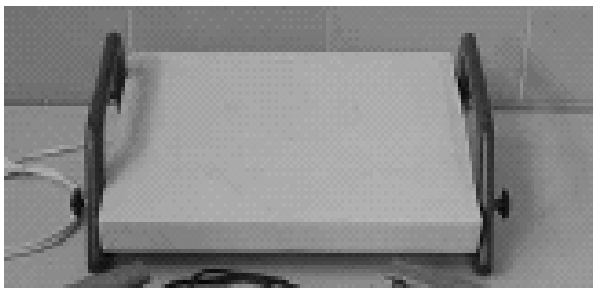


Figure 3.3 : Photo du dessous de bureau :
à gauche, panneau horizontal et panneau vertical ;
ci-dessus, le chauffe-pieds

Les dimensions externes des panneaux et les surfaces sont données dans le *Tableau 3.1*.

Panneau	Largeur (m)	Longueur (m)	Surface (m²)	Puissance Max. (W)	Densité (W/m²)
Horizontal	0.25	0.65	0.1625	133	818.46
Vertical	0.45	0.65	0.2930	133	453.92
Chauffe-pieds	0.45	0.35	0.1550	25	161.29

Tableau 3.1 : Largeur, longueur et aire, puissance et la densité de flux des panneaux de LHS.

Malgré leur différence de taille, les panneaux horizontal et vertical ont les mêmes résistances électriques de 396 Ω, qui peut aller jusqu'à 133 W (à 230 V). Par contre, le chauffe-pieds délivre une seule puissance de 25 W.

3.A.1.3 - Mannequin thermique 'MARIA'

Le mannequin thermique nommé 'MARIA' est un mannequin thermique fabriqué par *PT-Teknik* au Danemark. Il existe dans le monde plusieurs exemplaires de mannequins fabriqués par ce laboratoire, par exemple le mannequin Victoria chez Parsons (*Human Thermal Environment Laboratory*) en Angleterre.

Un mannequin thermique est tout simplement un mannequin chauffé, qui permet de simuler les transferts thermiques secs et humides entre l'homme et son environnement (cf. *Chapitre 1*).

En général, tous les mannequins fabriqués par PT-Teknik ont à peu près la même constitution. Ainsi, le corps de MARIA est moulé en fibre de verre de polyester (4 mm) de haute qualité. Les segments sont fixés entre eux avec des anneaux en aluminium au niveau des articulations : poignets, cou, genoux, etc. Chaque grand segment peut être indépendant.

Pour une représentation correcte du corps humain, l'élément chauffant est placé sur toute la surface externe du mannequin. La constante de temps est de moins de 5 minutes, elle est réduite par l'utilisation du même fil de nickel pour chauffer le mannequin, mesurer et contrôler la température de surface [Tanabe et al., 1994]. Le fil de nickel pur de 0.3 mm de diamètre est soigneusement enroulé sur la surface et enfoncé dans le polyester et la résine du polyuréthane (qui est solide et conduit la chaleur). Le fil est placé partout sur chaque segment avec une distance calculée précisément (la distance maximale est de 2 mm) afin d'avoir une bonne uniformité. Pour le corps entier, 700 m de fils de nickel ont été utilisés. La *Figure 3.4* montre le visage et le tronc enroulés avec les fils pendant la phase de constitution.

Figure 3.4 : Fils de nickel pur enroulant le visage et le tronc (PT-Teknik, 2004)

Comme la plupart des mannequins, MARIA est divisé en 16 segments (*Figure 3.5*). Chaque segment a son propre micro-système de contrôleur, qui mesure la température de surface et la résistance du nickel. Ensuite, il calcule la puissance nécessaire et commande un commutateur pour le chauffage. Donc, lors des expériences, le système mesure la température (grâce à la mesure de résistance électrique de nickel) et la puissance simultanément (mesures électriques 'Intensité' (I) et 'Tension' (V)). En supposant que les apports sont égaux aux pertes de chaleur, la mesure de la puissance de chauffage permet de connaître les flux perdus en surface.

Il faut noter que, lors du démarrage en début d'expérience, la résistance est mesurée et, ensuite, on commande la puissance nécessaire pour chauffer le mannequin.

Les contrôleurs sont conçus avec une grande attention pour éviter leurs propres échauffements et ils ont une consommation d'énergie négligeable. La commande de puissance est rapide, stable et précise. La puissance fournie est de 24 V/40 Hz et commandée en signal on/off qui dépend du pas de temps. Tous les outils de mise en forme et de calibrations sont également stockés à l'intérieur de chaque segment. Ce moyen permet à un segment de fonctionner normalement quand il est séparé du reste du corps d'un mannequin [PT-Teknik, 2004].

n°	Nom du segment	Aire (m²)
1	Pied Gauche	0.044
2	Pied Droit	0.044
3	Jambe Gauche	0.090
4	Jambe Droit	0.090
5	Cuisse Gauche	0.175
6	Cuisse Droit	0.175
7	Pelvis	0.175
8	Tête	0.122
9	Main Gauche	0.040
10	Main Droit	0.040
11	Avant bras Gauche	0.051
12	Avant bras Droit	0.051
13	Bras Gauche	0.080
14	Bras Droit	0.080
15	Thorax	0.157
16	Dos	0.229
	Total	**1.642 m²**

Figure 3.5 : Le mannequin MARIA divisé en 16 segments avec les aires de chaque segment

Actuellement, le mannequin MARIA est régulé selon le mode basé sur l'échange thermique, comme le fait l'homme en condition de confort, c'est-à-dire avec l'équation suivante :

$$T_{sk} = 36.4 - 0.054Q_t$$

Le mannequin possède son propre système d'acquisition. Le logiciel 'MANIKIN' permet de présenter les températures et les puissances pour les 16 segments du corps sur un écran d'ordinateur (*Figure 3.6*). Ce programme stocke toutes les valeurs, chaque minute, dans un fichier.

Sur la *Figure 3.6*, figurent à gauche les numéros et les noms de chaque partie du corps. Les températures et les densités de flux perdus par chaque segment sont listées à droite. On peut également suivre la variation de la température et du flux moyen pour le corps sur une courbe pendant l'expérience.

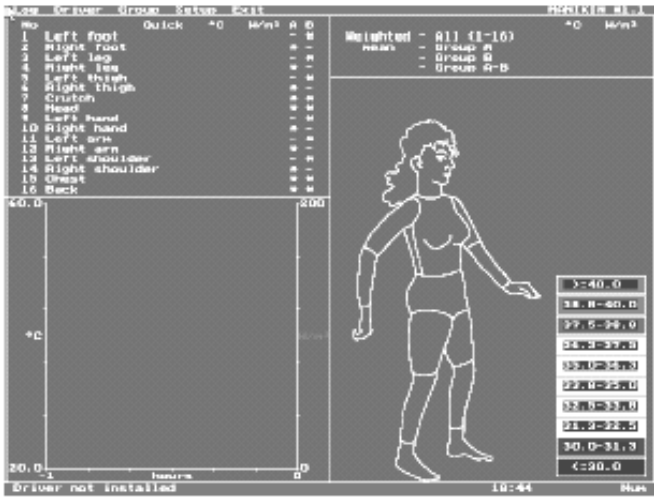


Figure 3.6 : Copie d'écran de l'interface graphique de 'MANIKIN'

3.A.1.4 - Les mesures

Les mesures des variables climatiques dans la chambre sont faites par une *sonde T1213* (*Figure 3.7*) de Brüel et Kĵaer (1990). Le T1213 contient cinq capteurs qui mesurent la température et la vitesse de l'air, l'humidité relative, l'asymétrie de température de rayonnement et la température opérative. Cet instrument est conforme à la norme d'ISO 7726 (1998).

Trois globes noirs (fabriqués en cuivre, diamètre 5 cm et émissivité de 0.95) ont été placés à trois niveaux : pieds, jambes et cuisses (*Figure 3.7*). Des thermocouples de types K et T ont été employés pour d'autres mesures de températures faites sur les panneaux et sur la table (*Figure 3.8*). Les températures de murs ont été mesurées simultanément avec un thermomètre infra-rouge de la gamme TESTO (modèle : 860-T2).

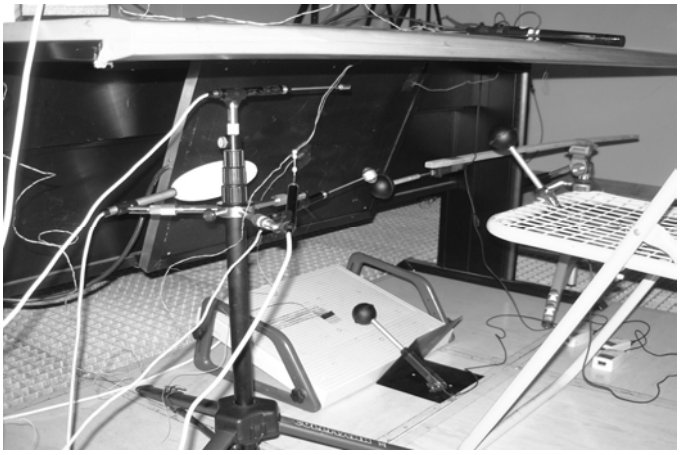


Figure 3.7 : Sonde T1213 et globe noir mesurant l'ambiance locale

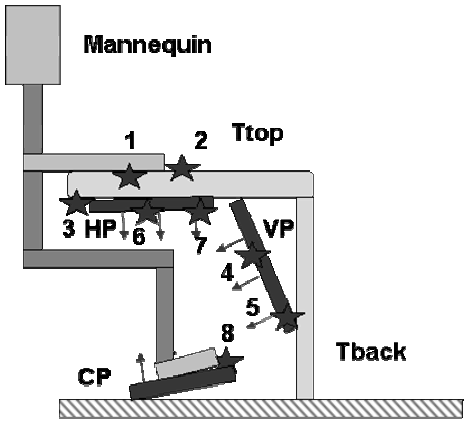


Figure 3.8 : Positions des thermocouples sur le bureau et les panneaux

Lors de chaque essai, les cinq capteurs du T1213 mesurent l'ambiance sous le bureau. Un autre capteur de température opérative a été ajouté loin du bureau pour avoir une idée sur l'ambiance moyenne dans la chambre climatique. Les valeurs des mesures sont relevées et notées toutes les 15 minutes.

En ce qui concerne les données de MARIA, les températures et flux des 16 segments sont enregistrés et stockés dans un fichier par pas de temps d'une minute. Le software PICO (Pico Technologie) nous a permis l'acquisition des données des thermocouples du bureau et des panneaux.

Au total, au cours des essais, les variables suivantes ont été enregistrées :

Mannequin	Flux sensibles de 16 segments	φS_i	(W m^{-2})
	Température de 16 segments	$T_{sk,i}$	(°C)
T1213	Température de l'air (au dessous de bureau)	T_a	(°C)
	Différence d'Asymétrie de température de rayonnement	ΔT	(K)
	Vitesse d'air	v	(m/s)
	Température opérative	T_{op}	(°C)
Top Extérieure	Température opérative (hauteur de 0.6 m)	$T_{op\ ext}$	(°C)
Puissances panneaux	1*HP, 1*VP, 1*CP	Φ	(W)
Thermocouples	5*Températures de la table (2*dessus et 1*dessous)	Ttop, TBack	(°C)
	5*Températures de panneaux (2*HP, 2*VP et 1*CP)	T	(°C)
TESTO	1 température moyenne pour les murs	T_{mur}	(°C)
Globe noir	3 niveaux –cuisse, jambe et pied	T_{bg}	(°C)
Humidité	1*RH dessous de plancher de la chambre	RH	(%)

3.A.1.5 - Méthodologie

Une des premières étapes du travail expérimental est la calibration du mannequin et des thermocouples avant de lancer l'essai. MARIA est calibrée par son propre programme d'auto-calibration. Elle est mise en position allongée sur un lit métallique dans la chambre climatique (*Figure 3.9*). La calibration est faite dans cette position pour avoir des températures et vitesses d'air uniformes autour du corps. Si le mannequin est assis/debout on peut constater une stratification de l'air, c'est-à-dire un air plus chaud au niveau de la tête que des pieds. Deux températures d'air, 25°C et 36°C sont utilisées pour réaliser la calibration.

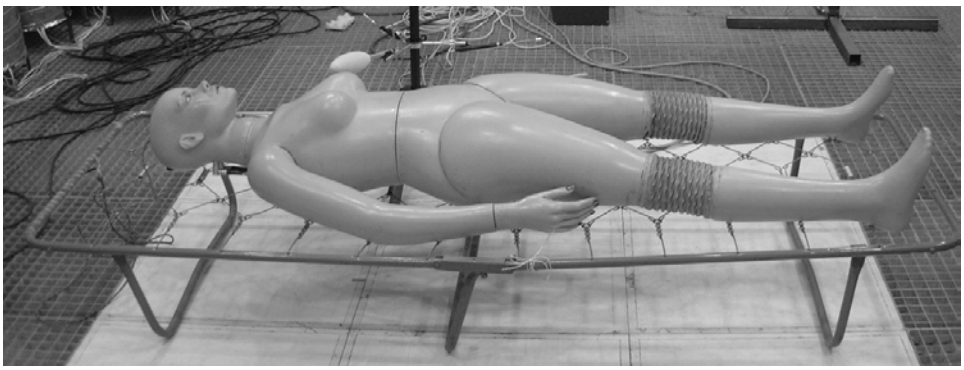


Figure 3.9 : Position allongée de MARIA pendant la période de calibration

Les thermocouples de types K et T sont calibrés par bain chaud à différentes températures : 15, 40 et 90°C, pour couvrir un large champ de températures. Il faut noter qu'on n'a pas eu les moyens ni le temps de calibrer tous les instruments. Une fois la calibration terminée, la réalisation des diverses configurations peut débuter. Toutes les études ont été faites à une température opérative de 18.0 ± 0.3°C. Il faut plusieurs heures pour atteindre une température basse dans la chambre. L'expérience commence quand la chambre arrive à un état de stabilisation.

Les premiers essais ont lieu dans les configurations sans table (MNU) et avec table LHS éteint (MNUT) (*Figure 3.10*). Par la suite, plusieurs essais ont été faits pour voir l'influence du système de chauffage local dans diverses configurations de fonctionnement. Dans tous les essais, le mannequin est nu afin de ne pas avoir d'incertitude sur la température de surface qui pourrait être

liée au vêtement Le *Tableau 3.2* donne toutes les configurations de panneaux que l'on a testées. Différentes puissances et combinaisons des panneaux ont été essayées, par exemple dans la "*configuration 10"*, le panneau vertical fonctionne avec une puissance de 90 W, le panneau horizontal à 68 W et le chauffe-pieds à 25 W.

Figure 3.10 : Configuration expérimentale : 'Maria' nu sans et avec bureau.

Essai	Nom	Panneau Horizontal HP (W)	Panneau Vertical VP (W)	Chauffe-pieds CP (W)
0	**MNU**			
0_T	**MNUT**			
1	**35H**	35		
2	**68H**	68		
3	**90H**	90		
4	**133H**	133		
5	**35V**		35	
6	**68V**		68	
7	**90V**		90	
8	**133V**		133	
9	**25CP**			25
10	**68H- 90V**	68	90	25
11	**90H-90V**	90	90	25
12	**90H-133V**	90	133	25

Tableau 3.2 : Configurations de puissance des panneaux pour les différents essais

3.A.2 - Présentation des Résultats Expérimentaux

La plupart des mesures ont été réalisés selon la norme ISO 7726 (1998). La *Tableau 3.3* montre les valeurs d'humidité relative (RH), la température d'air (T_a), la température opérative sous le bureau (T_{op}) la température opérative à hauteur de 0.6 m (T_{op_ext}), la température des parois de la chambre (T_{murs}), la température de globe noir T_{bg} à trois niveaux (cuisses, jambes et pieds), les températures du bureau (Ttop et Tback), les trois températures des panneaux chauffants pour chaque essai.

Dans certaines situations (*), nous avons dû prendre des valeurs hypothétiques pour les températures des murs, car nous ne disposions pas de mesures réelles. Il faut remarquer que la température opérative globale (T_{op_ext}) reste bien à 18 ±0.1°C pour tous les cas (sauf les deux premiers). Au niveau local en général, les deux températures T_a et T_{op} (mesurées à proximité du mannequin et du panneau) varient et augmentent lors d'expérience. La vitesse d'air est notée zéro ; en fait, elle est en moyenne inférieure à la précision de la sonde.

EXP	RH* (%)	Ta (°C)	Top (°C)	Top_ext (°C)	Tmurs (°C)	Tbg_cuis (°C)	Tbg_ja (°C)	Tbg_pi (°C)	Ttop (°C)	Tback (°C)	HP (°C)	VP (°C)	CP (°C)
MNU	52.0	18.4	-	18.5	18.0*	-	-	-	-	-	-	-	
MNUT	47.0	18.6	-	18.6	18.0*	-	-	-	-	-	-	-	-
HP_OFF	52.0	18.7	18.9	17.9	17.9	-	-	-	18.5	17.4	**19.3**	18.9	16.8
35H	52.0	19.0	19.5	18.0	17.9	21.1	20.5	19.7	30.6	18.2	**36.0**	19.8	17.3
68H	54.0	19.6	20.1	18.0	17.9	21.7	20.7	19.7	39.0	18.5	**49.9**	20.4	17.3
90H	57.8	19.9	20.6	18.0	17.9	22.3	21.1	19.8	44.9	18.7	**59.9**	21.1	17.5
133H	58.3	20.5	21.7	18.0	17.7	23.3	21.5	20.1	54.6	19.4	**76.2**	22.2	17.6
VP_OFF	65.0	18.7	18.6	17.8	17.6	20.4	20.0	19.4	18.9	17.6	19.4	**19.1**	16.9
35V	71.0	19.0	20.1	17.9	17.6	20.6	20.9	19.7	19.7	19.0	20.8	**30.8**	17.5
68V	71.0	20.0	21.0	18.0	17.6	21.0	21.8	20.1	20.2	19.6	22.2	**41.0**	17.6
90V	70.5	20.7	20.9	18.0	17.6	21.4	22.6	20.4	20.7	20.1	23.4	**47.8**	17.7
133V	69.8	20.6	21.6	18.0	17.6	21.8	23.7	20.8	21.2	20.6	25.5	**60.1**	17.8
CP_OFF	65.0	19.0	18.5	17.9	17.7*	-	-	-	-	-	-	-	-
25CP	65.0	19.2	18.6	17.9	17.7*	20.5	20.4	20.0	19.3	18.5	20.0	19.8	**40.1**
68H90V	65.3	21.5	21.8	18.0	17.7*	22.9	23.4	21.2	40.8	20.0	**54.3**	**47.2**	**42.7**
90H90V	63.0	21.7	22.1	18.0	17.7*	23.4	23.6	21.2	44.9	20.1	**61.4**	**47.5**	**42.9**
90H133V	63.0	21.9	23.1	18.1	17.7*	24.0	24.8	21.6	46.0	20.6	**64.0**	**60.7**	**43.9**

Tableau 3.3 : Les valeurs d'ambiance et des surfaces pour chaque essai

Dans les parties suivantes, on se concentre plus sur le flux sensible (φS) du mannequin et les valeurs moyennes des flux sensibles des segments (φS_i) pour tous les essais effectués.

3.A.2.1 - Mannequin nu sans table et avec table

Dans un premier temps, nous comparons les essais réalisés sans table (MNU) et avec la table (MNUT), afin de déterminer l'influence de la présence de la table. Les essais se sont déroulés à des températures opérative (T_{op}) et d'air (T_a) de 18.5°C environ. Les vitesses de l'air restent très basses $0 < v_a < 0.1$ m/s. Dans les deux expériences, le flux sensible global reste autour de 96.5 W m^{-2}.

Les densités de flux sensible perdus par les segments dans les deux cas sont représentées sur la *Figure 3.11*.

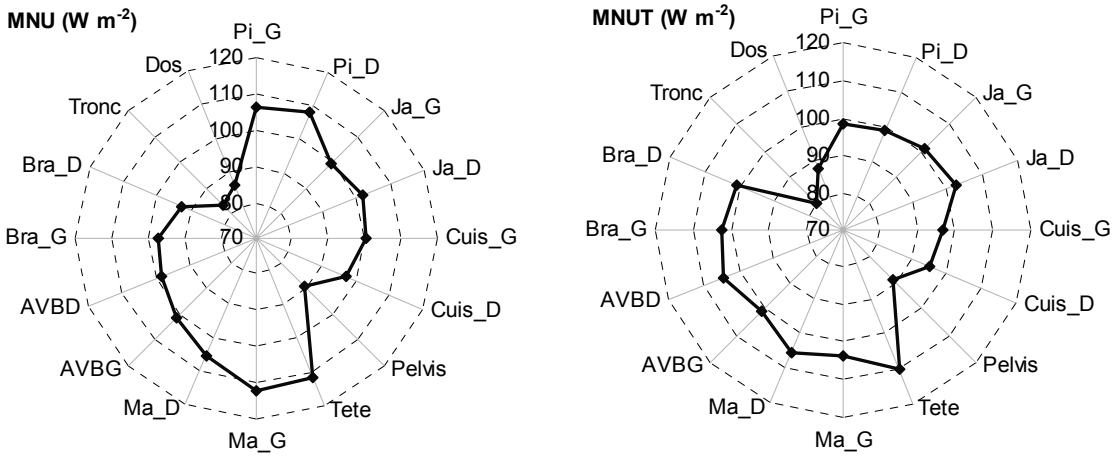


Figure 3.11 : Densités de flux sensibles des segments pour les essais sans table (MNU) et avec table (MNUT)

On constate une nette différence entre les deux configurations. Il y a peu de modifications pour les segments supérieurs (tête, tronc, etc.). Par contre en ajoutant la table, on observe une baisse de flux, particulièrement sur les pieds ($\Delta\varphi S_i$ = 10 W m^{-2}) et les cuisses ($\Delta\varphi S_i$ = 3 W m^{-2}). D'autres segments, comme les jambes et les bras, montrent une légère augmentation de flux sensible. On peut donc conclure que la table modifie la répartition des échanges au niveau local, mais très faiblement ($\Delta\varphi S$ = 1 W m^{-2}) au niveau global.

On peut remarquer que la répartition des densités de flux locales est différente, bien que l'ambiance soit homogène : 90 W m^{-2} pour le pelvis et un peu plus de 110 W m^{-2} pour la tête (dans

le cas MNU). Ceci est en partie dû au rétro-rayonnement. En présence de la table, les flux semblent plus homogènes.

Bien que l'ambiance soit totalement symétrique thermiquement, on observe des écarts dans les valeurs de flux entre la gauche et la droite, particulièrement sur les mains et les avant-bras. Ceci vient peut-être de la fabrication du mannequin, mais surtout de sa position. La main gauche est posée à plat sur la table et la main droite, surtout au niveau des doigts, frôle la surface (*Figure 3.10*). L'avant-bras gauche touche la surface de table, mais par contre le contact de l'avant-bras droit est moindre. Donc, les résultats pour ces segments devraient être interprétés avec prudence. Ces parties ne seront discutées qu'avec les valeurs moyennes, par exemple, pour les mains :

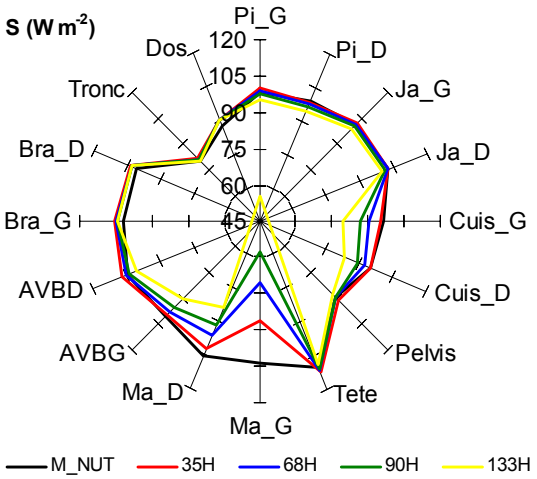
$$\varphi S_{mains} = \frac{\varphi S_{mainG} + \varphi S_{mainD}}{2} = \frac{112+106}{2} = 109 \pm 3\, Wm^{-2}$$, soit environ 3 % d'erreur de mesure.

3.A.2.2 - Mannequin avec un panneau à plusieurs puissances

Plusieurs configurations avec le panneau horizontal (HP) et vertical (VP) ont été testées. On détaillera les résultats des températures de panneaux et des flux sensibles, d'abord avec HP, ensuite avec VP et CP, et enfin avec d'autres configurations.

(a) Panneau Horizontal (HP)

Les évolutions de la température moyenne des panneaux ainsi que du dessus (Ttop) et du dessous (Tback) de la table sont données dans le *Tableau 3.3*. La température de HP varie de 20 à 75°C et Ttop varie de 18.5 à 55°C ; les autres températures varient peu et restent autour de 20°C. Dans cette situation, quand le HP est à 35 W, le flux sensible global est environ de 97 W m^{-2}. Par contre lorsque la puissance maximale de 133 W est atteinte, cette valeur diminue à 90 W m^{-2}.



Densité moyenne de flux (W/m²)
MNUT : 96.1
35H : 96.6
68H : 94.6
90H : 93.0
133H : 89.7

Figure 3.12 : Densités de flux sensibles locaux aux différentes puissances du panneau horizontal (HP)

On peut tirer les conclusions sur les flux sensibles locaux (*Figure 3.12*) suivantes :

- Les grands segments comme le tronc, la tête, le dos et le pelvis montrent une très légère baisse de flux avec l'augmentation de la puissance de HP. En fait, ils sont en quasi-stabilité et les valeurs sont inchangées par rapport à la configuration panneau éteint.
- Les mains perdent en moyenne 94 W m^{-2} (HP = 35W) et environ 60 W m^{-2} (HP = 133 W). Pour les avant-bras l'écart moyen est plus faible ; ils perdent 104 W m^{-2} (HP = 35 W) et 96 W m^{-2} (HP = 133 W). On constate que la température de la surface Ttop intervient pour minimiser la perte de chaleur pour ces segments. Le panneau chauffant n'étant pas isolé, il arrive à chauffer la table de manière significative, car la température augmente de plus de 30°C.

- La partie inférieure du corps, comme les pieds et les jambes, montre une baisse de flux sensible de l'ordre de 3 W m^{-2} quand la puissance est à 133 W. L'explication reste simple : les jambes et les pieds ne reçoivent pas beaucoup de chaleur du panneau horizontal. Il est évident que ce sont les cuisses qui changeront beaucoup plus, environ de 12 à 15 W m^{-2} (écart maximal).

(b) Panneau Vertical (VP)

La température opérative reste à 18°C pour toutes les expériences avec VP. On trouve que les températures Ttop, Tback et CP restent en-dessous de 20°C (*Tableau 3.3*). Le panneau horizontal chauffe un peu à cause de la chaleur qu'il reçoit du panneau vertical. La température du panneau VP monte jusqu'à 60°C à la puissance maximale.

La valeur de flux sensible global est de 98 W m^{-2} (VP = 35 W) et de 93 W m^{-2} (VP = 133 W). La *Figure 3.13* montre les densités de flux sensibles sur le mannequin. Les segments supérieurs ne montrent pas de variation de flux, par contre les parties inférieures du corps montrent une diminution d'environ 6 W m^{-2} pour les pieds et les cuisses; et de 17 à 20 W m^{-2} pour les jambes.

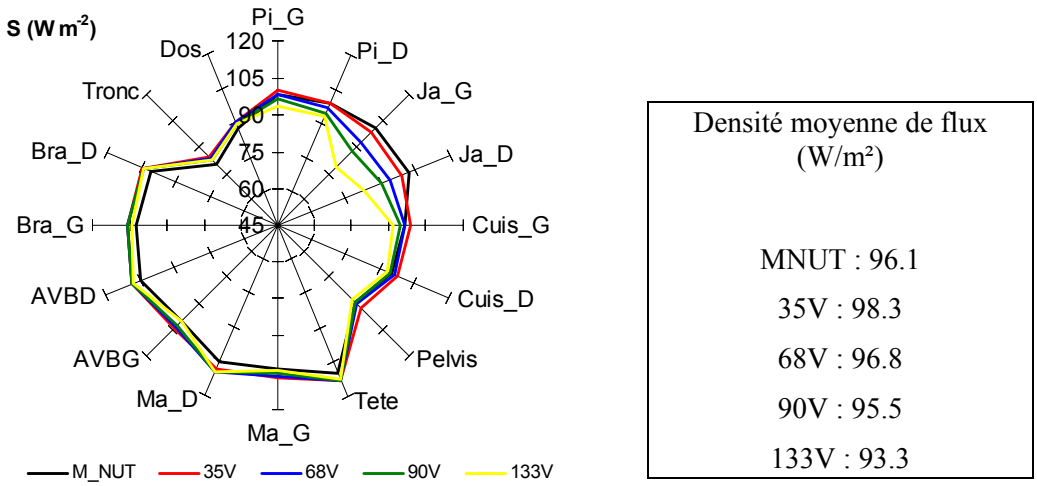


Figure 3.13 : Flux sensibles locaux aux différentes puissances du panneau vertical (VP)

(c) Chauffe-pieds

Lorsque le chauffe-pieds est en marche, sa température augmente jusqu'à 40°C. Les autres températures restent autour de 20°C. Le flux sensible global est de 98 W m^{-2}. En comparaison avec les autres cas ci-dessus (où les pieds n'ont pas été chauffés), une baisse importante de 40 W m^{-2} est enregistrée localement (*Figure 3.14*). Les autres flux locaux ne changent pas beaucoup, sauf sur le tronc qui perd un peu plus ($\Delta\varphi S_i \approx 3$ W m^{-2}) de chaleur par rapport à tous les autres cas.

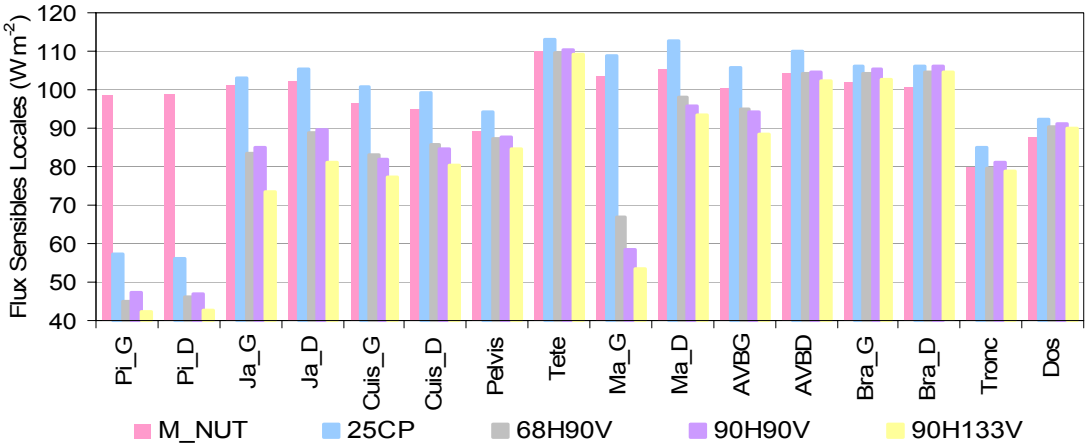


Figure 3.14 : Flux sensibles locaux perdus dans diverses configurations

On peut conclure que ce chauffe-pieds reste un moyen de chauffage très localisé. Il n'arrive pas à diminuer les pertes de chaleur des autres segments proches des pieds, les jambes par exemple. Ceci est bien confirmé par la valeur de flux global qui ne varie pas.

3.A.2.3 - Autres configurations

On constate que les panneaux pris séparément n'ont pas les mêmes effets. Le panneau vertical a un effet surtout sur les pieds et les mollets, alors que le panneau horizontal a un effet sur les cuisses et, indirectement, sur les avant-bras et les mains. Nous analysons maintenant les configurations où plusieurs panneaux sont allumés simultanément. Dans toutes les configurations suivantes, le chauffe-pieds fonctionne avec une puissance constante de 25 W. Les puissances de HP et VP varient comme décrit dans la méthodologie. Les températures de panneaux et de la table sont données dans le *Tableau 3.3*.

Dans les configurations mixtes 68H90V, 90H90V, 90H133V, le flux sensible global varie de 84 à 88 W m^{-2} (*Figure 3.14*).

- Comme ailleurs, le dos, le tronc, la tête et les bras restent en quasi-stabilité lorsque les trois panneaux fonctionnent. Dans le cas 90H133V, on observe que le flux sensible du pelvis diminue un tout petit peu (d'environ 2 à 3 W m^{-2}).
- Si on compare le cas 90H133V avec le cas où il n'y a pas de chauffage (MNUT), on trouve une variation de flux secs ($\Delta\varphi S_i$) : pieds = 55 W m^{-2}, jambes = 25 W m^{-2}, cuisses = 17 W m^{-2}, mains = 32 W m^{-2} et avant-bras = 7 W m^{-2}.

La superposition de certains cas, comme le montre la *Figure 3.15*, nous aide à voir plus clairement les différences des effets de chaque panneau. Pour une puissance faible de 35 W, on voit une forme assez homogène ; les segments perdent environ tous le même flux, que ce soit en configuration HP ou VP. Le HP a plus d'effet au niveau des mains, avant-bras et cuisses. En revanche, le VP intervient seulement sur les jambes. Comme il a déjà été noté, la variation sur les mains dépend beaucoup de la position de MARIA, l'écart main droite - main gauche étant très important.

Les variations deviennent plus nettes avec l'augmentation de puissance à 133 W. Le flux sensible global est d'environ φS = 90 W m^{-2} pour HP et φS = 93 W m^{-2} avec VP. Avec les trois panneaux en marche (cas 90H133V), la forme du graphe devient hétérogène (φS = 84 W m^{-2}). L'ordre de grandeur de la diminution des flux sensibles est important quand les panneaux sont en marche. Un tel système du chauffage local peut réduire la perte de chaleur totale d'environ 12 %.

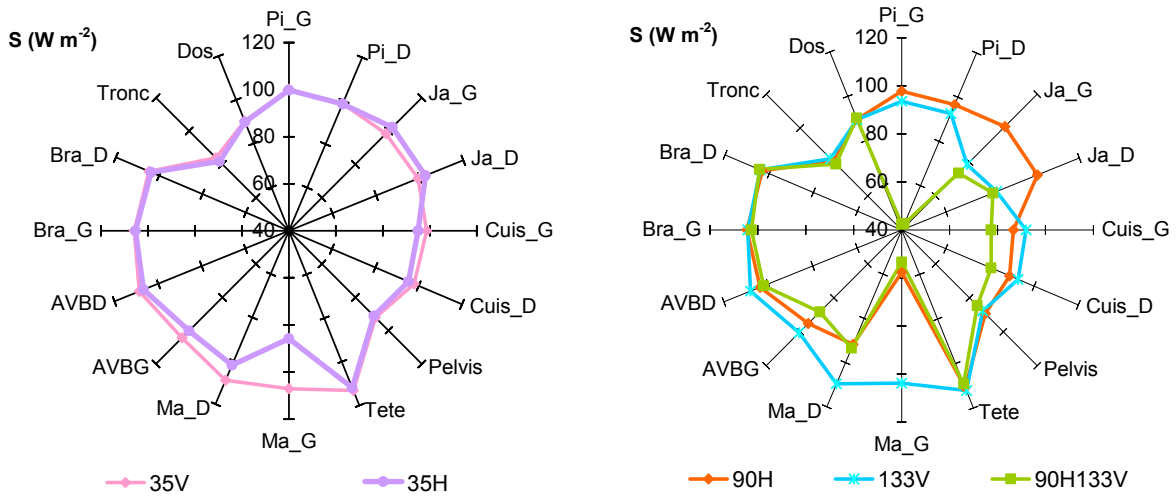


Figure 3.15 : Flux sensibles locaux superposés pour une puissance faible de 35 W et maximale de 133W

3.A.2.4 - Conclusion

Le LHS a bien un effet local, surtout sur les parties basses du corps. Les modifications sur les parties hautes sont essentiellement dues au fait que le dessus de la table chauffe. Il faut noter que les températures de surface du mannequin (*Figure 3.16*) varient en fonction des flux sensibles par l'équation suivante :

$$T_{sk} = 36.4 - 0.054.Q_t$$

Les valeurs de flux sensible ne sont pas toujours faciles à analyser, car il contient une partie de la variation liée à la température de la peau et d'autre partie lié au chauffage local.

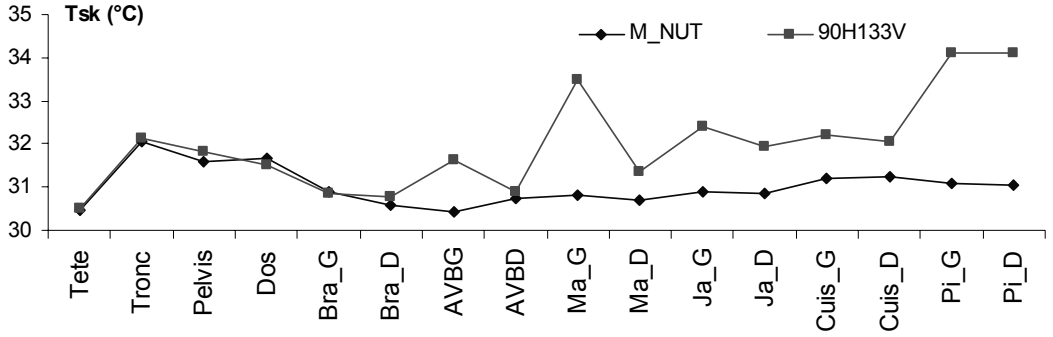


Figure 3.16 : Températures de surface de mannequin pour les deux cas, MNUT et 90H133V.

Le *Tableau 3.4* donne un récapitulatif d'influence du LHS sur les principaux segments de MARIA.

Segments	Table	Panneau Horizontal	Panneau Vertical	Chauffe-pieds
Tête	+	----	----	----
Tronc	++	++	+	----
Bras	+	+	+	----
Avant-bras	++	++	+	----
Mains	+++	++	+	----
Cuisses	+++	+++	++	----
Jambes	++	++	+++	+
Pieds	+	+	++	+++

Tableau 3.4 : Récapitulatif d'influence du LHS sur les segments du mannequin
(---- pas d'influence + faible influence ++ influence moyenne +++ influence forte)

3B - Expérimentation dans un *bureau* avec des *sujets*

D'après la bibliographie présentée dans le *Chapitre 1*, l'étude des jugements thermo-sensoriels a des objectifs divers : par exemple, les physiologistes étudient le comportement des thermorécepteurs et essaient de les relier aux sensations thermiques. D'autre part, les psycho-physiciens tentent de trouver les lois entre les paramètres physiques et les réponses psychologiques. Enfin, les thermiciens relient les paramètres physiques et/ou physiologiques aux sensations (cf. *Figure 3.17*). Malgré tous ces efforts, les corrélations croisées ne sont pas faciles à comprendre. C'est pourquoi le travail sur les sensations reste toujours difficile.

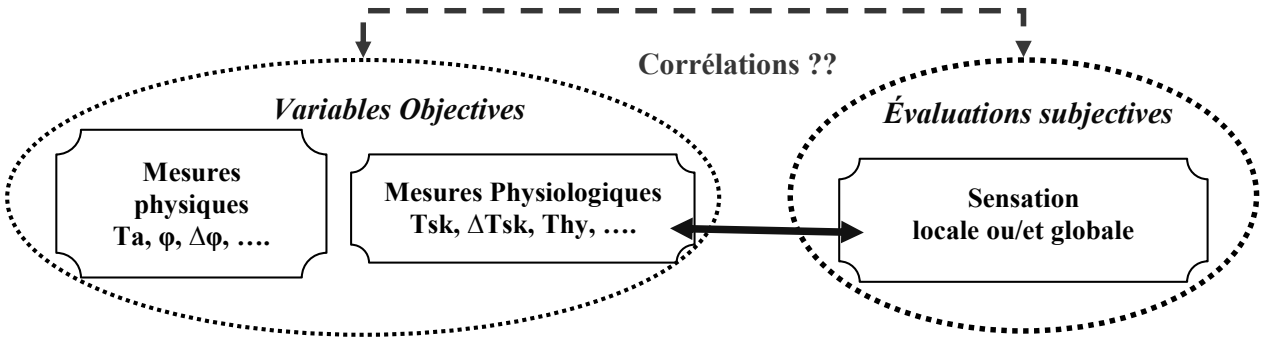


Figure 3.17 : Les corrélations entre les variables mesurées et les évaluations subjectives

On sait que la sensation thermique est déterminée par l'état thermique du corps et certains paramètres environnementaux, comme la température d'air inspirée, le rayonnement solaire, etc. (cf. *Chapitre 1*). Par ailleurs, on part du principe que, de façon générale, il y a une forte corrélation entre la température de peau et la sensation thermique. Dans le cas du système de chauffage local, nous souhaitons déterminer si la sensation thermique d'un individu est uniquement liée aux températures de peau (locale et globale) et/ou à d'autres facteurs (en particulier les flux radiatifs).

En 2001, Gaspar (2004) a effectué des expériences en site réel avec 18 personnes pour déterminer si le LHS était capable d'améliorer le confort des occupants d'un local non chauffé. Dans le cadre de la collaboration avec ADAI, nous disposons de la base de données expérimentales. Notre but est donc d'analyser plus en détail ces données, afin de déterminer s'il existe une relation entre le comportement des sujets, les sensations thermiques et certains paramètres physiques.

On s'intéresse aux analyses subjectives, car notre démarche est celle utilisée précédemment pour la construction de GBR (*Global Behavioural Regulator*). Notons que, dans le cas de GBR, on a utilisé le PMV qui peut être suffisant pour une approche globale, mais ceci n'est plus valable pour une approche locale. On souhaite créer un modèle de '*régulateur comportemental local'* (LBR - *Local Behavioural Regulator*). Il faut alors comprendre comment un système de chauffage local est réglé par les utilisateurs pour améliorer leurs sensations locales. La sensation thermique les amène à la déclaration de confort ou d'inconfort global et/ou local. Parfois, l'inconfort amène en principe un individu à réagir pour améliorer son propre climat ; c'est la base de la démarche adaptative. Dans notre cas, les sujets 'luttent' contre l'inconfort en agissant sur les puissances des panneaux locaux.

3.B.1 - Matériel et Méthode

3.B.1.1 - Mesures et description générale du local

La méthodologie complète des expériences sur le terrain est décrite en détail par Gaspar dans sa thèse (2004). Nous ne donnons ici qu'un résumé de la méthodologie de l'expérimentation et les points qui nous semble indispensables.

(a) La pièce

Les expériences ont lieu dans un bureau individuel de 5.4 m*3 m et 3 m de hauteur comme le montre la *Figure 3.18*. Ce bureau fait partie d'un bâtiment du Departamento de Engenharia Mecânic (Université de Coimbra) sur le campus Polo II. La salle a une porte sur le mur Nord et une fenêtre dans le mur Sud. La table comporte les trois panneaux chauffants qui sont identiques à ceux décrit en partie 3A. La table est placée à coté de la fenêtre face au mur Ouest. Le dos de la chaise est face au mur Est.

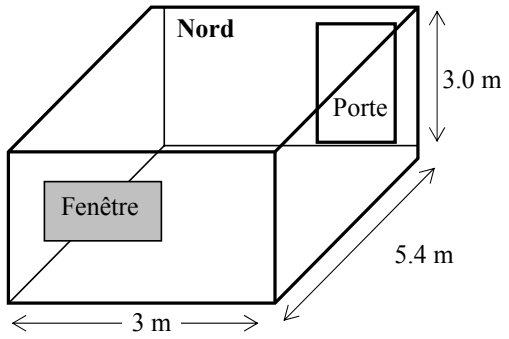


Figure 3.18 : Bureau pour l'expérimentation avec des sujets

(b) Ambiance Intérieure

Les expériences se sont déroulées au mois de Février 2001. Les températures ambiantes moyennes étaient entre 16ºC et 18ºC. Le bureau étant refroidi la nuit, la fenêtre était laissé ouverte pour atteindre une température basse chaque matin. Des sondes du T1213 ont été employées pour mesurer l'ambiance interne (la température de l'air, l'humidité relative, la température opérative et la vitesse d'air à 0.6 m au-dessus du plancher) dans une disposition opposée à la chaise de l'occupant. Les thermocouples calibrés ont été fixés à plusieurs endroits sur chaque mur, puis la moyenne a été calculée.

(c) Système de chauffage local (LHS)

Les trois panneaux (vertical (VP), horizontal (HP) et chauffe-pieds (CP)) sont identiques à ceux qui ont été utilisés pour les expériences avec le mannequin. Pendant la première demi heure d'expérience, les panneaux sont éteints, puis ils sont mis au maximum (dans certains cas) ensuite les sujets peuvent intervenir comme ils veulent pour changer la puissance des panneaux (vertical et horizontal). Par contre, le chauffe-pieds reste à la même puissance durant tout l'essai. Des mesures de températures sont également faites par plusieurs thermocouples fixés sur les panneaux et sur la table (dessus et dessous). Les moyennes de ces températures sont enregistrées.

3.B.1.2 - Description des sujets et mesures physiologiques

Les essais ont été réalisés par 18 volontaires (9 femmes et 9 hommes) âgés de 25 à 45 ans ; il s'agit d'étudiants, de personnels administratifs et de collègues d'université. Les caractéristiques physiques (poids, taille, etc.) de chaque participant sont résumées dans le *Tableau 3.5*.

Les participants étaient libres d'effectuer des activités bureautiques : écrire, téléphoner ou lire. Ils ont été invités à s'habiller comme d'habitude en saison hivernale. L'isolation vestimentaire (Icl) a été calculée par addition de l'isolation thermique des différentes pièces de vêtement (I_{clu}), sur la base de calcul de la norme d'ISO 9920 (1995).

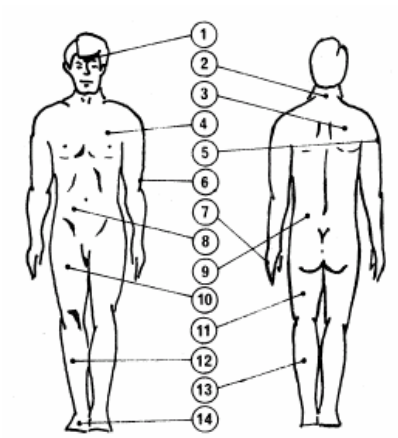
	Hommes									Femmes								
Participant	HO2	HO3	HO4	HO5	HO6	HO7	HO8	HO9	H10	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	MO7	MO8	MO9	M10
Age	45	29	31	45	36	36	33	33	32	33	33	32	34	33	38	43	25	36
Taille (cm)	170	180	164	170	170	166	176	172	182	168	157	160	160	160	152	160	156	157
Poids (kg)	82.8	77.5	49.6	82.6	98.7	61.5	66.3	62.8	69.6	47.1	46.4	43.0	74.9	59.0	51.0	51.3	76.6	49.5
Aire DuBois (m^2)	1.94	1.96	1.52	1.94	2.09	1.68	1.81	1.74	1.89	1.51	1.43	1.40	1.78	1.61	1.46	1.51	1.76	1.47

Tenue Vestimentaire	HO2	HO3	HO4	HO5	HO6	HO7	HO8	HO9	H10	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	MO7	MO8	MO9	M10
sous vêtements	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
sous chemise	-	0.10	-	-	-	0.08	0.09	-	-	0.09	0.09	-	0.09	0.09	0.11	0.09	-	-
chemises/blouses	0.24	0.23	0.15	0.25	0.15	0.23	0.31	0.22	0.23	0.28	0.26	0.28	0.27	0.29	0.20	0.28	0.30	0.17
pantalons/jupes	0.22	0.25	0.25	0.24	0.27	0.25	0.25	0.24	0.26	0.17	0.17	0.19	0.26	0.20	0.18	0.17	0.30	0.22
collant	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.01	-	0.01	0.01	0.01	-
chaussettes	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.01	-	0.03	-	0.05	0.05	-	-	0.03
chassures	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
pull chaud	0.33	0.37	0.45	0.42	0.30	0.39	0.40	0.33	0.29	0.24	-	0.30	-	-	0.33	-	0.32	0.30
Icl_global(clo)	**0.94**	**1.08**	**0.96**	**1.02**	**0.83**	**1.08**	**1.18**	**0.92**	**0.91**	**0.86**	**0.61**	**0.87**	**0.70**	**0.70**	**0.95**	**0.61**	**1.00**	**0.79**

Tableau 3.5 : Caractéristiques physiques et détails de la tenue vestimentaire des participants

Trois types de mesures physiologiques ont été réalisés :

- la mesure de la température tympanique (considérée comme référence acceptable de la température centrale) réalisée à l'aide d'un thermomètre infrarouge '*ThermoScan'* de BRAUN,
- la métabolisme par une méthode calorimétrique (cf. Gaspar (2004) pour plus des détailles),
- des mesures de température de peau en 14 points (*Figure 3.19*) comme le préconise la norme ISO 9886 (1992). Les thermistors calibrés ont été fixés sur la peau avec du ruban adhésif chirurgical.



No.	Appellation ISO	Notre Appellation
1	Forehead	Front
2	Neck	Cou
3	Right scapula	EpauleD
4	Left upper chest	Thorax
5	Right upper arm	BraD
6	Left lower arm	AvBraG
7	Left hand	MaG
8	Right abdomen	Abdomen
9	Left lower back	Dos
10	Right anterior thigh	CuisD_avant
11	Left posterior thigh	CuisG_posterieur
12	Right shin	JaD_avant
13	Left calf	JaG_posterieur
14	Right foot instep	PiD

Figure 3.19 : Les quatorze points de mesures pour la température de la peau sur le corps humain [ISO 9886, 1992]

La température moyenne cutanée est alors calculée : $$T_{sk_moy} = \sum_{i=1}^{14} \frac{T_i}{14}$$

3.B.1.3 - Evaluation de la sensation thermique

Pendant chaque essai, les participants ont complété des questionnaires par intervalles de 15 minutes pour l'évaluation des sensations thermiques locales et globales. Le questionnaire [Gaspar, 2004] comporte 5 ou 6 questions qui définissent la perception du confort global, les sensations thermiques globale et locales, les préférences thermiques, tolérance et acceptabilité à la chaleur ou au froid.

Chaque essai a duré approximativement 2 h 15. Pendant la première demi-heure, le LHS est arrêté pour que chaque individu s'habitue aux conditions initiales. Ensuite, l'individu est libre de commander la puissance délivrée par le LHS comme il le souhaite. Les exemples de changements faits sur des puissances de panneau horizontal et panneau vertical sont détaillés ultérieurement.

3.B.2 - Analyse générale pour les '18 sujets'

Les fichiers de résultats contiennent : les températures de la pièce (T_{op}, $T_{mur,}$ etc.), les températures et les puissances des panneaux, les températures locales de peau ($T_{sk,i}$), les sensations locales (S_i) et globale (S). Il s'agit de présenter les tendances générales observées pour les 18 cas, ainsi, toutes les données expérimentales ont été mises ensemble.

3.B.2.1 - Evolution des températures

(a) Température d'ambiance

Les températures mesurées dans l'ambiance du bureau pour tous les essais sont montrées sur la *Figure 3.20* ; la température de l'air augmente au cours du temps. Dans toutes les expériences, les conditions dans le local sont très proches. Les températures d'air et des parois sont presque toutes entre 16 et 18°C. Les augmentations sont d'environ 2°C pour la température de l'air en moyenne et de 1.5°C environ pour la température opérative. Les températures des murs changent très peu et restent souvent en-dessous de la T_{op}. Il faut rappeler que la pièce n'est pas contrôlée en température. En début de matinée, les fenêtres sont ouvertes et puis les températures d'air augmentent en cours d'expérience car, d'une part le climat extérieur varie et, d'autre part, les apports internes, même s'ils sont faibles, entraînent cette élévation.

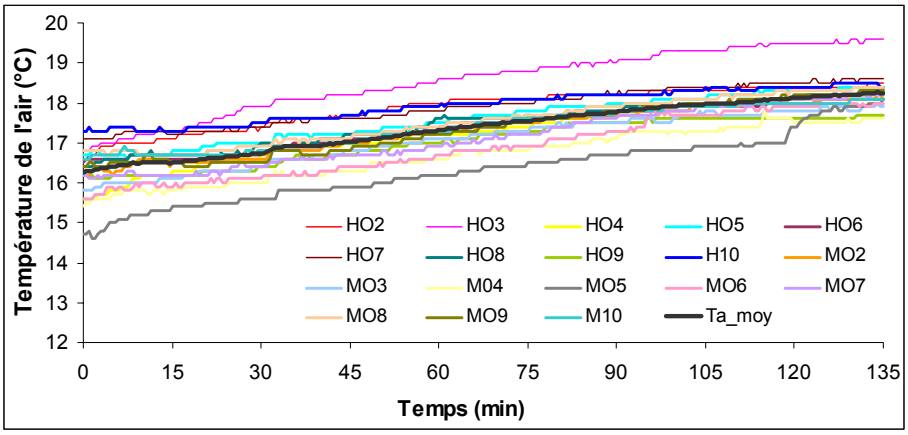


Figure 3.20 : Evolution des températures d'air pour les 18 essais (HO – homme et MO – femme)

(b) Température des panneaux et du bureau

Les températures de panneaux varient différemment dans chaque expérience. Pour les panneaux horizontal et vertical, la température maximale est d'environ 60°C. Par contre, le chauffe-pieds ne dépasse pas 45°C. Le dessus de la table (Table Top) peut monter jusqu'à 56°C et le reste de la table (Table Back) ne dépasse pas 20°C. Les températures des panneaux dépendent bien évidement de la puissance ; donc, ce qui distingue les expériences les unes des autres est le comportement du sujet vis-à-vis de la régulation des panneaux. L'*Annexe 3A* présente les courbes de puissances des panneaux pour chaque participant. Parmi les 18 cas, on voit que les participants réagissent plus sur le HP que sur le VP.

(c) Température de la peau

La *Figure 3.21* montre les températures de peau moyenne (T_{sk_moy}) de chaque participant - homme et femme. L'*Annexe 3B* présente les températures de peau locales pour certains segments

des participants. Même si la moyenne de toutes les T_{sk_moy} reste relativement stable, on peut constater différents types d'évolutions surtout pour les femmes, par exemple MO6, MO7 et MO9 ont une température moyenne qui augmente durant tout l'essai, alors que, pour MO8, elle reste stable et, pour MO3, elle décroît légèrement. Les différences sont liées aux différences inter-individuelles, aux différences de tenues vestimentaires et à la variation du LHS.

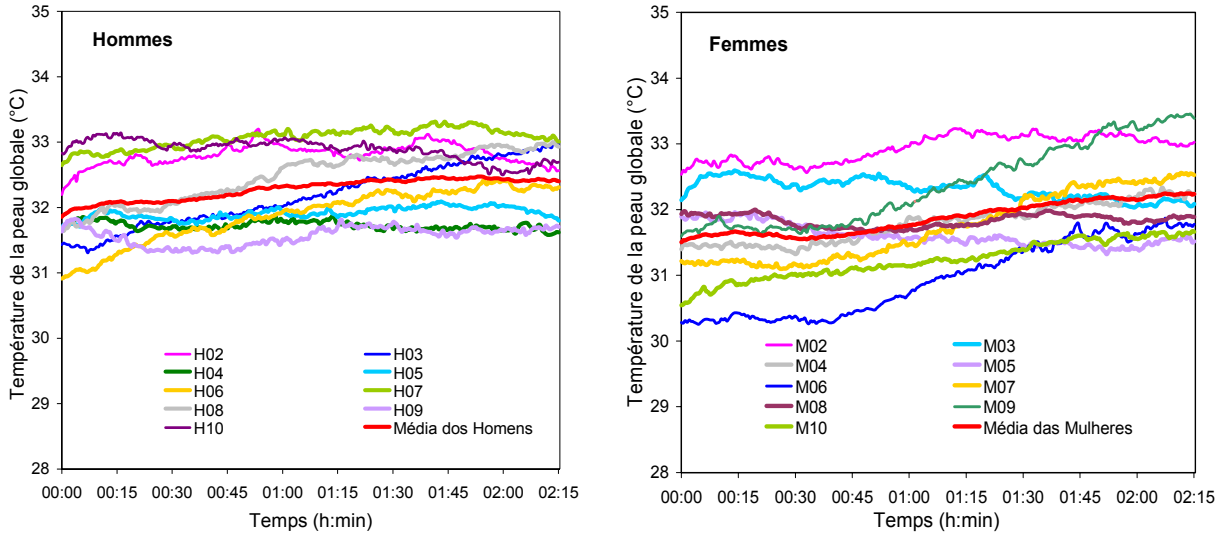


Figure 3.21 : Evolution de température de la peau globale pour les hommes et pour les femmes [Gaspar, 2004]

Les températures de peau mesurées pour les femmes ont une dispersion plus grande que celles des hommes. En fin de période d'équilibre (t = 30 min), on trouve une dispersion de T_{sk} de 2°C pour les hommes et 3°C pour les femmes.

3.B.2.2 - Evolution des sensations globales

Les sensations ne sont enregistrées que toutes les 15 minutes. La *Figure 3.22* représente l'évolution des sensations globales des 18 sujets. Comme pour la température de la peau, on constate une plus grande dispersion des sensations exprimées chez les femmes, qui peut être simplement liée aux températures cutanées plus basses. Globalement, on peut voir qu'en début d'expérience les sujets ont plutôt froid et, en fin d'essai, le LHS permet de remonter la sensation pour atteindre des conditions jugées neutres ou légèrement chaudes pour tout le monde.

La *Figure 3.23* montre la moyenne de sensations locales des 9 sujets hommes et 9 femmes. Même si, quantitativement, ces courbes sont impossibles à analyser (par exemple une sensation de 0.45 n'ayant pas réellement de sens), on peut tout de même tirer des conclusions qualitatives. Encore une fois, on constate beaucoup plus de variations chez les femmes, ce qui correspond tout à fait aux tendances des sensations globales. En revanche chez les hommes, les sensations locales sont plus regroupées et se rapprochent de la neutralité.

Le dos est toujours perçu comme étant froid, de même pour les pieds. Par contre, on voit que les sensations sur les cuisses sont les plus élevées surtout pour les femmes. Ceci apparemment est dû au fait que les vêtements sont plus fins sur les jambes (*Tableau 3.5*) donc elles perçoivent plus l'effet du rayonnement.

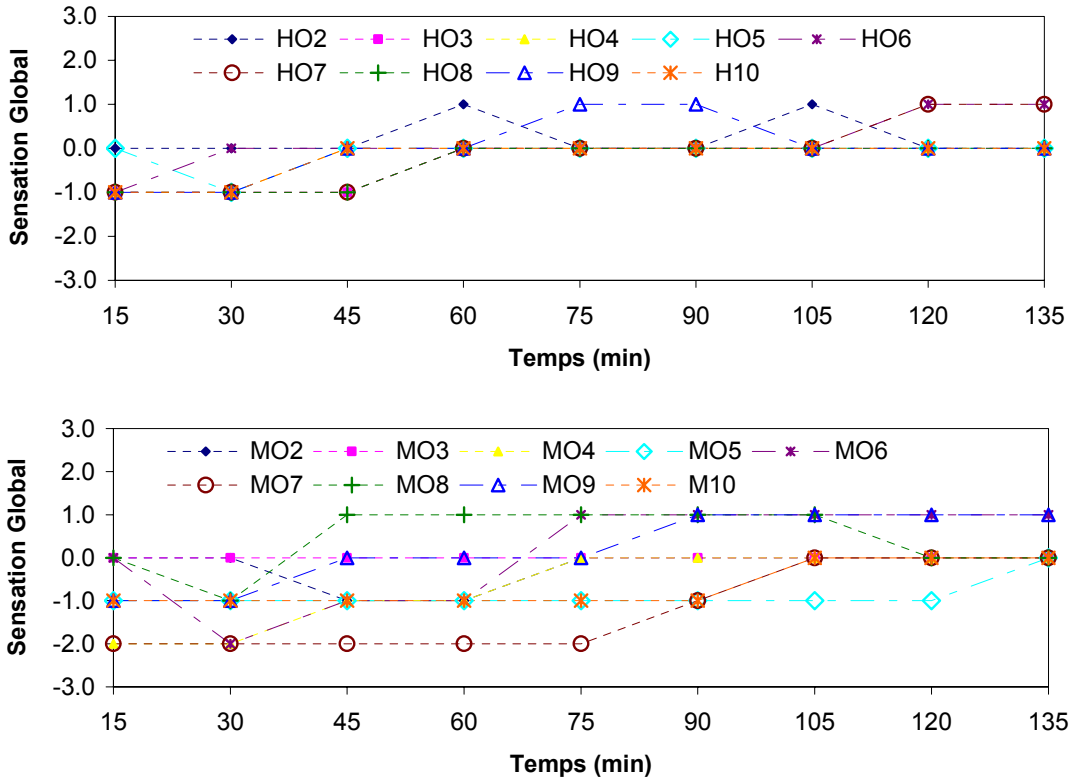


Figure 3.22 : Evolution des sensations globales pour les hommes (HO) et pour les femmes (MO)

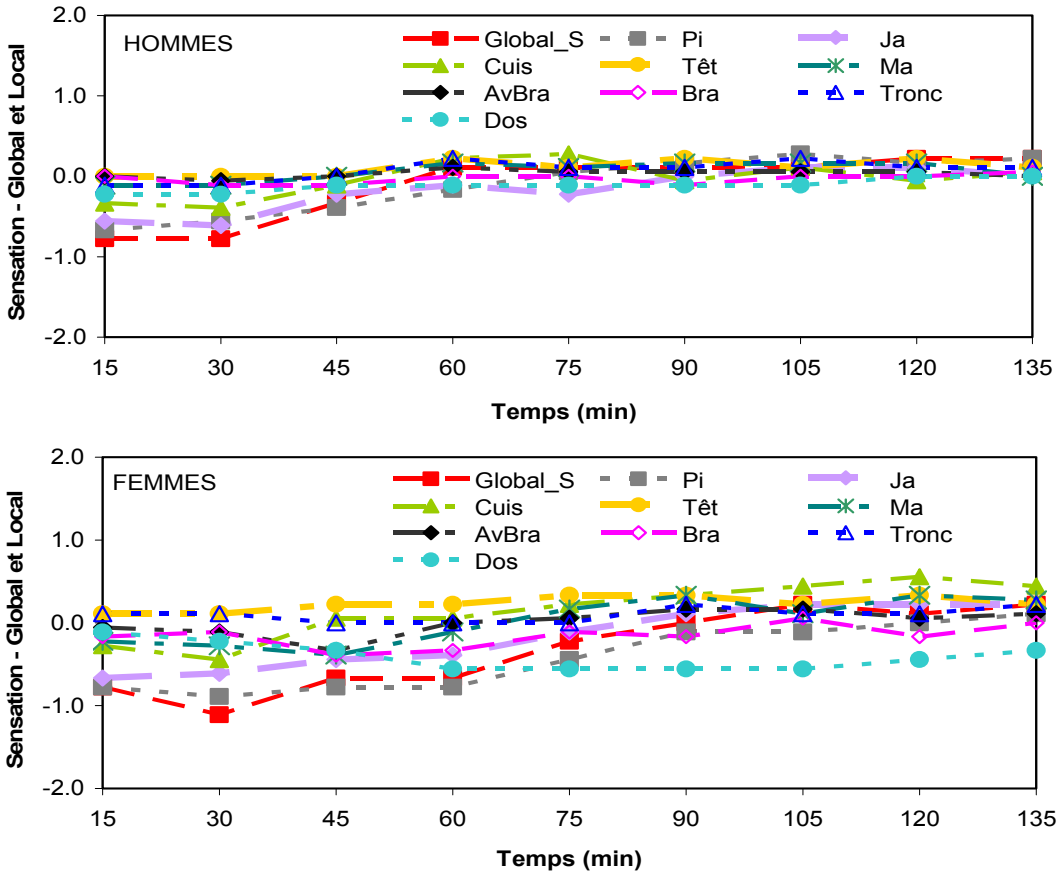


Figure 3.23 : Sensation moyennes locales et globales pour les hommes et les femmes [Gaspar, 2004]

3.B.2.3 - Conclusion

Les hommes et les femmes parviennent à obtenir une sensation globale neutre ou un peu chaude en fin d'expérience. Mais il faut noter que les hommes y arrivent à environ 1 heure et pour les femmes c'est plus long (1 h 40). Ce retard de 40 minutes pour les femmes est dû au fait, d'une part, qu'en moyenne la température ambiante est plus basse, d'autre part que l'habillement est plus léger; 0.79 clo en moyenne pour les femmes et 1.0 clo pour les hommes.

Enfin, il n'est pas étonnant dans ces expériences que la moitié des femmes déclarent une préférence pour des températures plus chaudes. Il faut noter qu'il y a une partie psychologique qui peut jouer un rôle très important dans les déclarations, mais nous n'avons pas les compétences pour traiter cet aspect. On sait que Gaspar (2004) a demandé aux participants leur avis sur l'usage et le confort de LHS. Les hommes n'avaient pas de problèmes pour utiliser le LHS, par contre, les avis des femmes ont été mitigés.

3.B.3 - Analyse de sensations thermiques et les comportements

Après observation de tous les fichiers, on se retrouve avec un certain nombre de questions. Par exemple, les actions de réglage des panneaux sont-elles justifiées par le jugement sensoriel ? Est-ce que les comportements des sujets sont liés à la physique, la physiologie, la psychologie ou à un mélange de ces éléments ? Est-ce que la mesure physiologique, comme la température locale de peau, suffit pour tirer des conclusions sur les sensations ? Quelle est la combinaison 'idéale' des puissances de panneaux pour obtenir une sensation égale à zéro ? Y a-t-il une préférence pour utiliser un panneau plutôt que les autres ?

Pour répondre à ces questions ou à une partie, nous avons regroupé dans la première étape tous les cas où les actions sur les panneaux sont à peu près similaires. Après regroupement des actions (augmentation/diminution) de la puissance des panneaux (PP), on obtient deux catégories principales :

- les *cas simples* : le sujet réagit une ou deux fois seulement sur les panneaux,
- les *cas complexes* : le sujet touche les panneaux beaucoup plus souvent (cf. *Annexe 3A*).

Pour chaque cas, un exemple choisi sera détaillé dans les sections qui suivent, notre but étant de trouver des corrélations entre les sensations et les autres facteurs comme la température de peau locale, la température de l'air, les flux échangés, etc. Un de nos objectifs est de tester les hypothèses présentées dans le *Chapitre 1* sur la prédiction de la sensation thermique [Galéou, 1991] et éventuellement d'ajouter des modifications liées aux spécificités du LHS s'il y a besoin.

3.B.3.1 - Analyse d'un cas 'simple'

Dans un *cas simple*, le sujet réagit une ou deux fois sur les panneaux (vertical et/ou horizontal). Nous avons choisi l'essai HO3 pour étudier le comportement plus en détail. On s'intéresse à ce cas car l'individu montre un comportement différent : il est le seul cas où l'individu augmente la puissance des panneaux pendant l'expérience. L'homme HO3 réagit sur les panneaux de la manière montrée sur la *Figure 3.24*. Deux actions principales ont lieu : démarrage des trois panneaux simultanément, puis augmentation de la puissance de panneau vertical (VP) de 90 W à 132 W après 25 minutes. Par contre, le panneau horizontal (HP) et le chauffe-pieds (CP) restent à une puissance constante de 75 W et 24 W respectivement.

La *Figure 3.25* montre les évolutions de températures des trois panneaux et également du dessus et dessous de la table. Pendant la durée de l'essai, les températures des panneaux varient bien sûr selon le changement de la puissance. Normalement, le panneau horizontal devrait arriver à une

température maximum et stabiliser comme le chauffe-pieds, mais ça n'est pas le cas. Il continue d'augmenter et il atteint même une température un peu plus élevée que le VP.

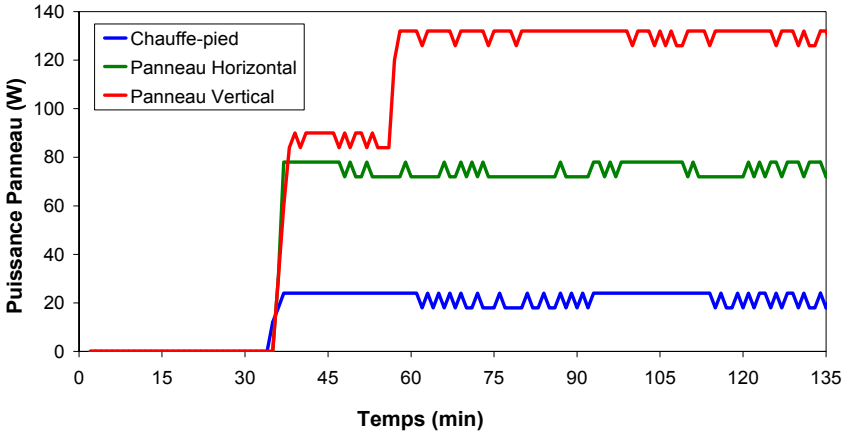


Figure 3.24 : Variations des puissances des panneaux pendant l'essai pour HO3

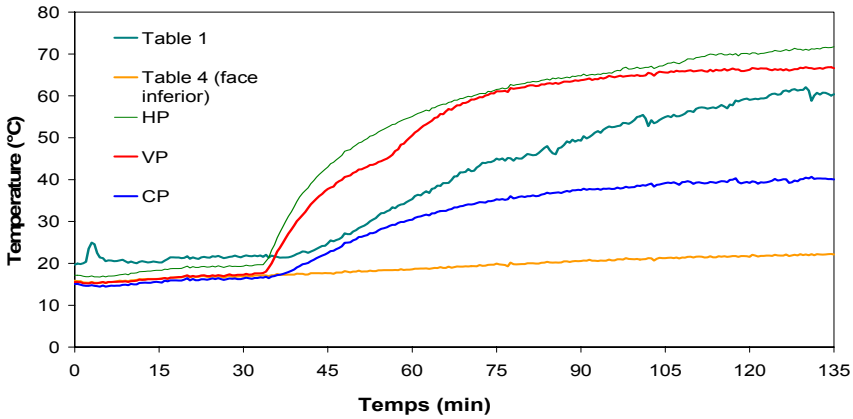


Figure 3.25 : Evolutions des températures de panneaux et de la table pour l'expérience HO3

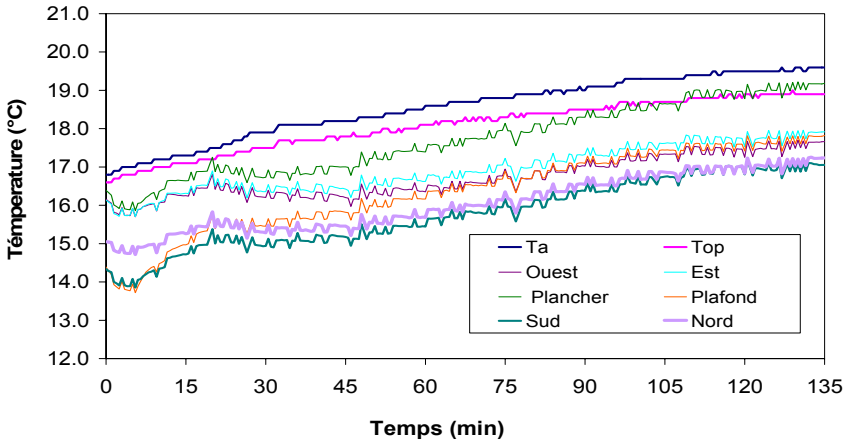


Figure 3.26 : Températures d'air, opérative et des murs pour l'expérience HO3

Il faut rappeler que les deux panneaux sont alimentés par des puissances comparables mais qu'ils n'ont pas les mêmes caractéristiques (*Tableau 3.1*), en particulier les surfaces (Surf). En fait, les puissances surfaciques en fin d'essai sont très proches : HP a une puissance surfacique de 461 W/m² (Surf = 0.1625 m², P = 78 W) et VP de 443 W/m² (Surf = 0.293 m², P = 133 W). Il faut également noter que les temps de réponse sont très longs quel que soit le panneau, il faut environ 20 minutes (après démarrage) pour que la température commence à atteindre le niveau requis.

La température du dessus de la table augmente énormément ; en fait, le panneau horizontal est fixé sous la table et n'est pas isolé, par conséquent un partie de la chaleur est transmise à la table. On remarque que la constante de temps est différente. La table agit alors comme un panneau mais elle va émettre vers le haut. Ceci rejoint les observations faites lors des essais avec le mannequin où on a constaté que les mains et les avant-bras sont très influencés par la montée de puissance du panneau horizontal. Par contre, on note que la température du reste de la table ne varie pas de façon significative et suit globalement les évolutions du reste du local. Les évolutions de la température d'air (T_a), la température opérative (T_{op}) et les températures des murs sont indiquées sur la *Figure 3.26*. Toutes les températures évoluent dans le même sens et augmentent d'environ 1.5°C au cours de l'essai.

Température de peau et sensation thermique

Quatorze températures de peau et seize sensations locales ont été mesurées ; nous ne pouvons pas toutes les donner en détail. La *Figure 3.27* donne les résultats pour neuf segments et le corps. Les segments non représentés ici ont un comportement très semblable, mis à part le dos dont la température monte et se stabilise environ de 36°C ; il s'agit probablement d'une zone en contact avec le siège.

Globalement, on constate que les températures sont relativement stables, sauf pour les cuisses et les pieds dont les températures augmentent. Si on analyse les données locales, on constate que pour la plupart des parties supérieures (mains, bras, avant-bras, tronc et tête) la sensation est neutre (égale à zéro). Pour toutes ces parties, la température locale de peau ($T_{sk,i}$) augmente légèrement sauf pour la tête ; la T_{sk_front} baisse d'environ 1°C. Ceci a été observé également dans les expériences faites par Zhang (2003). Actuellement, la raison de cette baisse est inconnue. La température des mains oscille entre 33 et 34°C, ce qui peut être dû à une perturbation de la mesure à cause des mouvements.

On voit un changement de la température cutanée au niveau des parties inférieures du corps, par exemple le pied droit (PiD) baisse jusqu'à 26.7°C, puis remonte rapidement à 30.7°C (t = 70 min). Les communications faites avec Gaspar (2005) confirment que cette évolution n'est pas liée à des erreurs de mesure mais liées à l'augmentation de VP (t = 56 min). Pour la première heure d'essai, la sensation de pied (SL_PiD) est notée -1, mais passe à zéro à la suite de l'augmentation de température.

Les températures des jambes ou des cuisses peuvent varier selon l'endroit de mesure. Il est évident que les parties postérieures du corps ne sont pas exposées aux panneaux et ceci dépend aussi comment l'individu est assis ; par exemple, si on regarde la température de la cuisse, *l'avant* augmente de 7°C depuis le début de l'expérience et, en comparaison, la partie *postérieure* n'augmente que de 3°C. La sensation de ces deux zones varie simultanément. En comparaison, la température locale de la jambe (mollet) avant augmente très légèrement de 1°C et au niveau postérieur, il y a une baisse d'environ 2°C. Les écarts de températures sont plus faibles que ceux des cuisses. Après 30 minutes d'essai, tous les panneaux sont allumés et l'individu est libre de les réguler. On constate qu'à ce moment la plupart des sensations locales sont neutres, mis à part les pieds et les mollets pour lesquels la sensation est 'légèrement froid'. C'est donc probablement une de ces sensations qui motive le sujet à augmenter la puissance du panneau à t = 56 min. Une fois que cette action a eu lieu, la sensation globale revient à zéro (t = 60 min), bien que la température moyenne cutanée T_{sk_moy} ne change pas beaucoup, n'augmentant que de 1.5°C au cours de l'essai.

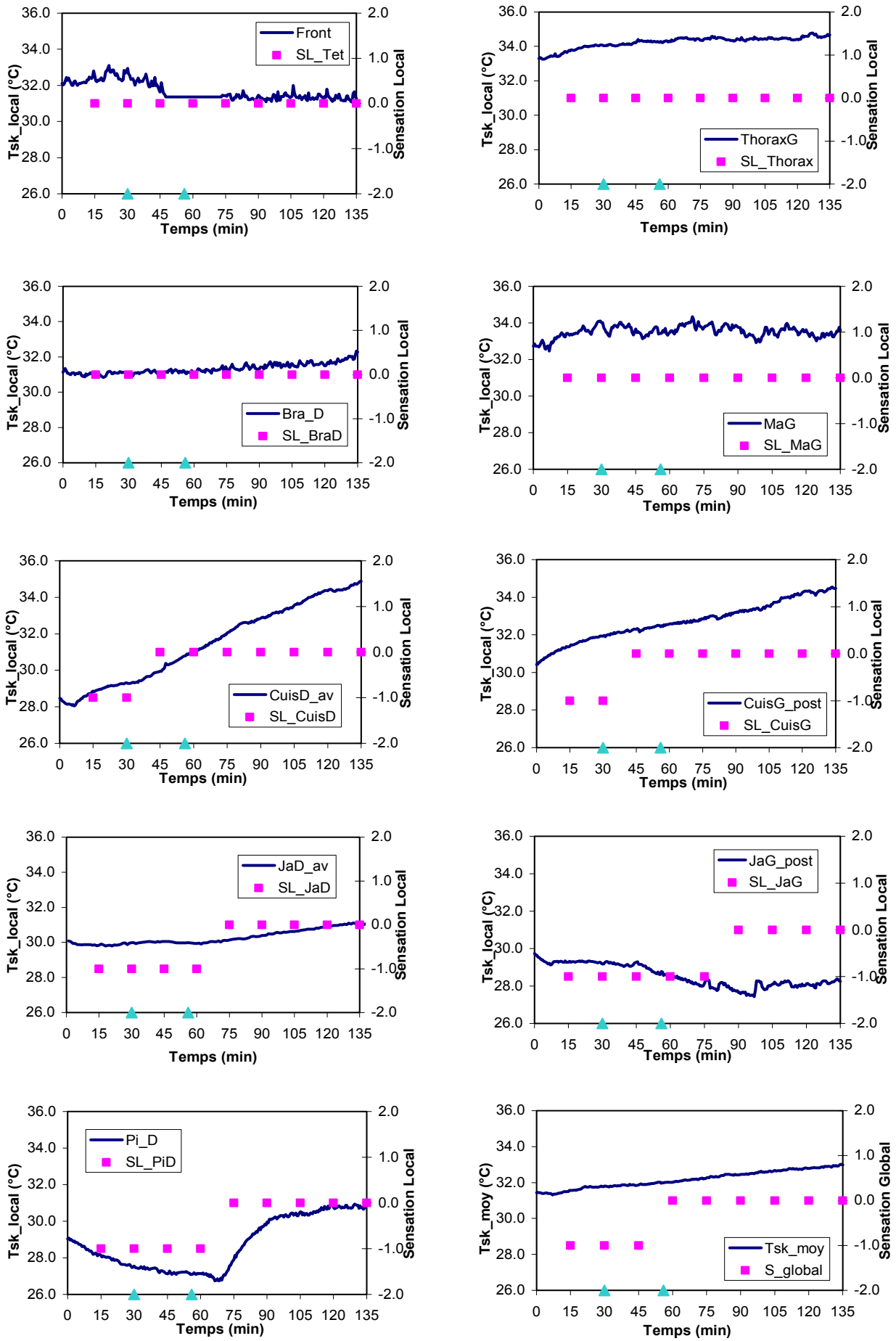


Figure 3.27 : Evolutions des températures cutanées et des sensation thermiques pour certaines parties du corps. Les triangles bleus indiquent quand le panneau vertical a été touché (EXP HO3)

Le fait d'avoir augmenté la puissance permet à l'individu d'améliorer son état thermique, même si les changements thermo-physiologiques et thermiques des panneaux sont lents. A partir de t = 90 min et jusqu'à la fin de l'essai, toutes les sensations sont neutres et l'individu ne touche plus les panneaux bien que les températures de certains segments continuent de croître en raison de l'augmentation continue des températures des panneaux.

Pour déterminer d'éventuels liens entre la température de peau, des panneaux et la sensation, on a tracé la température moyenne des panneaux en fonction de la température de peau pour une sensation neutre (globale et locale) (*Figure 3.28*). Certains segments comme les jambes ou les pieds montrent une corrélation linéaire ($R^2 > 90$ %). Mais il n'est pas aussi simple pour d'autres segments, par exemple les mains ou le tronc. Le fait d'avoir un nombre de points limité ne nous permet pas de tirer des conclusions plus quantitatives.

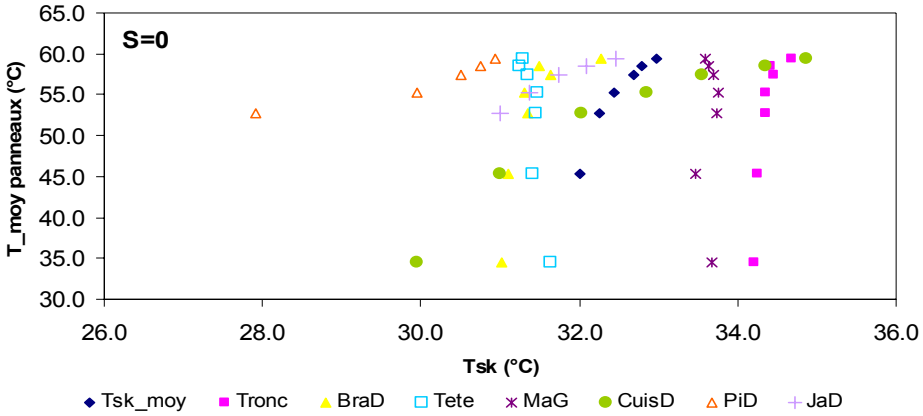


Figure 3.28 : Température moyenne des panneaux en fonction des températures cutanées pour une sensation neutre pour HO3

3.B.3.2 - Analyse d'un cas 'complexe'

Dans le *cas complexe*, le sujet touche la régulation des panneaux plus souvent (*Figure 3.29*). On voit que l'individu HO8 agit cinq fois sur le panneau horizontal, dont la puissance varie entre 50 et 120 W. Le chauffe-pieds et le panneau vertical restent à puissance maximum de 25 W et 133 W respectivement.

Les variations de températures des panneaux sont présentées en *Figure 3.30*, elles restent similaires à celles qu'on a vues dans le cas simple. Il faut noter que les changements de températures du panneau horizontal sont décalés par rapport à la puissance délivrée.

Les évolutions des températures d'air (T_a), opérative (T_{op}) et des murs sont montrées sur la *Figure 3.31*. La température d'air varie d'environ 16 à 18°C. Les murs Sud et Nord restent plus froids que les autres surfaces. On peut noter qu'en fin d'expérience les conditions ambiantes sont très proches de celles de l'expérience HO3.

<u>Les tendances de température de peau et de sensation thermique</u>

La *Figure 3.32* montre les sensations thermiques et les températures cutanées locales pour certaines parties du corps humain au cours du temps. Comme précédemment, toutes les parties supérieures de l'individu HO8 restent à une sensation thermique quasiment neutre. La température des mains varie de 27.5 à 32°C. Malgré les oscillations de température, la sensation est neutre tout le long de l'expérience ; ces oscillations peuvent être liées à la position des mains.

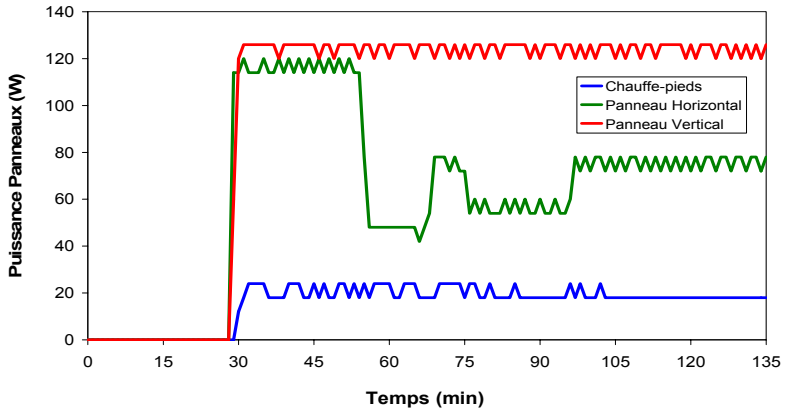


Figure 3.29 : Variations des puissances panneaux pendant l'essai HO8

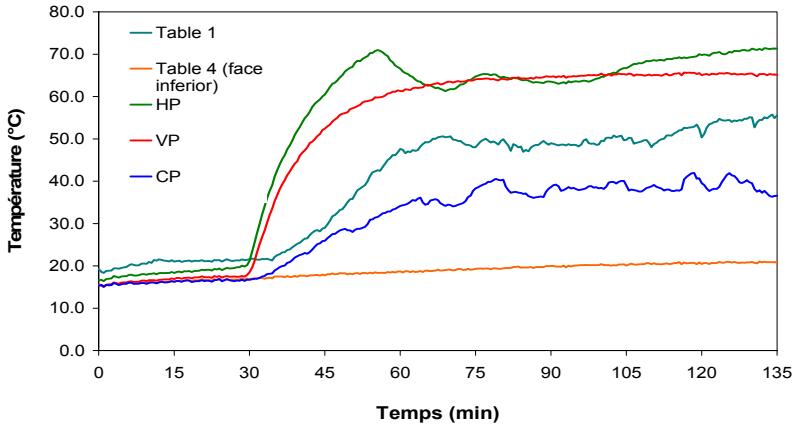


Figure 3.30 : Variations de températures des panneaux et de la table au cours d'expérience HO8

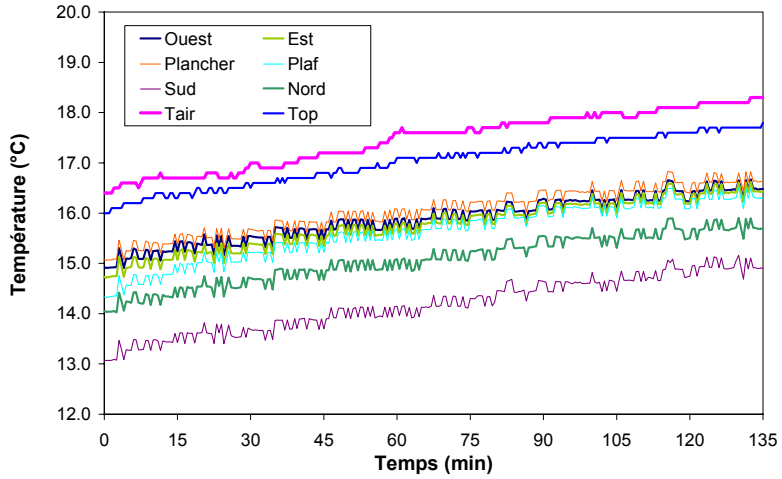


Figure 3.31 : Variations de température d'air et des murs pour l'expérience HO8

Les évolutions de températures cutanées ($T_{sk,i}$) pour la partie inférieure (jambes et cuisses) sont proches de celles vues précédemment. La température locale des pieds commence à baisser et se stabilise après 1 h 30 min du début d'expérience. L'homme HO8 note une sensation de 1 pour le tronc (t = 60 min). Cela est dû à sa tenue vestimentaire : au niveau du tronc, il porte une chemise d'isolation 0.31clo. En comparaison, l'homme HO3 porte 0.23 clo.

Les comportements opérés sur le panneau horizontal sont liés en grande partie à la température locale de la peau et à la sensation des cuisses et jambes.

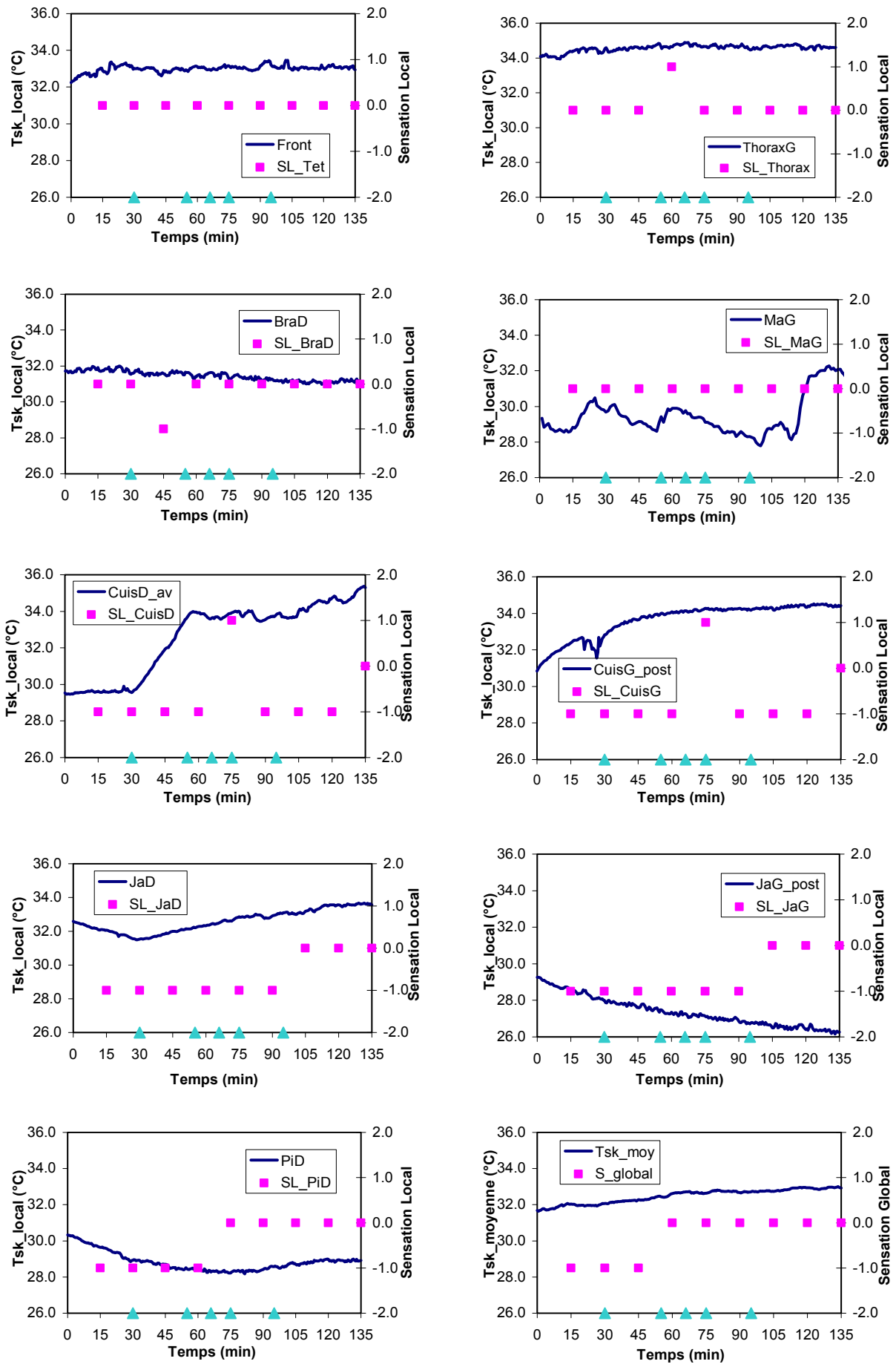


Figure 3.32 : Evolutions des températures de peau et des sensations thermiques pour certaines parties du corps. Les triangles bleus indiquent le moment où le HP a été touché (EXP HO8)

Globalement, la température moyenne du corps augmente de 1°C par rapport au début de l'expérience. L'homme atteint une sensation globale neutre dès la première heure d'essai et son état sensoriel reste neutre jusqu'à la fin de l'essai.

3.B.3.3 - Analyse fine pour les 18 sujets

Dans cette partie, on envisage de traiter les données expérimentales avec l'objectif de :
- chercher les corrélations locales entre T_{sk}/sensation
- tester les limites de sensation proposées par Galéou (1991)
- analyser si le comportement est lié à la température de peau ou à la sensation.

L'analyse des cas individuels montre clairement la relation entre la sensation thermique locale et la température de peau locale, par exemple pour les cuisses. Il faut rappeler que la température de peau locale dépend des conditions climatiques locales.

Le *Tableau 3.7* montre les valeurs de coefficients de corrélations (pour tous les cas confondus), calculées par MS Excel, pour quelques parties du corps. Les sensations thermiques des extrémités (pied et main) montrent une meilleure corrélation avec la température de peau locale que les autres segments. Les corrélations au niveau local sont inférieures à 0.5, c'est-à-dire que, même si la température de peau locale reste valable pour prédire la sensation locale, il y a d'autres facteurs qui interviennent (cf. *Chapitre 4*).

	Tête	Tronc	Dos	BraD	AvBG	MaG	CuisD_av	CuisG_post	JaD_av	JaG_post	PiD
R	0.25	0.07	0.20	0.33	0.26	0.53	0.28	0.15*	0.20	0.36	0.41

Tableau 3.7 : Coefficients de corrélations (R) entre températures de peau locales et sensations locales pour 18 sujets (le D correspond à la partie droite du corps et le G pour la partie gauche respectivement. La valeur pour CuisG est une valeur absolue)

La *Figure 3.33* montre la sensation globale des utilisateurs de LHS en fonction de leur température de peau moyenne (T_{sk_moy}). On observe une grande dispersion des résultats, par exemple pour la sensation neutre, la T_{sk_moy} peut aller de 30°C à plus de 33°C, ce qui correspond presque à la même plage de température que la sensation légèrement froide (S = -1). On constate que, même s'il y a une tendance à ce que la sensation augmente pour les températures les plus élevées, une relation simple n'est pas envisageable.

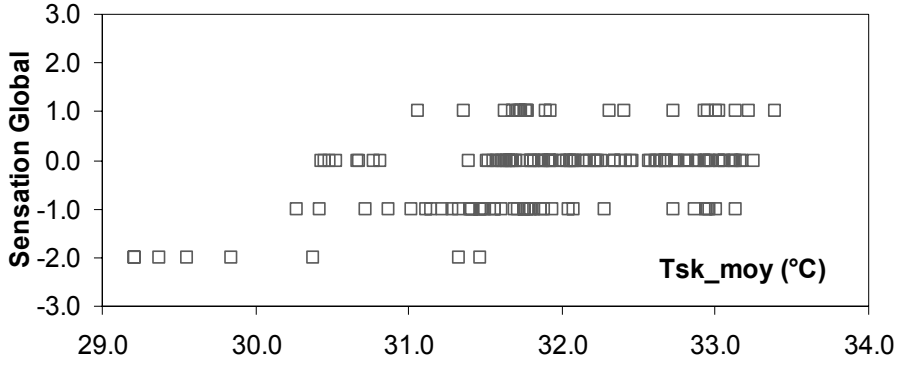


Figure 3.33 : Sensation globale en fonction de la température cutanée moyenne pour les 18 utilisateurs du LHS

<u>Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux de la littérature</u>

On se rend compte que les résultats des expériences sont difficiles à dépouiller car les données restent assez serrées entre les sensations -1 et 1. Si on trace les sensations en fonction des températures cutanées à partir des données expérimentales et la relation de TRIM, on obtient les *Figures 3.34 et 3.35*.

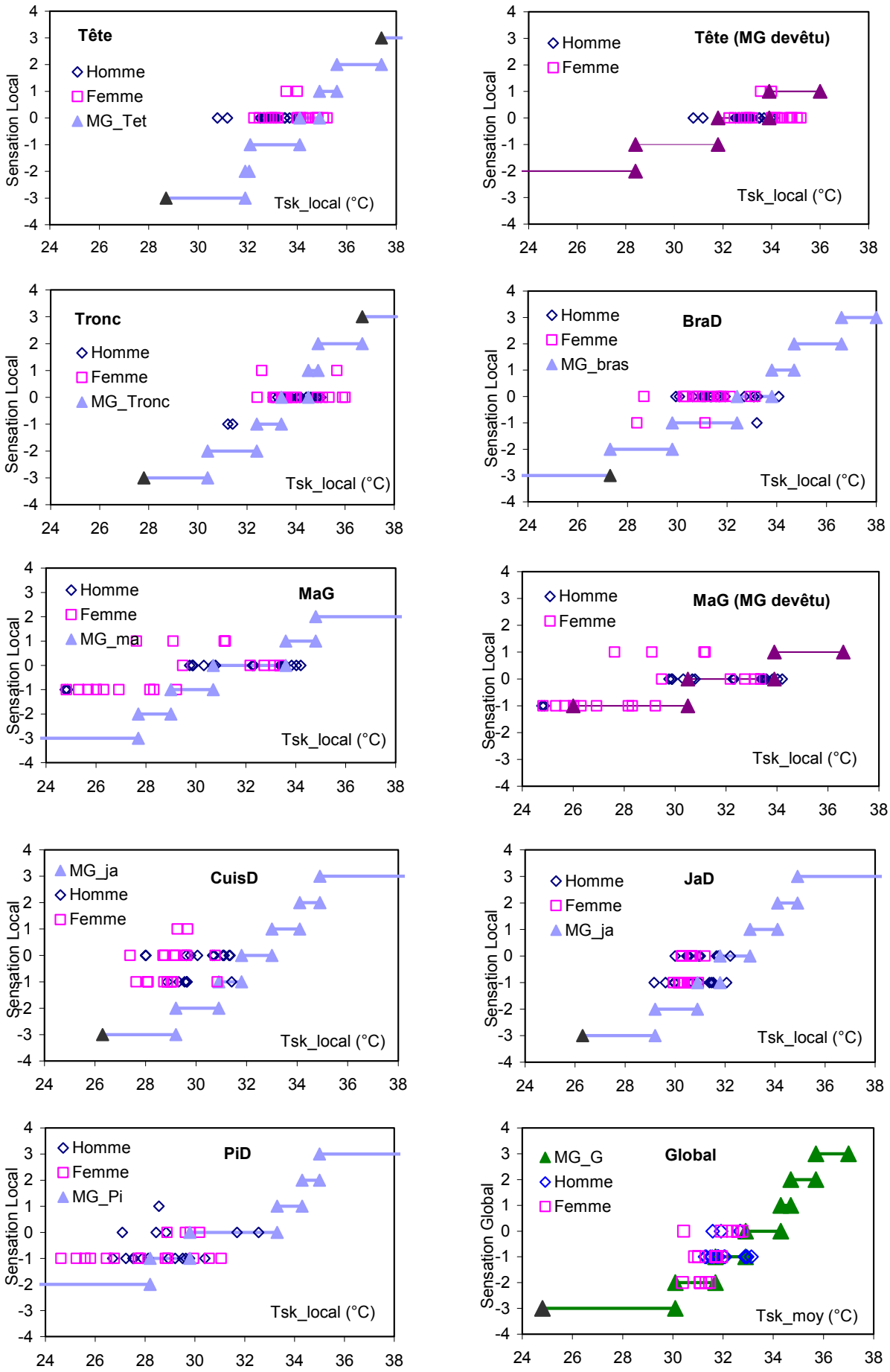


Figure 3.34 : Sensations locales et globale en fonction de Tsk : TRIM et expériences lorsque **LHS_OFF**
(Les valeurs hypothétiques de plages de TRIM sont marquées en gris foncé)

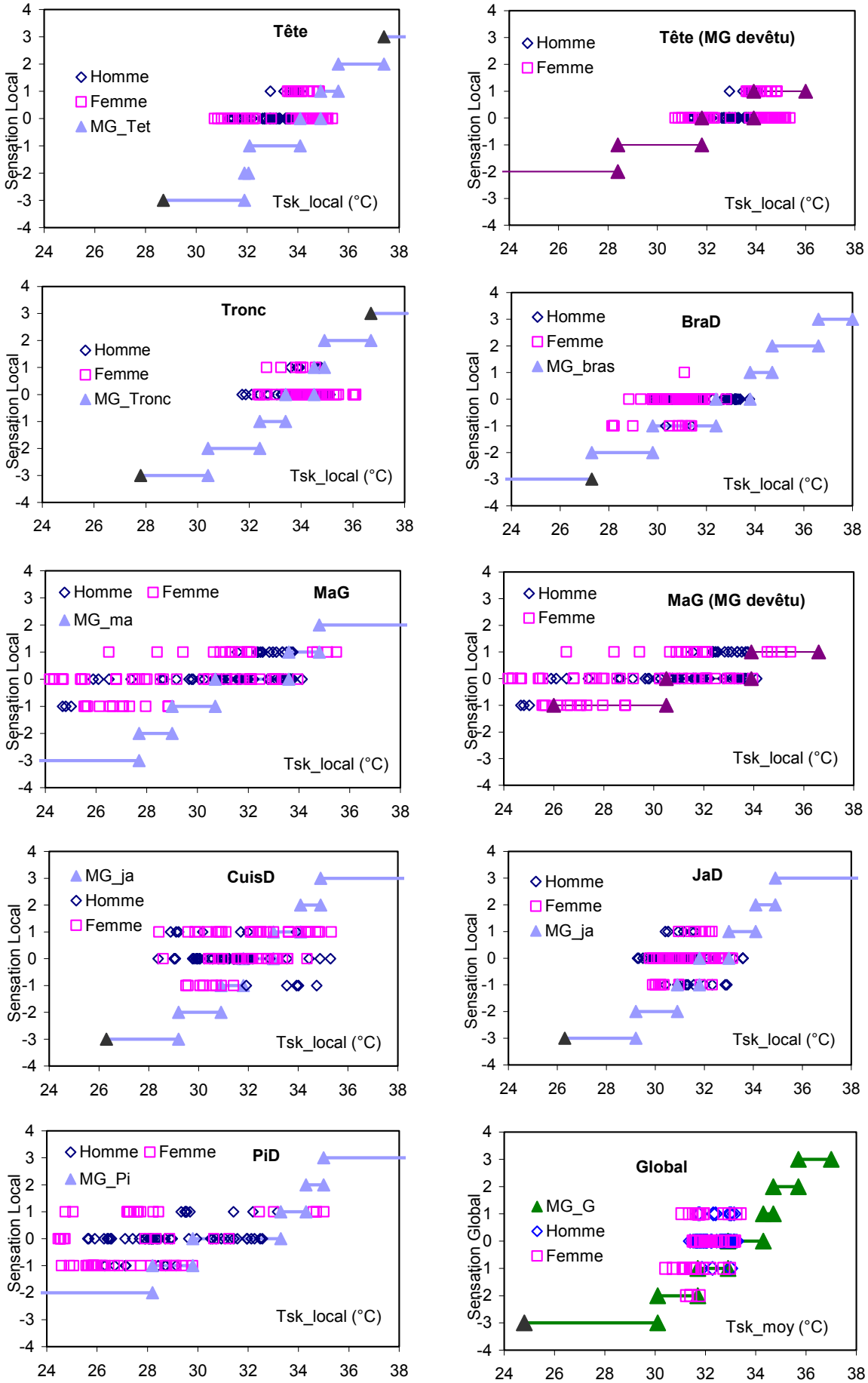


Figure 3.35 : Sensations locales et globale en fonction de Tsk : TRIM et expériences lorsque **LHS_ON**
(Les valeurs hypothétiques de plages de TRIM sont marquées en gris foncé)

Nous avons tracé séparément les cas où le LHS est éteint (*LHS_Off*) en début d'essai, puis les périodes où il est en marche (*LHS_On),* afin de déterminer si le fait d'avoir une répartition différente des échanges de chaleur a une influence directe sur la sensation. La relation de TRIM utilisée correspond au cas d'un sujet vêtu avec activité faible (cf. *Annexe 1C*).

Il faut noter que la relation donnée par TRIM pour la jambe correspond à la jambe entière. Par contre, dans les expériences, les cuisses et les mollets ont été traités séparément et les dispersions des températures des cuisses sont particulièrement importantes. De plus, il y a une différence entre les températures mesurées sur les parties postérieures et antérieures pour ces segments. De la même façon, les bras sont composés des segments avant-bras et bras.

On constate que, de manière générale, la dispersion est très importante, par exemple pour les cuisses (*Figure 3.35*) les sensations -1, 0 ou 1 correspondant aux mêmes températures de peau. Le fonctionnement du LHS semble augmenter la dispersion surtout pour les segments inférieurs. Les conclusions ne sont pas faciles, car la plage de sensation couverte lors des essais est assez étroite ; il y a peu de points correspondant aux sensations -2 ou 2. Par ailleurs, nous avons moins de point dans le cas LHS_Off.

Tous ces graphes ont en commun d'avoir les points expérimentaux décalés vers les valeurs basses par rapport aux plages de la bibliographie. Il faut alors déterminer la cause de ces écarts : est-ce la différence de sensibilité thermo-physiologique liée au climat froid globalement (T_a = 16 - 18°C), la contribution du chauffage local ou bien les facteurs psychologiques, etc. ?

Nous avons testé également la relation de TRIM pour le *cas dévêtu* (*Figures 3.34 et 3.35*). On a remarqué que les limites proposées pour la tête avec influence *d'air frais* sont plus en accord avec les résultats réels (surtout pour la sensation neutre). Un bon accord a été trouvé pour les mains également.

En moyenne, la température cutanée des femmes ainsi que leurs sensations sont plus basses. Les points expérimentaux correspondant aux femmes et aux hommes sont finalement confondus.

On constate que, pour une même sensation, les participants arrivent à supporter des températures cutanées plus basses. Ceci est confirmé par les cas particuliers que l'on a étudiés. Les expériences également confirment les recherches faites sur terrain (cf. *Chapitre 1*) montrant que les individus peuvent s'adapter à des températures plus variées que le prédisent les normes internationales.

3.B.3.4 - Relation sensation - température et sensation - comportement

On peut commencer par tracer un schéma (*Figure 3.36*) des facteurs qui jouent un rôle important et peuvent devenir 'les causes pour lesquelles l'individu réagit sur les puissances des panneaux'.

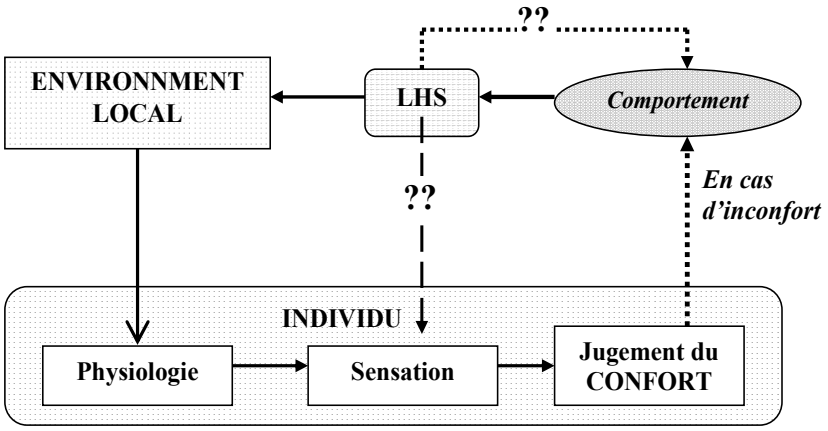


Figure 3.36 : Schématisation des événements qui peuvent jouer un rôle sur le comportement des utilisateurs du LHS

L'environnement thermique local a un effet sur la thermo-physiologie, ce qui va entraîner un jugement sensoriel qui, lui-même, va provoquer un jugement d'inconfort poussant le sujet à agir sur le LHS. Il faut alors arriver à déterminer à quel niveau la particularité du LHS intervient. On a pu constater sur les résultats expérimentaux que seuls les segments exposés au LHS ont une variation notable de température cutanée. Les questions qui se posent alors sont : les variations de température cutanée ont-elles un effet direct sur la perception ? Les flux locaux modifient-ils la perception ? Le comportement vis-à-vis du LHS est-il lié aux sensations ou au jugement d'inconfort ? Est-ce que la présence d'un système du chauffage local, c'est-à-dire l'opportunité de modifier l'ambiance change le comportement de l'utilisateur et son jugement de confort ?

Nous cherchons à exploiter la vitesse à laquelle la température de peau d'un individu change (dT_{sk}/dt) face au LHS, ce qui, en fait, peut changer sa sensation thermique et/ou son comportement. Dans un premier temps, on commence par regarder toutes les évolutions de températures de peau et de sensations (locales ou globales) uniquement pour les 9 participants hommes, car le modèle thermo-physiologique MARCOT que nous utilisons correspond à un homme. Toutes les courbes, comme celles présentées pour le cas HO3 et HO8, ont été tracées (cf. *Annexe 3C*). Ces courbes ont été juxtaposées pour visualiser l'ensemble. Quelques observations générales :

- Les $T_{sk,i}$ des segments supérieurs du corps montrent des variations très faibles (sauf pour les mains), comme on l'a déjà constaté ailleurs, et les sensations pour ces segments restent neutres (S = 0) presque tout au long de l'expérience.
- Les segments inférieurs du corps, notamment la cuisse_avant, le mollet_avant et les pieds qui sont directement exposés aux panneaux chauffants, montrent que leurs températures évoluent différemment par rapport aux segments supérieurs du corps. Par exemple, pour tous les participants, l'évolution de température de cuisse_avant montre une forte relation avec le changement de sensation (souvent 1 point) et ceci semble provoquer une réaction sur les panneaux. Donc, on a voulu quantifier ce type d'observation.

Un récapitulatif de nos observations pour les trois segments principaux : cuisse_avant, mollet_avant et pieds sont présentés dans le *Tableau 3.8* (complété par la suite, cf. *Annexe 4B*).

Les zones postérieures (cuisses et mollets) ne sont pas considérées, car ces zones sont en contact avec la chaise. Il faut noter que nous avons considéré les changements de sensations à partir de t = 30 min au moment où les panneaux sont allumés. Nous trouvons les informations suivantes pour chaque segment :

- la variation de sensation locale est de 0 ou +1,
- en se basant sur l'observation de la courbe de T_{sk}, on détermine si la pente (dT_{sk}/dt) est faible (+), moyenne (++) ou forte (+++),
- lorsque la variation de sensation est de 1, on essaie de voir si elle est une fonction de la pente (dT_{sk}/dt),
- d'autres variables sont notées, comme le moment du changement de sensation et le changement de la température de peau.

Segm	N° expé / variable	HO2	HO3	HO4	HO5	HO6	HO7	HO8	HO9	H10
Cuisse avant	ΔS	1	1	0	0	1	1	1	1	0
	dTsk/dt	++	+++	++	++	+	+	++	++	+
Observations	t_1-t_2	30-45	30-45			45-60 90-105	45-60 90-105	120-135	45-60	
	$Tsk_1 – Tsk_2$	31.5-31.7	29.3-30			28.4-28.9 Ct à 29.1	29.6-29.8 Ct à 30.2	34.7-35.3	31.4-32	
Ccl.	ΔS = f()	dTsk/dt*	dTsk/dt			dTsk/dt	dTsk/dt*	dTsk/dt	dTsk/dt	
Mollet_ avant	ΔS	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	dTsk/dt	++	++	+	+	+	+	++	+	++
Observations	t_1-t_2	45-60	60-75	30-45		30-45 75-90	90-105	90-105	30-45	
	$Tsk_1 – Tsk_2$	31.3-31.6	29.9-30.1	29.2-29.3		(30.6-30.5) 30.6-31.1	31.6-31.7	32.9- 33.A.2	(30.7-30.4)	
Ccl.	ΔS = f()	dTsk/dt				dTsk/dt*	dTsk/dt*	dTsk/dt		
PiedD	ΔS	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Observations	dTsk/dt	+++	+++	++	+	+	+++	+	++	+
	t_1-t_2	45-60	60-75	45-60		75-90	30-45 90-105 120-135	60-75	60-75	60-75
	$Tsk_1 – Tsk_2$	32.5- 33.A.2	27.1-27.9	(26.8- 26.6)		(29.6-29.5)	29.5-30.6 32-32.2 (31.9-31.4)	(28.4-28.2)	26.3-26.4	(28.7-28.4)
Ccl.	ΔS = f()	dTsk/dt	dTsk/dt				dTsk/dt		dTsk/dt	

Commentaires sur le Tableau

- ΔS : variation de sensation local
- (dTsk/dt) : vitesse de variation de la température cutanée lors d'essai - + faible ++ moyen +++ fort,
  * indique une contribution faible de (dTsk/dt)
- [t_1 - t_2] : temps de référence pour les changements de sensation, en général t_1 = 30 min.
- [$Tsk_1 – Tsk_2$] températures de peau aux temps t_1 et t_2 ; les valeurs entre () montrent une baisse de Tsk

Exemples : HO3 pour la cuisse :
à t_1 = 30 min, Tsk,cuis,1 = 29.3°C et S = 0 à t_2 = 45 min, Tsk,cuis,2 = 30.0°C et S = 1
D'où, ΔS = 1 [t_1 - t_2] = 30-45 [$Tsk_1 – Tsk_2$] = (29.3-30.0)°C
HO6, mollet_avant change *deux fois* la sensation de +1 :
[t1 - t_2] = 30 - 45 min [$Tsk_1 – Tsk_2$] = (30.6-30.5)°C et [$t_3 – t_4$] = 75 - 90 min [$Tsk_3 – Tsk_4$] = (30.6-31.1)°C
Pour le premier ΔS = 1, on constate que la Tsk diminue peu, on peut dire que la contribution de (dTsk/dt) est faible.

Lorsque ΔS = 0, il devient difficile de déterminer si le changement de sensation et/ou comportement est dû à dTsk/dt et/ou d'autres facteurs. *Il est important de souligner que chaque ΔS contient en partie 'la contribution psychologique' que l'on ne connaît pas.*

Tableau 3.8 : Synthèse de la contribution de la vitesse de variation de la température pour les cas des hommes

Au niveau des cuisses, deux tiers des hommes montrent un changement de sensation d'un point. Parmi ces hommes, seulement 50 % montrent une variation de ($dT_{sk,i}/dt$) (forte ou moyenne) qui provoque le changement de sensation. La *Figure 3.37* présente l'ordre de grandeur de ($dT_{sk,i}/dt$) pour le cas HO3 où le T_{sk} augmente tout long de l'expérience. Dans la même Figure on montre également les ($dT_{sk,i}/dt$) dans l'expérience HO8 pour une des rares occasions où la sensation a été changée de 2 points. L'homme HO8 note également une variation de sensation de 1 (t = 135 min) qui est présentés dans l'*Annexe 4B*.

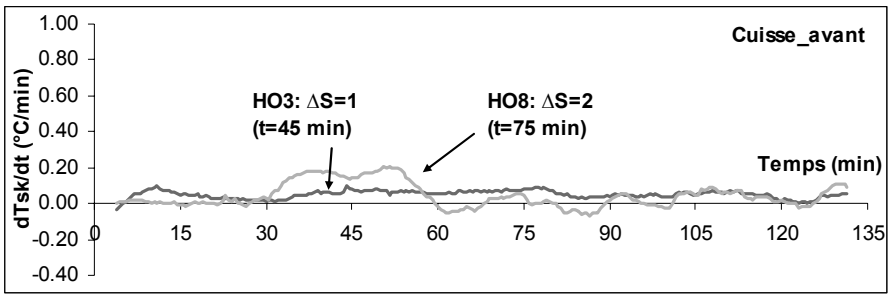


Figure 3.37 : Valeurs de dTsk/dt pour les expériences HO3 et HO8
(Les courbes ont été obtenus à partir des valeurs de Tsk en faisant la moyenne glissante pour lisser les oscillations)

Si on observe tous les essais, au niveau des mollets, deux tiers des changements de sensation (ΔS) sont de 1. Par contre, il est difficile de voir clairement si (dT_{sk}/dt) est responsable de ce

changement, car, comme le montre la *Figure 3.38*, l'ordre de grandeur de (dT_{sk}/dt) pour la plupart des cas reste autour de zéro. Dans certains cas, comme HO6 et HO9, les T_{sk} décroissent. Ceci traduit l'existence d'autres variables qui sont peut être plus dominantes et ainsi entraînent un changement de sensation de 1 point.

En général, 8 hommes sur 9 indiquent une $\Delta S = 1$ pour les pieds. On constate que, dans un tiers des expériences, le changement de sensation est provoqué en partie par les variations de (dT_{sk}/dt) des pieds. Il est probable que certains comportements, par exemple l'augmentation de puissance du panneau vertical (t = 56 min) dans le cas HO3, entraînent un changement non seulement de la température de peau mais également de la sensation. L'ordre de grandeur de ($dT_{sk,i}/dt$) est présenté *Figure 3.38*.

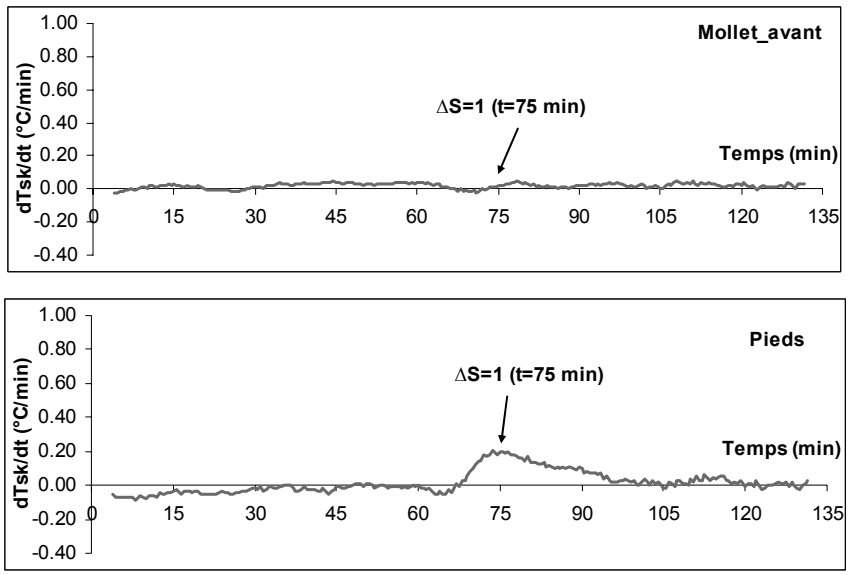


Figure 3.38 : Valeurs de (dTsk/dt) pour les segments : mollets et pieds pour l'homme HO3
(Les courbes ont été obtenus à partir d'une moyenne glissante des valeurs de Tsk pour éviter les nombreux oscillations)

Dans certains cas, par exemple HO4, HO5 et H10, on constate une variation de (dT_{sk}/dt) moyenne ou faible qui ne provoque pas de changement de sensation. Dans presque la moitié des cas, on constate que la $T_{sk,i}$ des pieds baisse lors d'expérience, mais malgré cette baisse, la sensation augmente de $\Delta S = 1$; donc le changement de sensation vient des contributions d'autres facteurs.

On remarque que le cas HO5 est différent, car les trois segments ne montrent aucune variation de sensation ; S = 0 tout le long de l'expérience. Ce cas peut-être correspond à un individu satisfait de son ambiance thermique tout le temps, ou alors le maintien de son état est fortement lié aux autres facteurs comme, par exemple, le flux reçu des panneaux ; nous approfondirons cet aspect dans le *Chapitre 4*.

Pour le cas HO3, on obtient les valeurs instantanés suivantes :

Cuisses = 0.08°C/min = 4.8 °C/h (t = 45 min)
Mollets = 0.02°C/min = 1.2 °C/h (t = 75 min)
Pieds = 0.20°C/min = 12.0 °C/h (t = 75 min)

Dans le *Chapitre 1*, on a noté que les thermorécepteurs chauds sont sensibles à partir d'une vitesse de variation d'environ *3.6°C/h* (ou 0.06°C/min). Les valeurs correspondent à celle de la littérature.

Globalement, on trouve qu'une augmentation T_{sk_moy} d'environ 0.7 à 1.0°C (sur les 30 min après que les panneaux soient allumés) entraîne un changement de la sensation globale ou/et une réaction sur les panneaux.

Enfin, dans ces expériences, la présence du LHS peut avoir un impact psychologique sur l'utilisateur qui pense détecter une modification liée à son action avant qu'il y ait eu un réel

changement de conditions thermiques. Nous savons que cet élément est présent dans les sensations expérimentales, mais il est très difficile de la séparer des observations que l'on a notées ci-dessus.

3.B.3.5 - Conclusion

Précédemment, on a montré que, lorsque le système de chauffage est éteint (*Figure 3.34*) les points expérimentaux sont décalés vers les valeurs basses par rapport aux plages d'origines de TRIM. Donc, il nous semble important de conclure ce chapitre par une modification de ces plages. On a décidé d'utiliser les plages de TRIM pour le cas dévêtu pour la tête (*avec option air frais*) et les mains, car les points correspondent mieux. Les plages sont inchangées pour le tronc, les bras, les pieds et le corps.

Pour les segments comme les bras et jambes, nous avons déplacé les plages d'un point de sensation comme le montre le *Tableau 3.9*. En faisant cette démarche, on arrive à prendre en compte les températures assez basses notées sur ces segments. Cette relation est valable lorsque le LHS est éteint. Lorsqu'il est allumé, d'autres phénomènes semblent intervenir ; les premières conclusions données ci-dessus montrent que les variations de températures cutanées au cours du temps ont un effet. Mais, par ailleurs, il parait évident que les flux ont également une influence directe sur la perception et/ou le comportement ; ce point sera analysé dans le chapitre suivant. Par conséquent, les modifications à envisager sur la relation sensation-température avec le LHS en fonctionnement seront données ultérieurement.

Sensation	Tête (air f)	Tronc	Bra	Ma (devêtu)	Jambes	Pieds	Global
-3		27.8	21.5	15.9	29.2	20	24.8
-3		30.4	27.3	23.4	30.9	23.4	30.1
-2	22.3	30.4	27.3	23.4	30.9	23.4	30.1
-2	28.4	32.4	29.8	26.0	31.8	28.2	31.7
-1	28.4	32.4	29.8	26.0	31.8	28.2	31.7
-1	31.8	33.4	32.4	30.5	33	29.8	32.9
0	31.8	33.4	32.4	30.5	33	29.8	32.9
0	33.9	34.5	33.8	33.9	34.1	33.3	34.3
1	33.9	34.5	33.8	33.9	34.1	33.3	34.3
1	36.0	34.9	34.7	36.6	34.9	34.3	34.7
2		34.9	34.7	36.6	34.9	34.3	34.7
2		36.7	36.6	40.3	38.8	35	35.7
3		36.7	36.6	40.3		35	35.7
3		38.1	38	42.7		38.6	37

Tableau 3.9 : Nouvelles plages de sensation lorsque le LHS est éteint

Il est important de souligner certaines contraintes au cours des expériences sur le terrain, en particulier sur l'analyse des jugements sensoriels.

* Les panneaux utilisés dans les expériences ont une forte inertie ; les températures des panneaux évoluent très lentement après une modification de puissance.
* Les informations sur les ajustements vestimentaires n'ont pas été notées, donc on ne connaît pas le comportement vestimentaire qui a pu remplacer une réaction sur les panneaux.
* Les questionnaires ont été remplis toutes les 15 min comme l'indiquent les normes. Mais, nous pensons que le temps entre deux questionnaires est trop important, surtout quand on étudie les sensations locales car l'individu peut avoir des changements sensoriels importants entre deux questionnaires. Dans le cas des voitures [Piniec, 1999] les sensations des participants ont été enregistrés en continu. Les sujets indiquaient les changements de sensation dés qu'ils les percevaient.
* Les plages des sensations couvertes lors de ces essais ne sont pas suffisamment larges pour être certain que les changements de sensation et les comportements sont liés.

Chapitre 4
Modélisation des flux radiatifs

4.1 - Introduction

Le but de ce chapitre est d'étudier avec plus de précision les échanges radiatifs locaux liés à l'utilisation d'un 'système de chauffage local'. Dans un premier temps, il est utile de revenir sur les définitions et les termes qui vont être utilisés. L'étude préliminaire montre des exemples de calculs pour des conditions relativement simples isothermes et non-isothermes.

Ce chapitre a également pour but de comparer les flux locaux et globaux dans les cas expérimentaux décrits dans le chapitre précédent, c'est-à-dire pour le mannequin thermique en chambre climatique et pour les sujets réels. Le second objectif est de voir si l'on peut améliorer le calcul des sensations thermiques et si, dans le cas du LHS, celui-ci a un impact direct sur la perception.

4.2 - Modélisation des échanges infra rouges (IR) locaux

4.2.1 - Description du modèle

Le modèle 'I.R.' calcule les échanges radiatifs dans le domaine de l'*infra-rouge* ; il est basé sur la méthode d'échange [Leduc, 2003]. Cette méthode s'appuie sur la détermination des ***Puissances Nettes Echangées*** (PNE). On définit la PNE comme étant la différence entre le flux émis par une surface S_i absorbé par S_j et le flux émis par S_j absorbé par S_i. Le flux net échangé entre S_i et S_j s'écrit alors :

$$\Phi_{i\leftrightarrow j}^{net} = \Phi_{i\rightarrow j} - \Phi_{j\rightarrow i}$$

Cette grandeur ne s'intéresse qu'aux échanges radiatifs entre deux surfaces i et j. Le bilan radiatif de la surface s'exprime alors comme une somme de toutes les puissances nettes échangées :

$$\Phi_i^{net} = \sum_{j=1}^{N} \Phi_{i\leftrightarrow j}^{net}$$

Donc on peut déterminer l'ensemble des puissances nettes $\Phi_{i\leftrightarrow j}^{net}$ puis déduire le flux net total Φ_i^{net} exprimé en puissance (W) ou la densité de flux φ_i^{net} (W m^{-2}). Avant de présenter le modèle 'I.R.', il est important d'en écrire les hypothèses.

(a) Hypothèses

On commence par décrire l'environnement et le corps humain, qui compose une enceinte fermée par N surfaces, elles-mêmes décomposées en n_H surfaces pour le corps et n_E pour l'environnement ($N = n_H + n_E$). De plus :

- les surfaces sont opaques : $\tau = 0 \rightarrow \alpha + \rho = 1$,
- les surfaces sont supposées grises, diffuses en émission et en réflexion : $\varepsilon = \alpha = 1 - \rho$,
- les propriétés thermophysiques sont indépendantes de la température,
- le flux incident est uniformément réparti sur la surface,

- la température de chaque surface est supposée uniforme,
- le milieu ambiant est considéré comme transparent (cette hypothèse est généralement admise pour des pièces d'habitation [Incropera et DeWitt, 1981]).

Les propriétés d'émission et de réflexion impliquent donc que toute l'énergie quittant la surface est diffuse, ce qui autorise alors à traiter les échanges radiatifs sous forme d'équations algébriques après le calcul préliminaire des facteurs de forme 'diffus' [Siegel et Howell, 1992].

Si on écrit le flux net radiatif échangé par la méthode d'échange entre une surface i et une surface j l'équation est de la forme $(\Phi_{i,j}^{net})$:

$$\Phi_{i,j}^{net} = S_i.\varepsilon_i.B_{ij}.\sigma.(T_i^4 - T_j^4)$$

$\mathbf{B_{i,j}}$ est le facteur de Gebhart. Le flux net échangé par le i^{ème} segment du corps (i = 1, n_H) s'écrit :

$$\Phi_i^{net} = \sum_{j=1}^{N} \Phi_{i,j}^{net} = \sum_{j=1}^{N} S_i.\varepsilon_i.B_{ij}.\sigma.(T_i^4 - T_j^4)$$

On peut séparer ce flux net en deux termes, comme le montre la *Figure 4.1*.

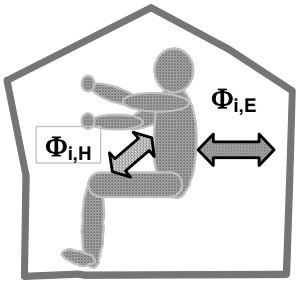


Figure 4.1 : Représentation de chaque contribution

$$\Phi_i^{net} = \sum_{j=1}^{nH} \Phi_{i,j}^{net} + \sum_{j=nH+1}^{N} \Phi_{i,j}^{net} = \Phi_{i,H}^{net} + \Phi_{i,E}^{net}$$

$\Phi_{i,H}^{net}$ représente le flux échangé par le segment i avec l'ensemble du corps humain

$\Phi_{i,E}^{net}$ le flux échangé par le segment i avec les parois de l'enceinte.

Maintenant, le flux net total échangé pour l'ensemble du corps s'écrit :

$$\Phi^{net} = \sum_{i=1}^{nH} \Phi_i^{net} = \sum_{i=1}^{nH} [\Phi_{i,H}^{net} + \Phi_{i,E}^{net}] = \Phi_H^{net} + \Phi_E^{net}$$

Pour l'ensemble du corps $\Phi_H^{net} = 0$, on arrive à :

$$\Phi^{net} = \Phi_E^{net} = \sum_{i=1}^{nH} \sum_{j=nH+1}^{N} S_i.\varepsilon_i.B_{i,j}.\sigma.(T_i^4 - T_j^4)$$

(b) Définition des facteurs géométriques

► **<u>Facteurs de forme</u>**

Le facteur de vue ou facteur de forme (F_{ij}) est une grandeur purement géométrique entre deux surfaces S_i et S_j (cf. *Figure 4.2*). Il représente la fraction du flux total hémisphérique provenant de S_i qui atteint S_j et s'écrit comme :

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi S_i} \int_{Si} \int_{Sj} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{L_{ij}^2} dS_j dS_i$$

dS_i et dS_j sont les éléments de surface pris respectivement sur S_i et S_j, L_{ij} est la distance entre dS_i et dS_j. Les θ_i et θ_j sont les angles par rapport aux normales n_i et n_j [Incropera et De Witt, 1981].

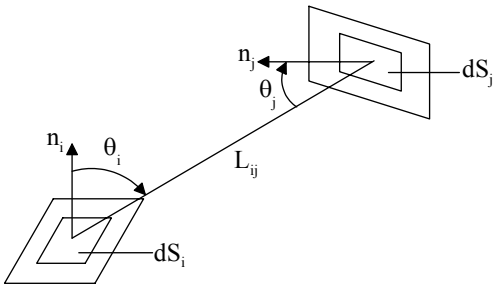


Figure 4.2 : Facteur de forme entre deux surfaces S_i et S_j

Les facteurs de forme ainsi définis doivent obéir aux relations algébriques de réciprocité et de fermeture.

- La relation de réciprocité découle directement de la définition des facteurs de forme. Elle est aussi directement liée à l'application du deuxième principe de la thermodynamique entre deux surfaces noires qui se traduit par l'absence de flux net échangé lorsque les deux surfaces sont à la même température :

$$T_i = T_j \Leftrightarrow \Phi_{ij}^{net} = 0 \qquad soit \qquad S_i F_{ij} = S_j F_{ji}$$

- La relation de fermeture est la conséquence de la conservation de l'énergie. Dans une enceinte fermée composée de N surfaces, l'énergie quittant chaque surface doit être interceptée par l'ensemble des surfaces, ce qui impose que la somme des facteurs de vue doit être égale à l'unité :

$$\sum_{j=1}^{N} F_{ij} = 1$$

Calcul de facteurs des formes

Il existe plusieurs techniques de calcul de facteurs des formes. On peut déterminer ces facteurs par des mesures. Fanger (1970) a été le premier à mesurer tous les facteurs d'aire du corps humain vu dans toutes les directions en utilisant une technique photographique ; ainsi, les facteurs de formes étaient calculés entre le corps et les surfaces rectangulaires. Jones et al. (1998) mesurent les facteurs d'aire entre un mannequin debout et une interface standard appelée 'enceinte sphérique équivalente'. Oguro (2001) a fait plusieurs essais de la technique de Fanger.

L'approche qui nous intéresse est l'approche stochastique de *Monte Carlo* [Siegel et Howell, 1992]. Nous avons choisi d'utiliser cette méthode statistique, car elle est bien adaptée à des géométries 3D complexes, et elle est utilisée depuis longtemps dans notre laboratoire [Leduc, 2003].

Le principe de la méthode consiste à émettre n photons dans des directions aléatoires depuis des points aléatoirement répartis sur la surface émettrice S_i. Le choix des points et des directions d'émission se fait à partir de la génération de nombres aléatoires dont la distribution se doit de représenter au mieux la dépendance directionnelle de l'émissivité de la surface. Le nombre n de photons émis varie en général entre 10 000 et 100 000 ; il est identique pour toutes les surfaces et l'incertitude absolue sur les facteurs de vue diminue lorsqu'il augmente [Siegel et Howell, 1992]. Tous les photons qui sont interceptés par la surface S_j sont alors comptabilisés n_{ij} pour calculer le facteur de forme F_{ij}. Il s'écrit :

$$F_{ij} = \frac{n_{ij}}{n}$$

La méthode de Monte Carlo utilisée assure que la densité de flux de photons frappant chaque surface est proportionnelle à l'aire de la surface. Cette condition permet de ne pas être gêné par les très petites surfaces qui pourraient ne pas être 'vues' par des surfaces plus importantes. Ainsi, pour chaque surface, on tire au hasard le même nombre de photons (n) et on applique une pondération proportionnelle à l'aire de la surface pour chaque photon lancé. Un photon émis par une surface S_i va donc compter pour (S_i*1) photon. L'estimateur du facteur de forme F_{ij} est alors défini comme suit [Leduc, 2003] :

$$F_{ij} = \frac{S_i n_{ij} + S_j n_{ji}}{S_i n + \sum_{k=1}^{N} S_k n_{ki}}$$

$S_i n_{ij}$ est le nombre de photons émis par la surface i qui atteignent la surface j.

$S_j n_{ji}$ est le nombre de photons émis par la surface j qui atteignent la surface i.

$S_i n + \sum_{k=1}^{N} S_k n_{ki}$ est le nombre total de photons émis et reçus par la surface i.

► **Facteurs d'absorption**

Les facteurs de forme sont purement géométriques et ne dépendent que de la position relative des surfaces. L'évolution de ces facteurs vers la prise en compte des propriétés radiatives (ε) de toutes les surfaces de l'enceinte peut se faire à travers le calcul des facteurs d'absorption (B_{ij}) ou facteurs de Gebhart [Gebhart, 1961].

Par définition, le facteur d'absorption B_{ij} entre deux surfaces diffuses S_i et S_j, représente la fraction d'énergie émise par S_i qui est absorbée par S_j de façon directe ou après de multiples réflexions (*Figure 4.3*). On peut considérer que le facteur de Gebhart est un facteur de forme 'amélioré', puisqu'il dépend de la géométrie (F_{ij}) et des émissivités de toutes les surfaces (ε_i).

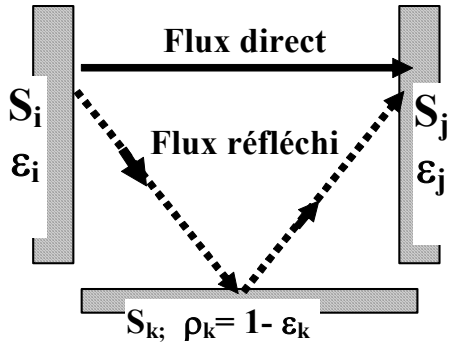


Figure 4.3 : Représentation des facteurs de Gebhart entre deux surfaces

Calcul des facteurs d'absorption

Les facteurs d'absorption sont calculés à partir de la mise en équation de la *Figure 4.3*. En effet, si l'on décompose le flux émis par i absorbé par j en la somme d'un flux directement absorbé par j et d'un flux réfléchi sur toutes les surfaces puis absorbé par j, on obtient :

$$\Phi_{i,j}^{net} = S_i.\varepsilon_i.B_{i,j}.\sigma.(T_i^4 - T_j^4) = S_i.\varepsilon_i.\sigma.(T_i^4 - T_j^4).F_{i,j}.\varepsilon_j + \sum_{k=1}^{N} S_i.\varepsilon_i.\sigma.(T_i^4 - T_j^4).\rho_k.F_{i,k}.B_{k,j} \quad (4.5)$$

- $S_i.\varepsilon_i.\sigma.(T_i^4 - T_j^4).F_{i,j}.\varepsilon_j$ est le flux émis par i absorbé directement par j
- $S_i.\varepsilon_i.\sigma.(T_i^4 - T_j^4).\rho_k.F_{i,k}.B_{k,j}$ est le flux émis par i absorbé par j après réflexion sur k.

Après simplification par $S_i.\varepsilon_i.\sigma.(T_i^4 - T_j^4)$, on a :

$$B_{i,j} = F_{i,j}.\varepsilon_j + \sum_{k=1}^{N} \rho_k.F_{i,k}.B_{k,j}$$

- $F_{i,j}.\varepsilon_j$ est la fraction du flux émis par i directement absorbé par j
- $\sum_{k=1}^{N} \rho_k.F_{i,k}.B_{k,j}$ est la fraction du flux émis par i réfléchi sur les autres surfaces (y compris sur elle-même) puis absorbé par j.

4.2.2 - La méthode d'analyse

(a) Facteurs d'influence

Dans le bilan des Puissances Nettes Echangées sur une surface i, si l'on souhaite analyser l'influence de chaque surface j, il faut introduire d'autres grandeurs pour quantifier le "*poids*

radiatif" de ces surfaces (terme introduit par Leduc, 2003). Les échanges radiatifs entre l'homme et son environnement peuvent être analysés selon deux types d'approches :

- la première consiste à considérer le corps humain dans son ensemble et à étudier les échanges radiatifs entre le corps H et les parois de enceinte E ; l'objectif vise à faire ressortir les parois les plus influentes sur la totalité de l'individu ;
- la deuxième approche s'intéresse aux échanges entre les parois et chaque segment corporel ; l'intérêt de cette approche est de repérer des surfaces localement actives qui ne le sont pas forcément sur l'ensemble du corps.

L'analyse de Φ_{H-j}^{net} [Leduc, 2003] nous permet de repérer rapidement les parois j qui sont à l'origine d'un flux net important. Cependant, bien que cette grandeur puisse rendre compte d'un flux net échangé élevé, elle ne permet pas de quantifier le poids radiatif associé à un élément de l'enceinte parmi tous les autres.

►Influence globale

Un paramètre adimensionnel P_j^H est défini pour quantifier l'influence radiative de la surface j (cf. *Figure 4.4a*). Ce paramètre, que l'on peut assimiler à un facteur d'influence globale, s'exprime sous la forme :

$$P_j^H = \frac{\left|\Phi_{H-j}^{net}\right|}{\Phi_{H-E}^{*} + \Phi_{H-H}^{*}}$$

$\Phi_{H-E}^{*} = \sum_{j=nH+1}^{N} \left|\Phi_{H-j}^{net}\right|$ est la somme des valeurs absolues des échanges entre l'homme et les n_E parois de l'environnement.

$\Phi_{H-H}^{*} = \sum_{i=1}^{nH} \left|\Phi_{H-i}^{net}\right|$ est la somme des valeurs absolues des échanges de l'homme vers lui-même.

P_j^H peut se lire de la façon suivante : '*les échanges entre la paroi j et le corps H interviennent pour* P_j^H *% sur l'échange global* Φ_{H-E}'. Par exemple, la grandeur P_{11}^H représente la part de l'influence de la surface n°11 par rapport à l'influence de toutes les surfaces de l'environnement. Elle détermine le 'niveau d'activité' de la surface 11 relativement à l'ambiance étudiée. Lorsque P_j^H est nettement plus important que la moyenne, on dit alors que j est une 'surface active'. De plus, il est possible d'estimer l'influence totale de l'environnement sur le corps et sur lui-même en écrivant :

$$\sum_{j=1}^{N} P_j^H = \sum_{j=1}^{nH} P_j^H + \sum_{j=nH+1}^{N} P_j^H = P_H^H + P_E^H = 1$$

P_H^H et P_E^H représentent la proportion des flux nets échangés par l'homme avec lui-même et avec les parois de l'enceinte. P_E^H se calcule selon :

$$P_E^H = \sum_{j=nH+1}^{N} P_j^H = \frac{\sum_{j=nH+1}^{N} \left|\Phi_{H-j}^{net}\right|}{\Phi_{H-E}^{*} + \Phi_{H-H}^{*}}$$

Ce paramètre nous renseigne sur le poids de l'environnement sur les échanges radiatifs du corps humain. Par exemple, si P_E^H = 85 %, on peut dire que le corps humain consacre 85 % de ses échanges radiatifs avec l'environnement et 15 % avec lui-même. Les coefficients P_j^H et P_E^H permettent ainsi d'effectuer une hiérarchisation de l'influence des surfaces.

►Influence locale

L'analyse locale est caractérisée par les échanges Φ_{i-j}^{net} entre les segments i et les surfaces j de l'enceinte. On définit un autre paramètre adimensionnel, noté P_j^i qui s'écrit comme le rapport du flux net échangé entre i et j sur le bilan total de i :

$$P_j^i = \frac{\left|\Phi_{i-j}^{net}\right|}{\sum_{j=1}^{N}\left|\Phi_{ij}^{net}\right|} \quad (i = 1, n_H ; j = n_H + 1, N) \qquad \text{avec} \qquad \sum_{j=1}^{N} P_j^i = 1$$

P_j^i quantifie l'importance de l'échange radiatif entre le segment i et la paroi j et représente la contribution de l'échange Φ_{i-j}^{net} sur le bilan total du segment i (cf. *Figure 4.4b*). Par exemple, P_{15}^1 s'interprète de la façon suivante : «les échanges entre la tête (1) et la paroi Est (15) représentent P_{15}^1% du flux radiatif de la tête».

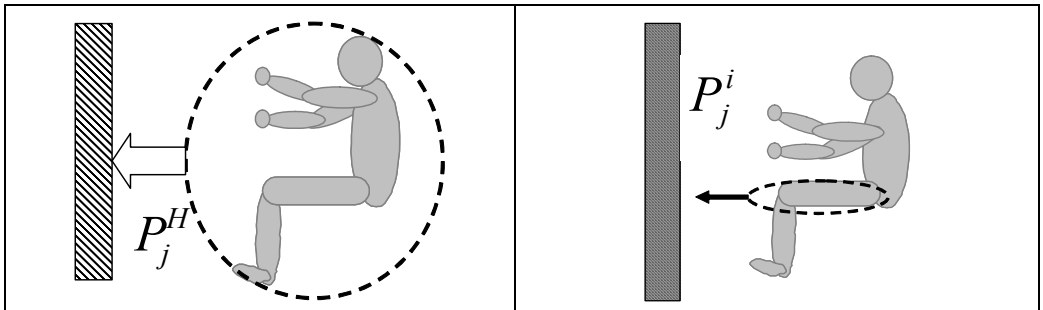


Figure 4.4a : Facteur d'influence global | Figure 4.4b : Facteur d'influence local

Plus généralement, ce paramètre indique que la surface j intervient pour P_j^i% dans la totalité des flux échangés par i. Cette grandeur présente l'avantage de faire ressortir les influences locales d'une paroi sur un ou plusieurs segments corporels, même si celle-ci n'échange que très peu d'énergie avec l'ensemble du corps :

$$\Phi_{H-j}^{net} \text{ faible } \neq P_j^i \text{ faible.}$$

Comme pour l'analyse globale, il est possible de calculer le niveau d'activité de l'environnement sur chaque segment de l'individu, noté P_E^i tel que :

$$P_E^i = \sum_{j=n_H+1}^{N} P_j^i$$

Donc, $P_E^1 = 85\,\%$ indique que l'environnement intervient pour 85 % dans les échanges radiatifs de la tête (1).

Remarque sur l'origine de l'influence des surfaces

On a vu que la puissance nette échangée Φ_{ij}^{net} entre les deux surfaces i et j s'exprime à partir des facteurs d'absorption selon :

$$\Phi_{ij}^{net} = S_i.\varepsilon_i.B_{ij}.\sigma(T_i^4 - T_j^4)$$

- Le premier terme $S_i.\varepsilon_i.B_{ij}$ correspond à la surface totale d'échange entre i et j. Il dépend de la géométrie $(S_i.F_{ij})$ et des propriétés radiatives(ε_i). Il caractérise la contribution "*optico-géometrique*" de l'ambiance sur le flux net échangé.

- Le second terme $\sigma(T_i^4 - T_j^4)$ est relatif à l'écart de température entre les deux surfaces. Il caractérise la contribution "*thermique*" de l'ambiance sur le flux net échangé.

Ainsi, l'analyse de ces deux quantités permet de connaître l'origine d'une puissance nette, à savoir si elle est due à une disposition optico-géométrique favorable ou à un écart de température important.

Remarque sur le calcul de flux radiatif

Pour calculer et analyser les flux radiatifs, il y a plusieurs étapes qui nécessitent divers outils numériques :

1. Géométrie : La description de la configuration géométrique peut être faite à l'aide d'un logiciel de CAO. Lors de la construction de cette description, il faut simplifier certains éléments de la géométrie réelle pour définir un nombre raisonnable de surfaces élémentaires représentant l'enceinte habitée. A ce niveau, il faut également regrouper certaines surfaces pour composer les N groupes de surfaces qui décriront l'enceinte et qui ont les mêmes propriétés radiatives, et que l'on peut considérer comme isothermes. Par exemple, on regroupe les différentes surfaces élémentaires composant le bureau pour former un 'groupe bureau' qui, par la suite, sera traité comme une seule surface nommée 'bureau' qui sera caractérisée par une température unique.
2. Facteurs de forme : Le calcul des facteurs de forme est fait à partir du ficher de données géométriques qui décrit les surfaces élémentaires. A l'issue du calcul, nous obtenons une matrice N*N des facteurs de forme entre les N groupes définis précédemment. Dans notre cas, ce calcul est réalisé par la méthode de Monte-Carlo développée au laboratoire et il n'est effectué qu'une fois par configuration géométrique.
3. Calcul des flux : Le calcul des flux et des densités de flux des N groupes de surfaces est réalisé par le module 'Echanges Infra-rouge' (IR) intégré dans TRNSYS, ce qui permet le couplage avec les autres composants au cours du temps.
4. Surfaces actives : Le post-traitement des données, c'est-à-dire le calcul des 'Poids Relatifs' pour la détermination des surfaces actives, peut ensuite être fait grâce à un programme développé sous MATLAB.

La précision des résultats dépend énormément de la précision de la description de la géométrie. Le corps humain a une géométrie complexe et, lors de l'étape no.1, des hypothèses et simplifications qui doivent être faites peuvent entraîner des différences [Thellier et al., 2004]. La composition des N groupes à partir des surfaces élémentaires demande également une analyse de la thermique de l'environnement.

4.2.3 - Etudes Préliminaires

Pour toute notre étude, en particulier l'analyse des conditions correspondant aux expériences, nous avons utilisé directement des facteurs de forme qui nous ont été transmis par l'équipe de ADAI. Avant d'étudier en détails les comparaisons entre résultats issus de nos simulations et ceux des expériences, nous avons fait quelques tests préliminaires dans des cas simples.

(a) Description de la géométrie

La géométrie de l'ensemble (être humain, local et bureau chauffant) est représentée sur la *Figure 4.5*. La pièce a les dimensions du local utilisé lors des expériences avec les sujets réels (4.7 m de longueur, 2.86 m de largeur et 2.96 m de hauteur). Chaque paroi représente un groupe, soit 6 groupes pour le local. Le bureau, étant plus proche, a une description plus fine. Il est composé de 5 groupes dont 3 représentent les panneaux chauffants. Enfin, l'être humain nommé 'Tuga' est

représenté sur la *Figure 4.6* ; sa surface corporelle est de 1.75 m², car les surfaces en contact avec le siège ne sont pas prises en compte.

La géométrie initiale est composée de 10 000 surfaces élémentaires, quadrangulaires ou triangulaires, qui ont une surface minimale de 0.0025 m². Le calcul des facteurs de forme entre les surfaces élémentaires est effectué par une méthode analytique [Raimundo et al., 2004]. Divers regroupements ont été réalisés, ce qui amène à plusieurs descriptions, le nombre de groupes de surfaces allant de 18 à 29. Ce qui les différencie est la présence ou non du bureau et la composition du corps humain. Par exemple, pour N = 18, le corps est représenté par 6 groupes et, pour N = 29, il est représenté par 16 groupes qui correspondent aux 16 segments du mannequin thermique MARIA.

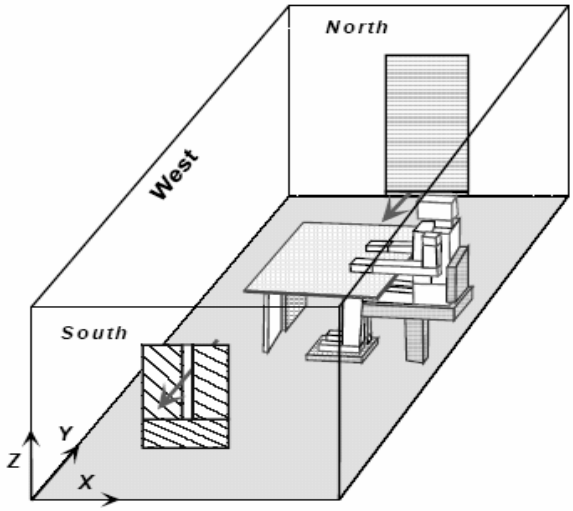


Figure 4.5 : Géométrie du bureau définie par ADAI [Raimundo et al., 2004]

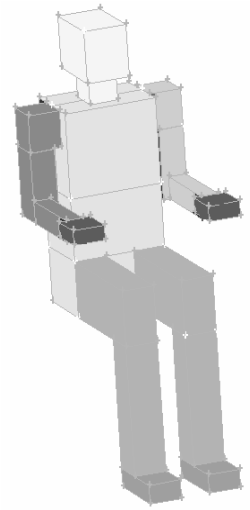


Figure 4.6 : Géométrie de l'occupant nommé 'TUGA'

Nous détaillons ici la configuration pour N = 18. Dans ce cas, les groupes sont répartis comme décrit dans le *Tableau 4.1* :

- 6 groupes décrivent l'occupant ($n_H = 6$) et sont numérotés de 1 à 6
- 12 groupes décrivent le reste de l'enceinte (($n_E = 12$) et sont numérotés de 7 à 18

Indice		Nom	Name	Surface m²
1	Homme	Tête	Head	0,1692
2		Tronc	Chest	0,3790
3		Bras	Arms	0,3340
4		Mains	Hands	0,0784
5		Jambes	Legs	0,7018
6		Pieds	Foots	0,0880
7	LHS	Panneau Horizontal	Horizontal Panel	0,1720
8		Panneau Vertical	Vertical Panel	0,2844
9		Chauffe pieds	Foot Rest	0,2060
10	Mobilier	Dessus de table	Table Top	2,4876
11		Dessous de table	Table Back	1,2024
12		Chaise	Chair	0,9600
13	local	Mur Nord	North Wall	8,4656
14		Mur sud	South Wall	8,4656
15		Mur Est	East Wall	13,9120
16		Mur Ouest	West Wall	13,9120
17		Plafond	Ceiling	13,4420
18		Plancher	Floor	13,4420

Tableau 4.1 : Surfaces du mannequin et des autres parois du bureau [Raimundo et al., 2004]

(b) Les facteurs de forme

La matrice carrée de dimensions *(18*18)* est constituée de facteurs de formes entre chaque groupe isotherme. Elle peut être divisée en deux zones (cf. *Tableau 4.2*) : la sous-matrice (zone H-

H) composée des facteurs de forme entre les segments de l'occupant et la sous-matrice (zone H-E) composée des facteurs de forme entre les surfaces de l'occupant et celles de l'habitat. La *Figure 4.7* présente les facteurs de vue des segments corporels vers le corps et l'enceinte.

		H - Homme						E - Enceinte											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H- Homme	1	0.042	0.144	0.019	0.004	0.0003	0	0	0	0	0.06	0	4E-04	0.078	0.079	0.29	0.118	0.149	0.018
	2	0.064	0	0.216	0.006	0.0348	0	0.008	0.003	0	0.097	0.009	0.06	0.048	0.047	0.205	0.094	0.069	0.041
	3	0.01	0.248	0.04	0.017	0.0183	0	0	7E-04	0	0.088	0.001	0.054	0.054	0.055	0.2	0.062	0.075	0.078
	4	0.008	0.029	0.076	0.001	0	0	0	0	0	0.516	0	0	0.034	0.036	0.055	0.093	0.151	0
	5	1E-04	0.019	0.009	0	0.1725	0.03	0.094	0.073	0.009	0.119	0.045	0.15	0.035	0.034	0.062	0.008	0	0.142
	6	0	0	0	0	0.2371	0.029	0.003	0.055	0.297	0.076	0.043	0.043	0.035	0.025	0.031	0.036	0	0.089
E -- Enceinte	7	0	0.017	1E-04	0	0.3925	0.002	0	0.076	0.003	0.13	0.05	0.063	0.01	0.009	0.024	0	0	0.224
	8	0	0.005	810^{-4}	0	0.1783	0.017	0.046	0	0.03	0.269	0.015	0.031	0.023	0.024	0.131	0	0	0.232
	9	0	0	0	0	0.0314	0.119	0.002	0.041	0	0.064	0.029	0.06	0.047	0.048	0.093	0.127	0	0.34
	10	0.004	0.015	0.012	0.016	0.0335	0.003	0.009	0.031	0.005	0	0.084	0.015	0.048	0.047	0.108	0.111	0.213	0.245
	11	0	0.003	310^{-4}	0	0.0263	0.003	0.007	0.003	0.005	0.175	0	0.013	0.032	0.032	0.087	0.293	0.002	0.317
	12	110^{-4}	0.023	0.019	0	0.1104	0.004	0.011	0.009	0.013	0.037	0.017	0.076	0.033	0.034	0.262	0.004	0.017	0.332
	13	0.002	0.002	0.002	310^{-4}	0.0029	310^{-4}	2.10^{-4}	810^{-4}	0.001	0.014	0.005	0.004	0	0.084	0.226	0.229	0.223	0.204
	14	0.002	0.002	0.002	310^{-4}	0.0029	210^{-4}	210^{-4}	8e-4	0.001	0.014	0.005	0.004	0.085	0	0.226	0.229	0.222	0.204
	15	0.004	0.006	0.005	310^{-4}	0.0031	210^{-4}	310^{-4}	0.003	0.001	0.02	0.008	0.018	0.138	0.136	0	0.236	0.227	0.197
	16	0.001	0.003	0.002	510^{-4}	0.0004	210^{-4}	0	0	0.002	0.02	0.025	310^{-4}	0.14	0.138	0.236	0	0.228	0.204
	17	0.002	0.002	0.002	810^{-4}	0	0	0	0	0	0.04	210^{-4}	0.001	0.141	0.139	0.236	0.236	0	0.201
	18	210^{-4}	0.001	0.002	0	0.0075	510^{-4}	0.003	0.005	0.005	0.046	0.029	0.024	0.129	0.129	0.205	0.212	0.202	0

Tableau 4.2 : Matrice des facteurs de forme (Zone H-H en rouge et Zone H-E en bleu)

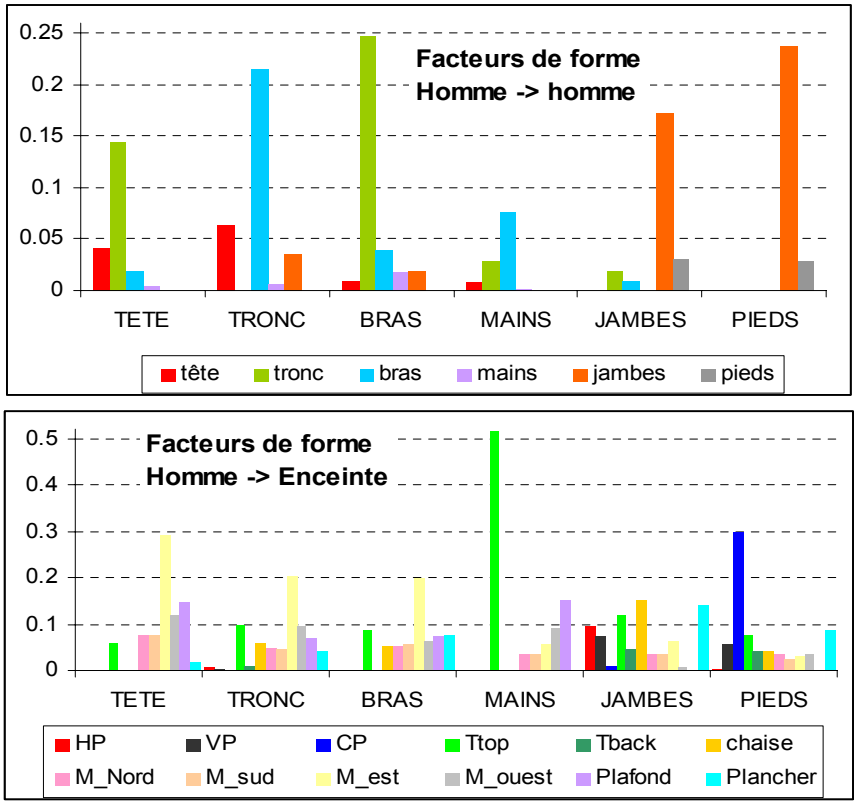


Figure 4.7 : Visualisation des facteurs de vue des segments corporels vers le corps et l'enceinte

Le facteur de forme global F_{H-H} se calcule facilement à partir de la règle de décomposition :

$$F_{H-H} = \frac{1}{S_H}\sum_{i=1}^{7} S_i F_{i-H}$$

$F_{i-H} = \sum_{j=1}^{7} F_{ij}\ (j = 1, 7)$ est le facteur de forme entre l'élément i et l'ensemble du corps humain H. On obtient pour cette géométrie : $F_{H-H} = 0.2634$ et par conséquent : $F_{H-E} = 1 - F_{H-H} = 0.7366$

D'un point de vue purement géométrique, on remarque donc que le corps humain 'voit' ses propres segments à 26 % et l'habitat qui l'entoure à 74 % environ. Le F_{H-E} représente dans ce cas comme f_{eff} (facteur effectif de surface rayonnante de l'homme vers environnant), qui est en général utilisé dans les méthodes de calcul simplifié. Si on compare cette valeur à celle calculée dans le cas d'une géométrie plus complexe (*Figure 4.8*), l'écart est d'environ 3 % d'erreur, ce qui est tout à fait acceptable.

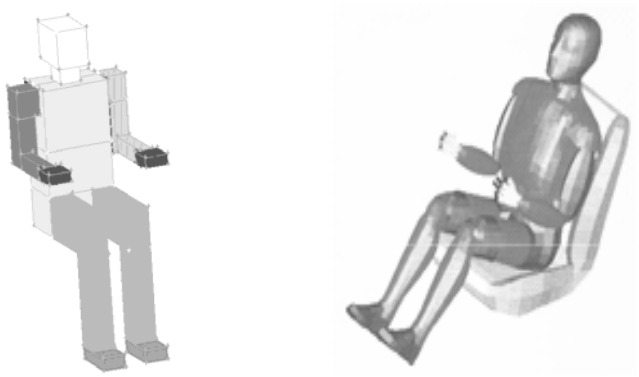


Figure 4.8 : La géométrie de'TUGA' et celle d'un mannequin virtuel 'MATHER' [Thellier et al., 2004]

Dans la sous-matrice F_{H-E}, il est intéressant de repérer les parois du bureau qui vont jouer un rôle géométrique important sur l'ensemble du corps. Il s'agit alors de décomposer F_{H-E} en une somme des facteurs de forme F_{H-j} entre le corps H et l'élément j de l'environnement E, tel que:

$$F_{H-E} = \sum_{j=7}^{18} F_{H-j} \qquad \text{avec} \qquad F_{H-j} = \frac{S_j}{S_H} \sum_{i=1}^{6} F_{ji}, \quad j = 7 \; à \; 18$$

Les résultats présentés dans la *Figure 4.7* et le *Tableau 4.3* mettent en évidence l'influence géométrique de certaines parois du local sur l'individu. Ces éléments, qui bénéficient d'une disposition géométrique favorable par rapport à l'individu, seront susceptibles de jouer un rôle radiatif important, suivant leur émissivité et leur température. La valeur de F_{H-j}/F_{H-E} nous donne l'importance relative de F_{H-j} par rapport au reste de l'enceinte [Leduc, 2003].

La surface qui est le plus vue par le corps est la paroi Est (19 %). La *Figure 4.5* montre que la paroi Est est proche du dos de l'individu. Les autres surfaces pareillement importantes sont le dessus de table (16 %), la chaise (12 %) et le plancher (12 %).

n° de Surface	Nom de surface	F_{H-j}	F_{H-j}/F_{H-E} (%)
7	HP	0.0404	5.49
8	VP	0.0325	4.41
9	CP	0.0177	2.40
10	TTop	0.1181	**16.03**
11	TBack	0.0223	3.02
12	Chaise	0.0859	**11.66**
13	Mur Nord	0.0450	6.11
14	Mur Sud	0.0450	6.11
15	Mur Est	0.1383	**18.77**
16	Mur Ouest	0.0525	7.12
17	Plafond	0.0491	6.67
18	Plancher	0.0868	**11.78**

Tableau 4.3 : Les surfaces de la pièce 'vues' par l'ensemble du corps

(c) Conditions de simulation

Avant d'utiliser le modèle dans des conditions réelles correspondant aux expériences, nous avons testé trois configurations plus simples.

- Le cas 1 correspond à une situation 'idéale' : toutes les surfaces sont noires, le corps est isotherme et l'enceinte également. Par conséquent, il n'y a des échanges radiatifs qu'entre l'homme et l'enceinte.
- Le cas 2 nous permet de déterminer l'effet d'une variation d'émissivité sur le sujet comme celle utilisée lors d'expériences décrites par de Dear [De Dear et al., 1997a].
- Le cas 3 correspond à des conditions expérimentales réelles réalisées chez ADAI [Gaspar, 2004].

Le *Tableau 4.4* donne les valeurs des émissivités et des surfaces utilisées par le modèle.

Numéro du cas	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Les Hypothèses : Surfaces	Surfaces noires : $\varepsilon_{i=}1$ (i = 1, N)	Quelques surfaces sont grises ; ε_{mur} = 0.96, ε_{nu} = 0.95 et ε_{alu} = 0.1	Quelques surfaces sont grises ; ε_{mur} = 0.96, ε_{nu} = 0.95 et ε_{alu} = 0.1
Corps	Isotherme : $T_{i=}T_{s=}33°C$ $\Phi_{i,B}^{net}=0$	Isotherme : $T_{i=}T_{s=}33°C$ $\Phi_{i,B}^{net}=0$	Condition non isotherme. Températures pour chaque segment selon expériences réelles faites par ADAI.
Enceinte	Isotherme: $T_j = T_m = 20°C$ (j = nb+1,N)	Isotherme: $T_{j=}T_{mur=}20°C$ (j = nb+1,N)	Condition non isotherme. Les parois sont à 10 ou 30°C et le mobilier à 20°C.

Tableau 4.4 : Les hypothèses pour chaque cas étudié

(d) Les analyses et présentation de résultats

Les résultats pour chaque cas seront discutés en termes de poids radiatifs global et local.

► **CAS 1** : **Surfaces noires**

Dans ce cas, l'homme est dans une ambiance de 20°C et lui-même est à 33°C. Les émissivités de toutes les surfaces sont fixées à 1, par conséquent $F_{ij=}B_{ij}$. Comme tous les segments du corps sont à la même température T_s on obtient $\Phi_{i,H}^{net}=0$, mais chaque segment du corps échange de l'énergie avec toutes les autres surfaces qui l'entourent. Par conséquent, si on écrit l'équation du flux net échangé par chaque segment et pour l'ensemble de corps on obtient :

$$\text{Flux Global} \quad \Phi^{net}=\sum_{i=1}^{nH} S_i \sum_{j=nH+1}^{N} .F_{ij}.\sigma.(T_i^4-T_j^4)$$

$$\text{Flux Local} \quad \Phi_i^{net}=\Phi_{i,E}^{net}=\sum_{j=nH+1}^{N} S_i.F_{ij}.\sigma.(T_s^4-T_m^4)$$

Si on compare à l'expression simplifiée de la littérature : $\Phi = S_B.f_{eff}.\varepsilon.\sigma.(T_s^4-T_{mrt}^4)$

On obtient les équations suivantes : $T_{mrt}=T_m$ et $f_{eff,i}=\sum_{j=nH+1}^{N}\left[F_{ij}\right]=F_{i,E}$

$$f_{eff}=\left[\sum_{i=1}^{nH}\left(S_i.\sum_{j=nH+1}^{N}F_{ij}\right)\right]\Big/S_B \qquad \text{avec} \qquad S_B=\sum_{i=1}^{n_H}S_i$$

En comparant avec l'expression $\Phi_i^{net}=S_i.h_{r,i}.(T_s^4-T_{mrt}^4)$, le calcul des flux locaux Φ_i^{net} (W) nous permet d'évaluer les coefficients d'échange radiatif $h_{r,i}$ (W/m^{-2} °C) par l'expression :

$$h_{r,i}=\frac{\Phi_i^{net}}{S_i.(T_s-T_m)}$$

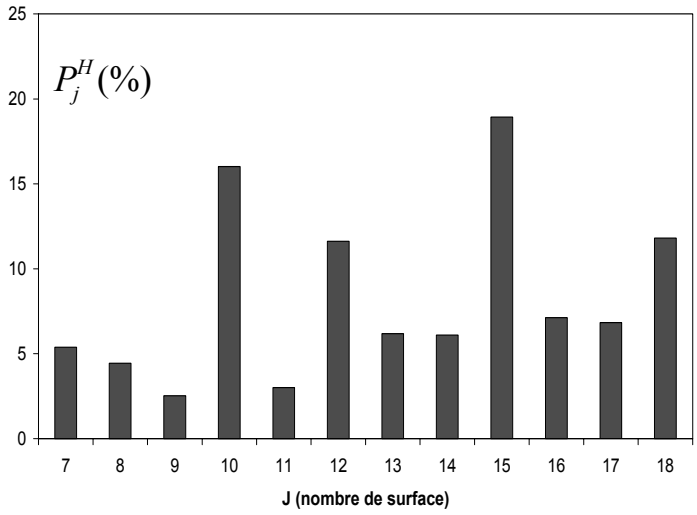
Le *Tableau 4.5* présente les résultats du calcul des coefficients d'échange et des flux pour chaque segment. Ce même calcul a été fait avec plusieurs températures ambiantes et plusieurs configurations géométriques, donc, des facteurs de formes différents [résultats complets : Thellier et al., 2004].

Segment	Aire (m^2)	ε	Φ (W)	φ (W m^{-2})	f_{eff}	h_r (W/m^2°C)
Tête	0.169	1	10.63	62.83	*0.792*	4.84
Tronc	0.379	1	20.44	53.92	*0.68*	4.15
Bras	0.334	1	17.69	52.96	*0.668*	4.07
Mains	0.078	1	5.51	70.23	*0.885*	5.43
Jambes	0.702	1	42.89	61.11	*0.77*	4.7
Pieds	0.088	1	5.12	58.22	*0.734*	4.48
Global	1.75	1	102.28	58.43	*0.737*	4.5

Tableau 4.5 : Puissances Nettes Echangées, coefficients d'échange et émissivités pour le cas n° 1

Les flux nets échangés Φ^{net}_{H-j} ainsi que les facteurs d'influence P^H_j entre l'homme et son environnement sont représentés sur la *Figure 4.9*. La température du corps étant plus élevée que celles des parois environnantes, les *puissances nettes échangées* (PNE) Φ^{net}_{H-j} sont toutes positives, donc perdues par le corps humain.

On distingue 4 surfaces actives pour lesquelles les échanges et les facteurs d'influence avec le corps sont plus significatifs : le dessus de table (10), la chaise (12), la paroi Est (15) et le plancher (18). Il est important de noter la forte influence radiative de la paroi Est (P^H_{15} > 18 %) dont l'échange avec le corps est au moins 3 fois plus important que les échanges du corps avec n'importe laquelle des autres parois. Dans cette configuration, les différences de flux sont directement liées à la composante géométrique.



J	Nom de surface	Φ^{net}_{H-j} (W)
7	HP	5.51
8	VP	4.55
9	CP	2.59
10	TTop	16.39
11	TBack	3.08
12	Chaise	11.89
13	Mur Nord	6.33
14	Mur Sud	6.23
15	Mur Est	19.35
16	Mur Ouest	7.30
17	Plafond	6.99
18	Plancher	12.08
Total		102.29

Figure 4.9 : Echanges radiatifs entre le corps humain H et les parois du local (J = 7, 18) pour le cas n° 1

La valeur de P^H_E nous indique que l'environnement représente 100 % des échanges radiatifs du corps humain, ce qui est normal car le corps est isotherme, donc il n'échange pas avec lui-même ($P^H_H = 0$).

L'analyse globale permet de discerner un certain nombre de surfaces actives sur l'ensemble du corps. Cependant, ces informations ne suffisent pas à déterminer sur quel(s) segment(s) du corps une paroi active joue un grand rôle. Le *Tableau 4.6* présente les facteurs d'influence locale. Les chiffres notés en gras correspondent aux surfaces les plus actives sur chaque segment.

J	Surface	1(Tête)	2(Tronc)	3(Bras)	4(Mains)	5(Jambes)	6(Pieds)
7	HP	0.00	1.16	0.00	0.00	12.24	0.40
8	VP	0.00	0.50	0.10	0.00	9.42	7.53
9	CP	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	**40.52**
10	TTop	7.54	14.21	13.17	**58.22**	**15.42**	10.40
11	TBack	0.00	1.35	0.15	0.00	5.79	5.79
12	Chaise	0.05	8.75	8.01	0.00	**19.52**	5.87
13	Mur Nord	9.87	7.05	8.15	3.89	4.52	4.74
14	Mur Sud	9.91	6.84	8.28	4.10	4.47	3.46
15	Mur Est	**36.60**	**30.10**	**29.99**	6.21	8.03	4.24
16	Mur Ouest	**14.88**	13.83	9.24	10.54	0.99	4.90
17	Plafond	**18.85**	10.12	11.17	**17.04**	0.00	0.00
18	Plancher	2.30	6.09	11.73	0.00	**18.41**	12.15

Tableau 4.6 : Facteur d'influence locale pour le cas n° 1

Comme le corps et l'environnement sont isothermes, les facteurs d'influence reflètent plus la composante 'optico-géométrique' ($S_i*\varepsilon_i*F_{ij}$) que la composante 'thermique' ($\sigma*(T_i^4 - T_j^4)$).

- Les panneaux rayonnants, c'est-à-dire les surfaces 7, 8 et 9, sont localement actifs sur un ou deux segments ; leur influence sur les autres parties du corps est négligeable. Le panneau horizontal (7) intervient exclusivement sur le bilan radiatif des jambes ($P_7^5 = 12\,\%$) et le panneau vertical (8) sur les jambes et les pieds ($P_8^5 = 9\ \%$, $P_8^6 = 8\ \%$). Au contraire, le chauffe-pieds intervient pour presque 41 % du bilan des pieds.
- Le dessus de la table est relativement de plus grande dimension (surface 2.5 m^2) que les panneaux ; il influence tous les segments corporels, mais beaucoup plus les mains ($P_{10}^4 = 58\ \%$). Le dessous de la table joue un rôle équivalent sur les jambes et pieds.
- La chaise (12) est active au niveau du tronc et des bras et aussi sur les jambes ($P_{12}^5 = 20\,\%$) et un peu sur les pieds.
- Les parois Nord (13) et Sud (14) influencent globalement tous les segments, mais légèrement plus la tête et les bras. Il est évident que les parois jouent un rôle significatif, car elles sont de grandes dimensions par rapport aux autres surfaces. On voit une forte influence de la paroi Est sur les membres supérieurs (tête, tronc, et bras) où les facteurs d'influences locaux sont considérables (environ 37 % sur la tête et 30 % sur le tronc et les bras).
- Le plafond (17) influence plus les parties supérieures du corps que les parties inférieures (les jambes et pieds) qui sont au-dessous de la table. La surface 18, le plancher, joue un rôle significatif sur le bilan radiatif des jambes ($P_{18}^5 = 18\,\%$) et des pieds ($P_{18}^6 = 12\,\%$).

► CAS 2 : Surfaces Grises

On considère maintenant que toutes les surfaces sont grises. Les parois ont une émissivité de 0.96, les bras et les jambes du mannequin sont couverts d'aluminium, d'émissivité 0.1, et pour le reste des segments, l'émissivité est de 0.95. L'ambiance et le corps sont isothermes comme dans le cas 1. Pour chaque segment on peut écrire :

$$\Phi_i^{net} = \Phi_{i,E}^{net} = S_i.\varepsilon_i.\sum_{j=nH+1}^{N} B_{ij}.\sigma.(T_s^4 - T_m^4)$$

Comme précédemment, si l'on compare ces expressions à l'équation simplifiée on obtient :

$$T_{mrt} = T_m \qquad \text{et} \qquad f_{eff,i} = \sum_{j=nH+1}^{N}\left[B_{ij}\right]$$

De la même manière pour l'ensemble du corps, on peut écrire une équation pour f_{eff} global, mais d'abord il faut déterminer l'émissivité moyenne :

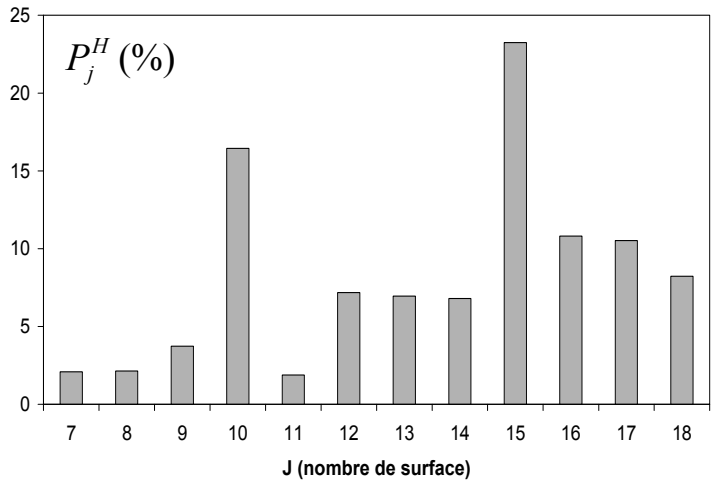
$$\varepsilon = \left[\sum_{i=1}^{nH} S_i.\varepsilon_i\right] \Big/ S_H \qquad \text{d'où} \qquad f_{eff} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{nH}\left(S_i.\varepsilon_i.\sum_{j=nH+1}^{N} B_{ij}\right)\right]}{\left[\varepsilon.S_B\right]}$$

La valeur moyenne de l'émissivité est 0.78 et le coefficient effectif de rayonnement est f_{eff} = 0.86. Les résultats pour chaque segment sont résumés dans le *Tableau 4.7*. Si l'on compare le cas n°1 avec le cas n°2, on voit clairement que f_{eff} est plus grand dans le cas n°2. Ceci est dû à la réflexion sur les segments couverts d'aluminium. Il est évident que le coefficient d'échange global baisse. La modification des émissivités des deux segments a des effets sur les autres segments, car tous les coefficients d'échange radiatif $h_{r,i}$ changent.

Les résultats concernant les facteurs d'influence globale sont résumés sur la *Figure 4.10*. Comme dans le cas n°1, les PNE sont positives. Ici, on distingue quatre surfaces actives ; le dessus de la table (10), la paroi Est (15), la paroi Ouest (16) et le plafond (17).

Segment	Aire (m^2)	ε	Φ (W)	φ (W m^{-2})	f_{eff}	h_r (W/m^2°C)
Tête	0.169	0.95	10.35	61.20	*0.812*	4.71
Tronc	0.379	0.95	24.3	64.11	*0.851*	4.93
Bras	0.334	0.1	1.91	5.71	*0.72*	0.44
Mains	0.078	0.95	5.52	70.48	*0.935*	5.45
Jambes	0.702	0.1	5.12	7.30	*0.92*	0.56
Pieds	0.088	0.95	6.17	70.07	*0.93*	5.39
Global	1.75	0.78	53.4	30.49	0.86	2.35

Tableau 4.7 : Puissances Nettes Echangées, coefficients et émissivités de chaque segment pour le cas n° 2



J	Nom de surface	$\Phi_{H-j}^{net}(W)$
7	HP	1.11
8	VP	1.14
9	CP	1.99
10	TTop	8.78
11	TBack	1.00
12	Chaise	3.83
13	Mur Nord	3.71
14	Mur Sud	3.63
15	Mur Est	12.41
16	Mur Ouest	5.77
17	Plafond	5.61
18	Plancher	4.39
Total		53.4

Fi

Figure 4.10 : Echanges radiatifs et facteurs d'influence entre le corps humain H et les parois pour le cas n° 2

Pour l'analyse détaillée, on peut examiner le *Tableau 4.8* donnant les facteurs d'influence locaux. Ainsi, les différences par rapport au cas n°1 sont les suivantes :

- il y a une baisse de 10 % pour le chauffe-pieds,
- la paroi Est a toujours une influence radiative plus élevée ($P_{15}^H = 23\ \%$), les surfaces 16 et 17 devient plus influentes (environ de 11 %)
- les facteurs d'influence pour le dessous de table (10), le dessus de table (11), la chaise (12) et les parois Nord, Sud, Est et Ouest (13 – 16) montrent les mêmes caractéristiques que précédemment
- il est intéressant de voir qu'avec le changement des émissivités sur certains segments corporels, il n'y a plus de facteurs d'influences nuls; par exemple, P_{17}^5, P_{18}^4, etc.

J	Surface	1(Tête)	2(Tronc)	3(Bras)	4(Mains)	5(Jambes)	6(Pieds)
7	HP	0.02	1.35	0.29	0.05	11.73	2.81
8	VP	0.03	0.77	0.34	0.09	9.08	7.71
9	CP	0.01	0.06	0.04	0.02	1.23	**31.03**
10	TTop	7.47	13.66	12.86	**53.68**	**15.13**	11.32
11	TBack	0.08	1.36	0.37	0.22	5.66	5.69
12	Chaise	0.28	8.74	8.02	0.49	**18.86**	8.58
13	Mur Nord	9.88	7.25	8.14	4.28	4.63	4.78
14	Mur Sud	9.91	7.11	8.26	4.48	4.58	3.80
15	Mur Est	**35.54**	**28.70**	**28.91**	7.79	8.52	5.46
16	Mur Ouest	**14.95**	12.77	9.46	10.63	1.50	4.47
17	Plafond	**18.64**	10.24	11.20	**16.78**	0.56	0.40
18	Plancher	3.18	7.97	12.11	1.51	**18.52**	13.95

Tableau 4.8 : Facteur d'influence locale dans le cas n° 2

► CAS 3 : Surfaces non isothermes

Ici les températures du corps sont différentes (*Tableau 4.9*). Les parois de la pièce sont soit à 10°C soit à 30°C et tout le mobilier est à 20°C. La température moyenne de rayonnement calculée est de 20°C ; Les émissivités sont identiques à celles du cas n° 2.

$$T_{mrt} = \sum_{i=n_H+1}^{N} S_i T_i \Big/ \sum_{i=n_H+1}^{N} S_i$$

Le *Tableau 4.9* montre la répartition des flux nets de chaque segment et leur décomposition, ce qui vient du corps ($\Phi_{i,H}$) et de l'environnement ($\Phi_{i,E}$). Les facteurs d'influence globaux calculés sont présentés sur la *Figure 4.11*.

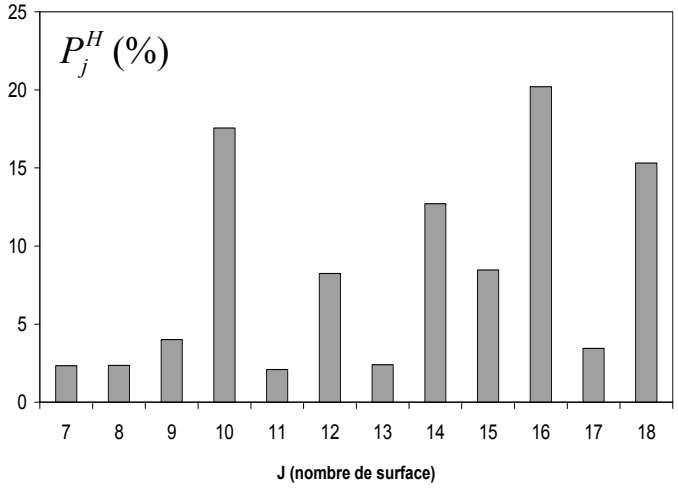
Segment	Temp. de surface (°C)	Emissivité	φ (W m^{-2})	Φ (W)	$\Phi_{i,B}$ (W)	$\Phi_{i,E}$ (W)
Tête	34.20	0.95	49.02	8.29	-0.046	8.340
Tronc	34.60	0.95	62.91	23.84	0.205	23.637
Bras	33.60	0.10	4.93	1.65	-0.046	1.693
Mains	31.00	0.95	50.33	3.95	-0.102	4.048
Jambes	33.50	0.10	8.06	5.65	-0.007	5.662
Pieds	33.20	0.95	76.12	6.70	-0.009	6.708
Global			28.61	50.09	0	50.09

Tableau 4.9 : Températures, émissivités et flux pour le cas n° 3

Au niveau local, les facteurs d'influence pour une situation non-isotherme sont donnés par le *Tableau 4.10*. C'est plus compliqué ici, car les facteurs d'influence varient avec leurs deux composantes : optico-géométrique et thermique.

J	Surface	1(Tête)	2(Tronc)	3(Bras)	4(Mains)	5(Jambes)	6(Pieds)
7	HP	0.03	1.56	0.33	0.05	11.01	2.63
8	VP	0.04	0.89	0.38	0.10	8.53	7.20
9	CP	0.01	0.07	0.05	0.02	1.15	**28.95**
10	TTop	10.11	**15.76**	**14.64**	**59.85**	14.21	10.56
11	TBack	0.10	1.57	0.42	0.24	5.31	5.31
12	Chaise	0.38	10.08	9.13	0.54	**17.71**	8.01
13	Mur Nord	4.15	2.77	2.58	0.46	1.18	1.14
14	Mur Sud	**21.75**	13.16	**15.53**	9.06	7.13	5.93
15	Mur Est	**14.93**	10.96	9.15	0.83	2.18	1.30
16	Mur Ouest	**32.80**	**23.65**	**17.79**	**21.53**	2.33	6.98
17	Plafond	7.83	3.91	3.55	1.79	0.14	0.10
18	Plancher	6.98	**14.75**	**22.78**	3.06	**28.82**	**21.78**

Tableau 4.10 : Facteur d'influence locale pour les surfaces grises et non-isothermes



J	Surface	T (°C)	Φ^{net}_{H-j} (W)
7	HP	20	1.18
8	VP	20	1.20
9	CP	20	2.03
10	TTop	20	8.87
11	TBack	20	1.06
12	Chaise	20	4.16
13	Mur Nord	30	1.22
14	Mur Sud	10	6.42
15	Mur Est	30	4.28
16	Mur Ouest	10	10.20
17	Plafond	30	1.74
18	Plancher	10	7.73
Total			50.09

Figure 4.11 : Echanges radiatifs et facteurs d'influence entre le corps humain H et les parois pour le cas n° 3

Les conclusions que l'on peut retirer de ces résultats sont :

- Le chauffe-pieds (P_9^6) intervient à 29 % sur le bilan radiatif des pieds. Il y a une baisse de 10 % de l'influence par rapport au cas n° 1, mais on est proche de la valeur du cas n° 2.
- La surface 10 influence tous les segments, surtout les mains P_{10}^4 = 60 %.
- Les facteurs d'influence pour les parties supérieures sont plus élevés que pour les parties inférieures. L'influence au niveau de la tête (P_{14}^1) est deux fois plus grande que pour les cas isothermes. Ceci est aussi vrai pour le tronc et les bras.
- La paroi Sud joue un rôle important, car elle est de grande dimension et froide. Au contraire, pour la paroi Est, P_{15}^1 = 15 % ; cette valeur est deux fois plus faible qu'ailleurs. En plus, les facteurs d'influence locaux sur le tronc et les bras sont trois fois moins importants que dans les cas isothermes. Il est évident qu'une augmentation de la température de paroi de 10°C cause une baisse dans les bilans radiatifs des parties supérieures du corps. On obtient un scénario opposé pour la paroi Ouest, car elle est à 10°C.
- Si le plafond est chaud (comme dans le cas non-isotherme à 30°C), les facteurs d'influence sont en baisse par rapport aux cas où la température est de 20°C.
- Les facteurs d'influence locale pour le plancher sont beaucoup plus forts qu'avant, surtout au niveau supérieur du corps.

Conclusions

Ces trois cas relativement simples nous amènent à un certaines conclusions qui seront utiles par la suite, même si les variations d'émissivités et de températures sont un peu extrêmes. En comparant les cas n° 1 et n° 2, où les émissivités ont changé, les points importants sont :

- Les densités de flux baissent évidemment lorsque les émissivités baissent, mais ces variations ne sont pas directement proportionnelles aux émissivités de la surface considérée, comme il est souvent noté dans la littérature. Les réflexions multiples entraînent des variations de flux pour toutes les surfaces.

- Ces deux cas mettent en avant l'importance de la contribution optico-géométrique dans les poids relatifs. Par exemple, le dessus de la table (Table Top) qui pouvait être considéré comme très actif dans le cas n°1 ne l'est plus dans le cas n°2, essentiellement à cause de la faible émissivité des bras.

En comparant les cas n° 2 et n°3, où seules les températures ont changé, on constate que :

- le flux global échangé par le corps n'a pas beaucoup varié. Ceci est dû au fait que la température moyenne des parois reste la même et donc, par définition, la température moyenne de

rayonnement. Par contre, au niveau local on obtient des distributions complètement différentes. On constate dans ce cas que la notion de T_{mrt} est inutilisable si on veut comparer des situations complexes.

- la comparaison de ces deux cas met en avant la composante énergétique dans les PNE. Des petites variations de température cutanée n'entraînent pas de grands changements en comparaison de ceux générés par les 10K de variation des températures de parois. Les facteurs d'influences locales sont complètement modifiés.

Remarque : Dans la suite de cette étude, nous nous intéresserons particulièrement au bureau équipé du LHS. Le *Tableau 4.11* donne les résultats des flux nets et des poids pour les 5 surfaces composant le bureau. On peut noter que le flux seul ne permet pas de dire si une surface est active et qu'il est utile d'analyser les poids, ceci se voit nettement dans le cas Ttop où les flux sont différents, mais le poids reste toujours du même ordre de grandeur.

		Cas. 1		**Cas 2**		**Cas 3**	
J	Nom	Φ_{H-j}^{net}	P_j^H (%)	Φ_{H-j}^{net}	P_j^H (%)	Φ_{H-j}^{net}	P_j^H (%)
7	HP	5.51	5.38	1.11	2.09	1.18	2.35
8	VP	4.55	4.45	1.14	2.14	1.20	2.37
9	CP	2.59	2.53	1.99	3.73	2.03	4.02
10	Ttop	16.39	16.02	8.78	16.44	8.87	17.56
11	Tback	3.08	3.01	1.00	1.87	1.06	2.10

Tableau 4.11 : Récapitulatif de l'effet du bureau chauffant dans les 3 cas

Il faut noter que parmi ces 5 surfaces qui composent le bureau, le poids le plus grand correspond à ce qui est nommé Table Top. En fait ce groupe représente toute la partie supérieure du bureau (dessous et dessus). *Nous reviendrons sur ce fait et les problèmes liés à cette décomposition plus loin dans ce chapitre*.

4.3 - Cas du mannequin thermique dans une chambre climatique

4.3.1 - Géométrie et conditions de simulation

La configuration géométrique et la méthode sont celles décrites précédemment. Par contre dans ce cas nous utilisons le fichier où le corps humain est divisé en 16 segments pour pouvoir comparer les résultats de calcul avec les flux mesurés avec MARIA. Les aires et les émissivités de chaque surface données par PT – Teknik (2004) sont détaillés dans le *Tableau 4.12*.

	Corps	**Aire (m^2)**	**Emissivité**
1	Tête	0.169	0.95
2	Tronc	0.130	0.95
3	Dos	0.130	0.95
4	Pelvis	0.344	0.95
5	BraG	0.115	0.95
6	BraD	0.115	0.95
7	AvBraG	0.052	0.95
8	AvBraD	0.052	0.95
9	MaG	0.039	0.95
10	MaD	0.039	0.95
11	CuisG	0.213	0.95
12	CuisD	0.213	0.95
13	JaG	0.140	0.95
14	JaD	0.140	0.95
15	PiG	0.044	0.95
16	PiD	0.044	0.95

	Enceinte+LHS	**Aire (m^2)**	**Emissivité**
17	Mur Nord	8.466	0.96
18	Mur Sud	8.466	0.96
19	Mur Est	13.912	0.96
20	Mur Ouest	13.912	0.96
21	Plafond	13.442	0.96
22	Plancher	13.310	0.96
23	Table top	2.472	0.96
24	Table back	1.167	0.96
25	Panneau Horiz.	0.194	0.96
26	Panneau Vert.	0.321	0.96
27	Chauffe-pieds	0.246	0.96

Tableau 4.12 : Aires et émissivités pour le corps et l'enceinte

Pour la simulation, les températures de toutes les surfaces sont celles provenant des expériences. Nous utilisons deux matrices de facteurs de forme :

- avec table ; l'ensemble est alors composé de N = 27 surfaces (n_H = 16, n_E = 11),
- sans table, N = 22 car n_E = 6.

Pour une matrice de 27*27, on obtient les facteurs de formes suivants :

$F_{H-H} = 0.238$ → correspond à la proportion où le corps humain se 'voit' lui-même,

$F_{H-E} = 0.762$ → correspond à la proportion ou le corps voir son environnement.

La densité de flux sensible ou sec, φS (W m^{-2}), mesurée par le mannequin MARIA est lié à la somme des pertes de chaleur par rayonnement et convection.

$$\varphi S = \varphi R + \varphi C$$

En général, dans un environnement homogène, on suppose que l'hypothèse $T_{mrt} = T_{op} = T_a$ est valable. D'après nos mesures d'ambiance, ceci est vrai pour la condition globale de la chambre climatique. Au niveau local, quand le LHS est en marche, une ambiance très asymétrique est créée localement (cf. *Chapitre 1*) et l'hypothèse précédente n'est plus valable, $T_{mrt} \neq T_{op} \neq T_a$.

En ce qui concerne la température de l'air au cours des essais, une seule valeur a été relevée. Nous avons donc fait l'hypothèse que la température de l'air reste la même sur tous les segments, notre objectif de simulation étant d'analyser en détails les échanges radiatifs locaux.

Les répartitions hétérogènes des flux sensibles sont liées en grande partie à l'hétérogénéité des flux radiatifs. Les conditions expérimentales sont symétriques thermiquement. Au cours du dépouillement des résultats, nous avons constaté des écarts Gauche–Droite entre les flux mesurés sur MARIA ; ceci est particulièrement vrai pour les mains, la position des deux mains n'étant pas rigoureusement identique. Par contre, la configuration numérique est totalement symétrique ; ainsi les flux calculés des deux côtés sont identiques aux erreurs de calcul près.

Pour comparer les résultats, nous avons décidé de travailler avec une moyenne des valeurs mesurées pour chaque segment (bras, avant–bras, mains, cuisses, jambes et pieds), par exemple :

$$\varphi S_{Bras} = \frac{\varphi S_{Bra_Gauche} + \varphi S_{Bra_Droit}}{2}$$

Par conséquent, par la suite, les résultats expérimentaux et calculés seront donnés pour 10 segments.

1-Tête	2-Tronc	3-Dos	4-Pelvis	5-Bras
6-Avant-bras	7-Mains	8-Cuisse	9-Jambes (mollets)	10-Pieds

4.3.2 - Analyse de flux radiatifs

Dans un premier temps, nous analysons les variations qui peuvent être liées au changement de configuration géométrique. Deux simulations ont été faites ; elles correspondent aux cas MNU et MNUT, c'est-à-dire Mannequin NU avec et sans Table. Les conditions climatiques sont quasiment identiques, températures d'air et des parois à 18.5°C. Au cours des expériences, trois mesures de températures ont été faites sur le bureau. Les températures de surface du corps sont également celles enregistrées sur 'MARIA' (cf. *Chapitre 3*).

Les premiers résultats de simulations sont présentés sur la *Figure 4.12*. En ajoutant la table, on observe une très légère baisse de flux radiatif sur les pieds (ΔφR = 1 W m^{-2}). Les autres segments comme les cuisses (ΔφR = 4 W m^{-2}) et les mains (ΔφR = 10 W m^{-2}) montrent une augmentation de flux. Le bureau modifie la géométrie locale, les surfaces froides (Ttop et Tback) entourent le corps. Ainsi, les mains qui sont proches du bureau perdent plus de chaleur qu'avant.

Si on compare les résultats de calcul (φR_{MNU} et φR_{MNUT}) et expérimentaux (φS_{MNU} et φS_{MNUT}), sur la *Figure 4.12* on constate que les variations sont du même ordre de grandeur mais pas toujours dans le même sens et pas pour les mêmes segments. Il faut noter que ces variations sont très faibles et quasiment de l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure.

La différence entre φS_{MNU} et φR_{MNU} représente la part convective des échanges secs. Les flux mesurés et calculés sont décomposés en flux pour le côté Gauche et Droit du mannequin et la deuxième courbe de la *Figure 4.12* montre les tendances. Comme noté ailleurs, c'est plutôt le positionnement du mannequin qui est responsable de ces résultats.

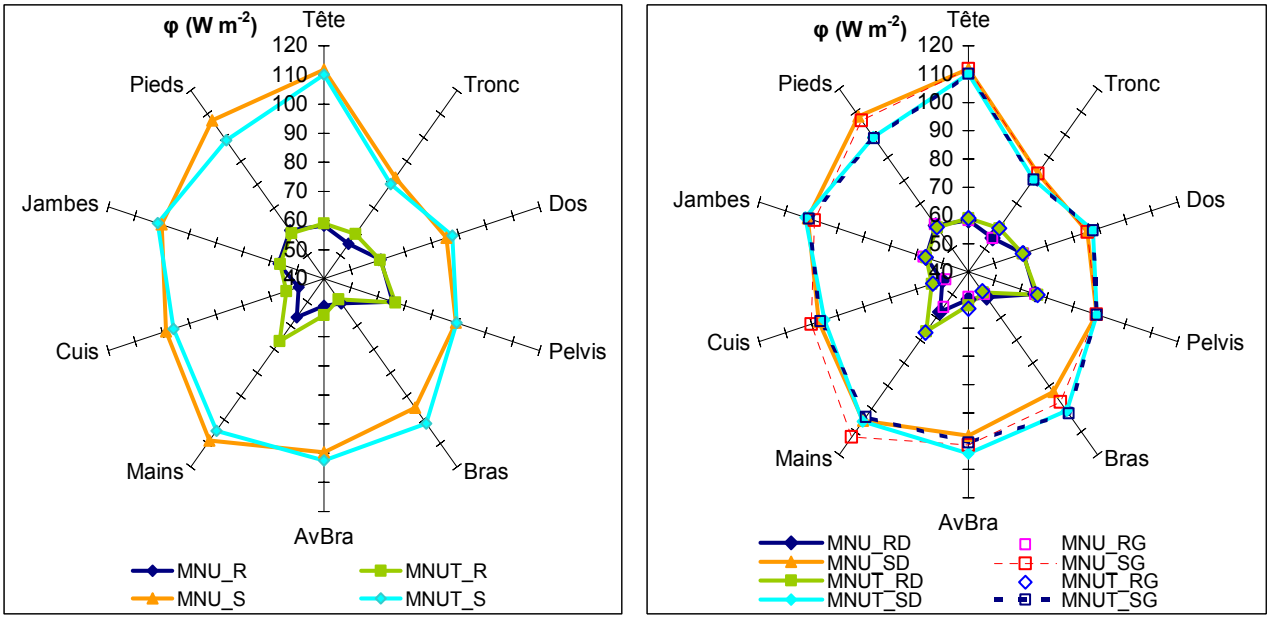


Figure 4.12 : Densités de flux radiatifs et sensibles pour les cas MNU et MNUT.
La figure de gauche donne les valeurs moyennes,
la figure de droite donne les valeurs pour les deux côtés (gauche G et droite D)

Les résultats sont parfois difficiles à interpréter car le flux radiatif dépend de la température de peau qui est hétérogène. *La Figure 4.13* présente les températures du mannequin ($T_{sk,i}$) et les densités de flux radiatifs calculées pour la tête, les avant-bras, les cuisses et les pieds pour quelques essais.

Les variations de températures restent faibles pour la tête (30.3 - 30.5°C). Les avant-bras varient de ±0.6K (30.7 - 31.3°C). Il est évident que les cuisses et les pieds ont des variations plus grandes. La température des cuisses est à 31.1°C (pour le cas HPOFF) et monte à 32.1°C (cas 90H133V). La température des pieds est de 31.0°C à puissance zéro et 34.1°C pour la puissance maximale (90H133V).

Les flux radiatifs changent très peu pour la tête et restent autour de 60 W m^{-2} et les avant-bras vers 50 W m^{-2}. Les cuisses ne reçoivent plus que 8 W m^{-2} (90H133V) contre 52 W m^{-2} dans le cas HPOFF. En revanche, les pieds perdent environ 14 W m^{-2} dans le cas 90H133V, c'est-à-dire environ 46 W m^{-2} de moins que dans le cas HPOFF.

On constate, comme dans les résultats expérimentaux, que la tête n'est pas du tout influencée par le LHS. Par contre, l'effet est légèrement plus important pour les avant-bras. Il faut tout de même souligner que ces segments 'voient' beaucoup le dessus de la table (d'après la description dans le fichier géométrique). La table est décrite de façon trop grossière, car nous avons utilisé une valeur moyenne de température de 'Table top' qui varie peu (nous reviendrons sur cet aspect plus tard). Ceci explique pourquoi les variations de flux pour les avant-bras sont presque les mêmes pour tous les essais. Il est clair que les segments les plus influencés sont les segments inférieurs.

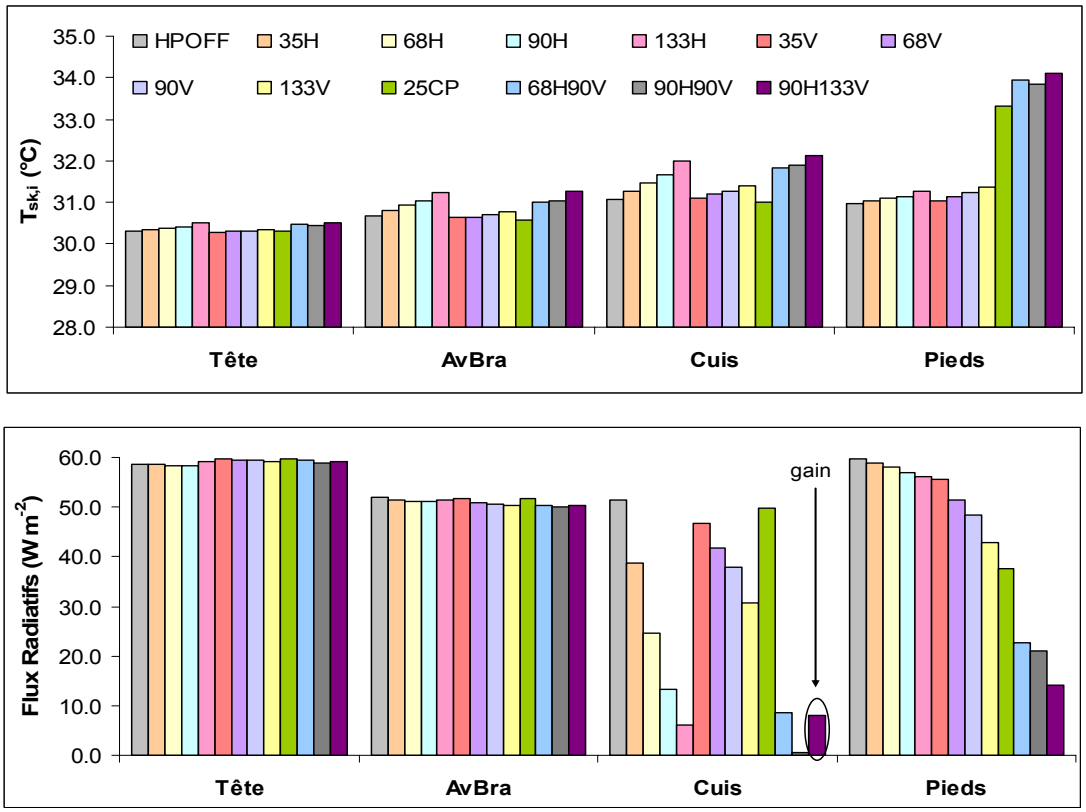


Figure 4.13 : Températures de peau du mannequin ($T_{sk,i}$) et densités de flux radiatifs calculés pour la tête, les avant-bras, les cuisses et les pieds pour les essais sélectionnés
(NB : Le flux radiatif pour les cuisses dans la configuration 90H133V est un gain)

Lors de l'expérience, la température de peau étant liée au flux, il est difficile d'analyser clairement les effets du LHS. Nous avons donc fait des simulations en supposant un mannequin isotherme à 33°C. On élimine également le rétro rayonnement ; ainsi les variations de flux sont uniquement dues au LHS.

La *Figure 4.14* présente les résultats comparés à la configuration précédente pour deux cas : HPOFF (pas de chauffage) et 90H133V (chauffage maximal). On sait par le calcul de facteur d'influence locale que le 'poids radiatif' sur les pieds des panneaux VP et HP est doublé quand ils fonctionnent. Ce test nous permet de voir plus nettement l'effet du LHS sans que les comparaisons des flux soient faussées par la loi de régulation du mannequin qui rend les résultats plus difficiles à interpréter. On constate alors que, par exemple, le tronc est très peu influencé par le système de chauffage local ; par contre, la tête l'est nettement plus, à cause du dessus de table qui chauffe. Evidement les parties basses du corps sont les plus influencées surtout les cuisses, proches du panneau horizontal.

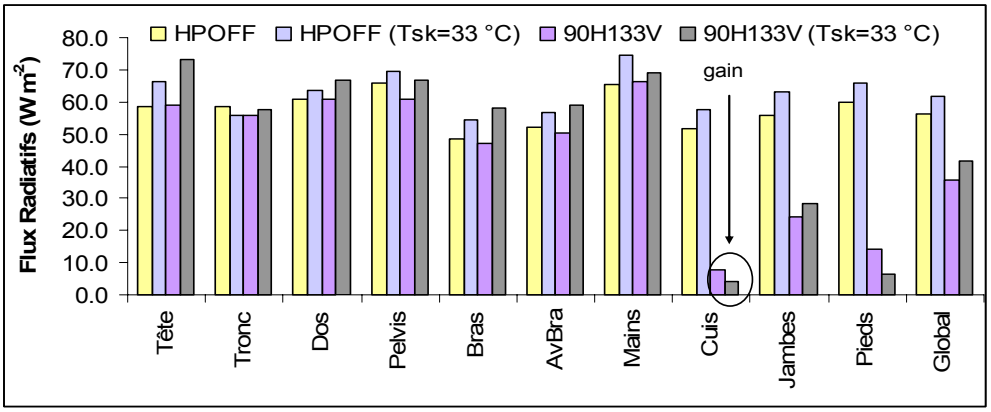


Figure 4.14 : Flux radiatifs pour 2 cas, HPOFF et 90H133V, avec les températures locales mesurées sur le mannequin et fixées à 33°C (NB : Les flux radiatifs pour les cuisses en configuration 90H133V sont des gains)

4.3.3 - Comparaison des résultats : Expériences - Simulations

Si on fait l'hypothèse que, dans toutes les configurations expérimentales, la température d'air est quasiment la même et la température de la peau change peu, on peut alors supposer que les échanges convectifs restent les mêmes. On peut par conséquent en déduire que les variations de flux sensibles sont directement liées aux variations de flux radiatifs. Afin de vérifier cette hypothèse, la *Figure 4.15* présente les différences de flux sensibles et radiatifs, calculées de la façon suivante (par exemple pour la configuration 35H) :

$$\Delta S_i = \left|S_{i,HPOFF}\right| - \left|S_{i,35H}\right| \qquad \Delta R_i = \left|R_{i,HPOFF}\right| - \left|R_{i,35H}\right|$$

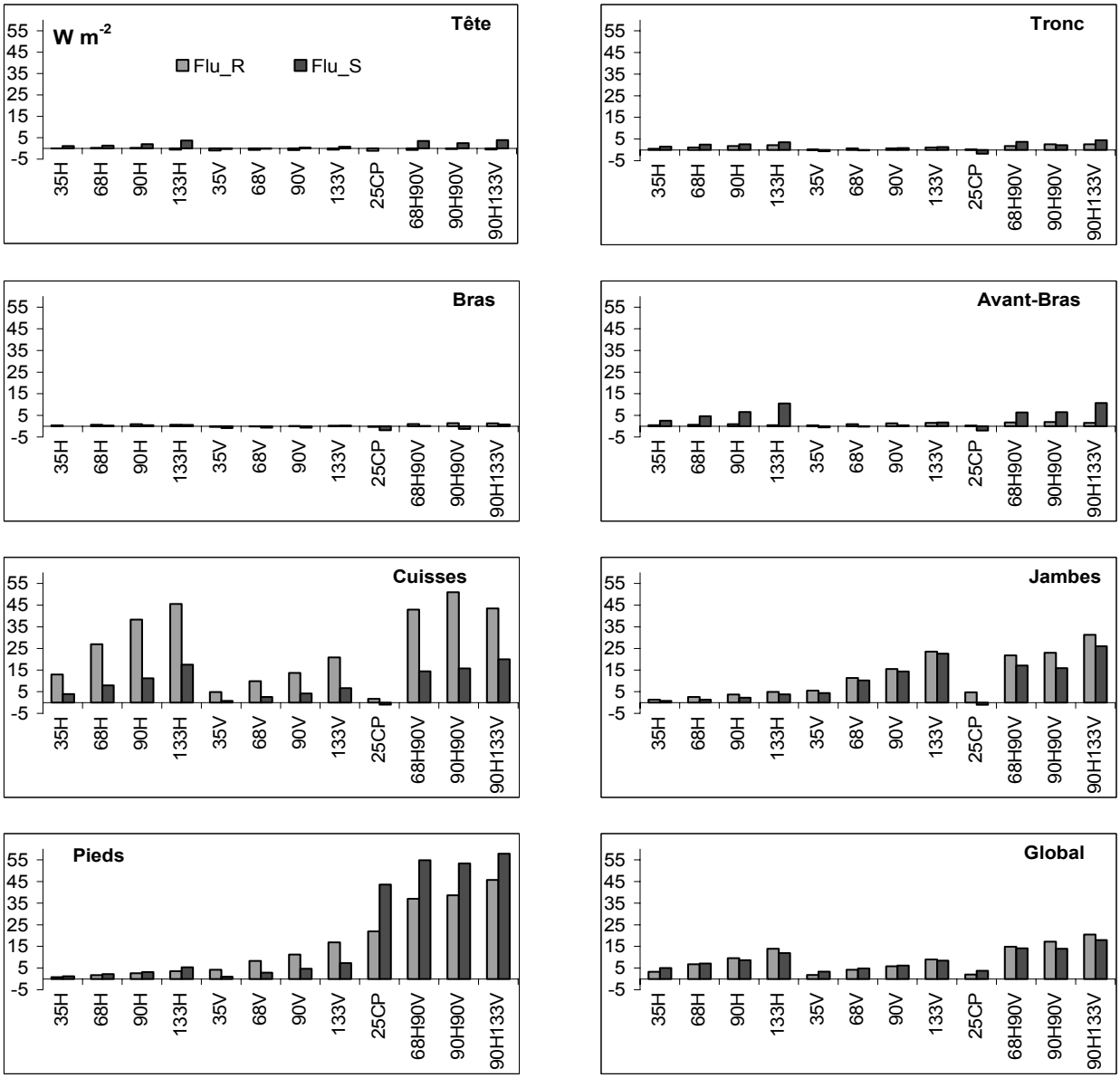


Figure 4.15 : Différences de flux radiatifs calculés comparés aux différences de flux sensibles mesurés pour plusieurs essais

Les configurations étudiées correspondent aux essais où la température opérative est à 18°C. Quelques conclusions peuvent être tirées sur ces graphes :

- Les flux sensibles et radiatifs pour la tête, le tronc et les bras changent très peu. En revanche, les avant-bras montrent un grand écart entre les valeurs de différences de flux sensibles et radiatifs. Pour certains cas (où le HP fonctionne), l'ordre de grandeur est cinq fois plus important pour ΔS_i par rapport au ΔR_i ; dans cette configuration, le dessus de la table chauffe de façon

importante. Nous avons déjà signalé ce problème ; il semble que la description géométrique ne soit pas satisfaisante.

- Les différences pour les segments inférieurs ne sont pas nécessairement du même ordre de grandeur pour chaque expérience, mais la tendance générale est comparable. Il apparaît que lorsque les pieds du mannequin sont chauffés (lorsque seul le CP fonctionne), la plupart des grands segments, comme les cuisses ou les jambes, perdent plus de flux sensible comparé au cas HPOFF. Ceci peut être expliqué par les valeurs de température de la peau. La valeur de T_{sk_pi} augmente d'environ 2.3°C par rapport au cas HPOFF quand le CP fonctionne ; en même temps les $T_{sk,i}$ pour les autres segments diminuent d'environ 0.2°C. Par contre, on ne trouve pas la même chose par le calcul des échanges radiatifs. Il y a par ailleurs très probablement des phénomènes de convection qui font que la température et la vitesse d'air au niveau de certains segments sont modifiées et donc les échanges convectifs ne sont pas égaux dans toutes les situations.

Si on compare deux essais notés 1 et 2, on peut écrire les équations suivantes :

$$\varphi S_1 = \varphi R_1 + \varphi C_1 \qquad \varphi S_2 = \varphi R_2 + \varphi C_2$$

$$\Delta\varphi S = \varphi S_1 - \varphi S_2 = (\varphi R_1 - \varphi R_2) - (\varphi C_1 - \varphi C_2)$$

Supposons que les flux calculés par le modèle IR sont exacts aux écarts de géométrie près représentés par un coefficient α , on peut alors écrire :

$$\varphi R_{réel} = \alpha * \varphi R_{calculés}, \quad \text{d'où, } \Delta\varphi S = \alpha * (\Delta R_{calculés}) - (\varphi C_1 - \varphi C_2)$$

Le problème majeur pour comparer les résultats de simulation et d'expérience est lié à la variation de température de peau. Pour les segments dont la température varie peu d'une expérience à l'autre et dans le cas où la température de l'air est quasi-constante, on peut supposer que la convection varie peu ; on a alors :

$$\Delta\varphi S_i = \alpha * (\Delta\varphi R_{calculés})$$

Par contre, il est plus difficile de trouver des conclusions pour les autres segments. Si on suppose que les coefficients d'échange h_c sont constants et que :

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

on peut alors écrire : $$\frac{S_1}{(T_{sk1} - T_{a1})} - \frac{S_2}{(T_{sk2} - T_{a2})} = \alpha * \left[\frac{R_{cal1}}{(T_{sk1} - T_{a1})} - \frac{R_{cal2}}{(T_{sk2} - T_{a2})} \right]$$

Pour chaque segment, on tente de déterminer le coefficient α. En général, si les calculs de rayonnement sont corrects, alors α devrait être proche de 1.0.

Après plusieurs tentatives de calcul, on n'a pas obtenu les valeurs de α que l'on avait espérées. Par exemple, pour les cas 68H90V et 90H133V, on trouve les valeurs suivantes :

Cuisses = 0.26, Jambes = 1.31, Pieds = 0.55 et Global = 0.82

Même si la valeur α (global) approche 1.0, on n'a pas trouvé cette valeur dans les autres configurations. Toutes les valeurs pour les cas analysées n'ont pas été présentées ici, car elles sont largement fausses. On doit se pencher alors sur la question de la géométrie et du fichier de facteurs de forme. La géométrie a-t-elle été bien prise en compte ? Ceci a été vérifié dans le passé et même amélioré deux fois.

Il faut souligner que le problème majeur dans le calcul des échanges radiatifs est la représentation géométrique. Nous ne disposons pas de logiciel de CAO qui nous permette de décrire des géométries complexes avec suffisamment de précision (comme cela a été fait dans d'autres études où les outils étaient disponibles) [Athabégoity, 1996]. La représentation du corps 'TUGA'

est assez grossière d'une part et, d'autre part, le bureau n'a pas été décomposé en suffisamment d'éléments. La surface notée 'Table top' n'est en fait pas isotherme alors qu'elle est très active ; ceci est probablement à l'origine d'une grande partie des erreurs.

Plusieurs améliorations importantes ont été déjà faites sur la géométrie, par exemple, l'asymétrie du corps a été éliminée. Il est possible qu'il y ait une forte influence d'une surface active sur l'ensemble du corps. Pour mieux comprendre ces effets, nous avons fait une étude de sensibilité des variables qui sont utilisées par le modèle IR.

4.3.4 - Etude de sensibilités

Le *Tableau 4.14* présente les facteurs de forme entre l'homme et l'enceinte. On peut repérer les parois qui jouent un rôle géométrique important sur l'ensemble du corps. Les surfaces le plus vues par l'ensemble du corps sont dans l'ordre : le mur Est (23 %), le plancher (20 %), le HP (12 %), le VP (9 %) et de dessus de table (8 %). Il faut noter que la Ttop est presque aussi importante que le panneau vertical.

	n° de surface	Nom du Surface	F_{H-j}	F_{H-j}/F_{H-E} (%)
PIECE	17	Mur Nord	0.0440	5.326
	18	Mur Sud	0.0440	5.36
	19	**Mur Est**	0.1976	**22.54**
	20	Mur Ouest	0.0574	6.91
	21	Plafond	0.0548	6.62
	22	**Plancher**	0.1660	**19.67**
TABLE	23	**Ttop**	0.1001	**7.80**
	24	Tback	0.0164	1.65
	25	**HP**	0.0357	**11.69**
	26	**VP**	0.0327	**9.38**
	27	CP	0.0197	1.95

Tableau 4.14 : Surfaces de la pièce 'vues' par l'ensemble du corps

Parmi les surfaces actives, on s'intéresse particulièrement aux surfaces qui composent la table et le LHS (23 - 27). Donc, les influences locales en termes de poids radiatifs pour ces surfaces sont présentées pour le cas 90H133V (*Tableau 4.15*).

Pij	1Tête	2Tronc	3Dos	4Pelvis	5BraG	6BraD	7AvBG	8AvBD	9MaG	10MaD	11CuisG	12CuisD	13JaG	14JaD	15PiG	16PiD
23 Table top	4.49	17.01	0.16	4.29	4.71	4.69	**16.97**	**16.52**	**39.15**	**37.87**	**8.85**	**8.78**	4.87	4.74	7.02	7.00
24Table back	0.05	0.11	0.03	1.37	0.25	0.25	0.29	0.29	0.19	0.19	2.26	2.24	3.79	3.71	3.35	3.34
25 HP	0.02	0.06	0.01	3.64	0.10	0.10	0.14	0.15	0.07	0.09	**39.76**	**39.97**	1.94	1.99	1.69	1.69
26 VP	0.05	0.09	0.04	2.17	0.46	0.46	0.46	0.49	0.14	0.19	**13.87**	**13.95**	**27.86**	**28.64**	**15.35**	**15.30**
27 CP	0.01	0.04	0.01	0.68	0.14	0.14	0.22	0.24	0.02	0.02	0.81	0.82	2.81	2.95	**23.51**	**23.45**

Tableau 4.15 : Facteurs d'influence locale (ou poids radiatifs locales) dans le cas 90H133V

(a) Les panneaux chauffants

Le chauffe-pieds (P_{27}^{16}) intervient pour 24 % environ sur les bilans radiatifs des pieds. Le panneau horizontal intervient pour 40 % sur les cuisses. Ces deux surfaces ont très peu d'influence sur les autres segments.

Par contre, le VP n'influence pas seulement les jambes ($P_{26}^{13} \approx 28\%$), mais également les cuisses ($P_{26}^{12} \approx 14\%$) et les pieds ($P_{26}^{15} \approx 15\%$).

(b) La Table top

Cette surface (composée de deux côtés - dessous et dessus) influence tous les segments (sauf le dos). Au niveau supérieur du corps, le Ttop intervient pour 17 % sur le bilan radiatif du tronc. Il intervient pour environ 17 % et 38 % au niveau des avant-bras et des mains. Pour les mains, c'est la surface qui joue le plus sur son bilan radiatif.

On constate une valeur de $P_{23}^{12} \approx 9\%$ pour les cuisses et $P_{23}^{15} \approx 7\%$ pour les pieds. Pour les autres segments du corps, il intervient pour 5 % environ.

Il ne faut pas oublier que les facteurs d'influence prennent en compte également les émissivités et les températures des surfaces. Un changement d'émissivité d'une surface donne un changement de flux. Ici, l'enceinte a une émissivité uniforme de 0.96 ; l'émissivité ne peut pas être une source d'erreur majeure. Par contre, la contribution thermique varie selon la loi 'température à la puissance quatre' (T^4). Une partie des écarts est probablement liée à une erreur sur les températures.

Influence de la température de la table

La table représente une surface relativement grande qui a une influence importante sur les échanges corporels. Sa température n'est pas homogène lorsque le panneau horizontal fonctionne, donc nous avons dû faire des hypothèses. Il faut déterminer dans quelle proportion une erreur sur la température modifie notablement les transferts radiatifs. Nous avons effectué des simulations où une variation de température de 18 à 50°C a été imposée pour la Ttop, les autres températures restant constantes. Quand la table ne chauffe pas, tous les flux sont homogènes. On voit immédiatement (*Figure 4.16*) que l'augmentation progressive de Ttop influence tous les flux locaux. La forte diminution du flux des mains est due à la disposition géométrique ($P_{23}^{9} \approx 38\%$ en chauffage maximum).

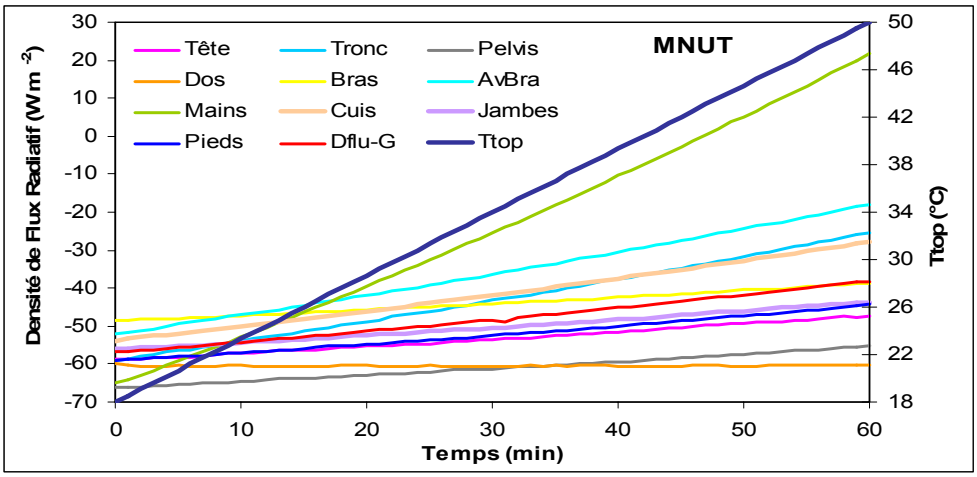


Figure 4.16 : Densités de flux radiatifs lorsque la température de Ttop augmente de 18 à 50°C

Nous revenons un petit peu en arrière pour expliquer la surface Table top. Le premier dessin dans la *Figure 4.17* montre le dessus de la Table top (front side) et le deuxième dessin montre le dessous (back side) avec le positionnement du panneau horizontal.

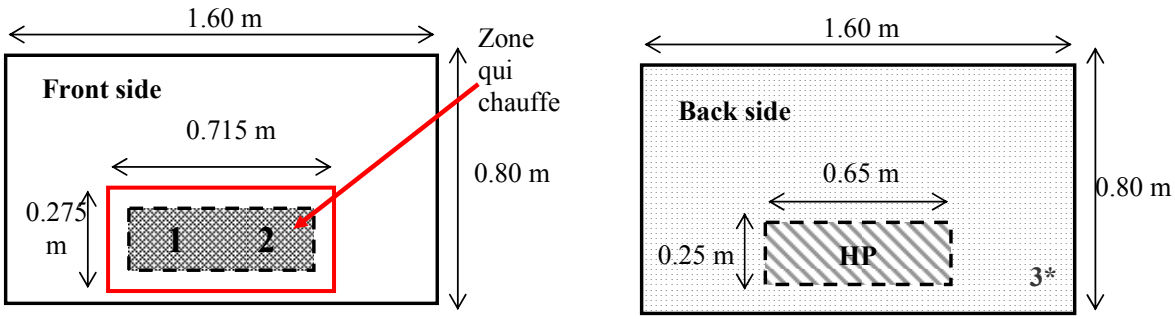


Figure 4.17 : Dessus (front side) et dessous (back side) de la 'Table top'

Notons que le panneau horizontal a été fabriqué dans un matériau léger sans beaucoup d'isolation pour chauffer le dessus de la table par conduction et ainsi améliorer les conditions pour les mains [Quintela et al., 2000]. Les expériences faites avec le mannequin montrent qu'une partie

du dessus de Table top (*zone qui chauffe*) peut augmenter jusqu à 50°C, quand HP est à puissance maximale.

Les mesures de température au point 3 nous indiquent que les autres parties de la table ont une température proche de la température de l'air. Dans la description géométrique, la table est représentée par une seule surface (dessus et dessous). On est par conséquent obligé de fixer une température unique pour toute la surface, ce qui entraîne une double erreur. Les flux sur les jambes sont diminués car on surestime la température du dessous de la table. En revanche, les mains pour lesquelles le dessus de la table joue un rôle important vont avoir un bilan radiatif faussé par une sous-estimation de la température de la zone chauffée. Faut-il prendre une valeur moyenne de température pour la surface Ttop ?

Nous avons décidé de calculer la température moyenne de la manière suivante :

$$Ttop = \left[\frac{(T_{1,2} * 0.197) + (T_3 * 2.20)}{(0.197 + 2.20)} \right]$$

Ici, $T_{1,2}$ représente la valeur moyenne des températures mesurées en 1 et 2. Une augmentation de 10 % a été faite pour la surface de la zone chaude pour prendre en compte l'influence de la conduction ; donc 0.197 m^2 correspond à la zone chauffée. Cette équation nous permet de ne pas avoir une température de Ttop trop élevée. *Tous les résultats montrés dans les parties précédentes ont été obtenus avec une Ttop calculée de cette façon.*

D'après Raimundo et al. (2004), l'erreur absolue sur les facteurs des formes est négligeable car les aires des surfaces élémentaires utilisées sont très petites (ordre de grandeur 0.0025 m^2). Mais, dans le calcul d'échange, il y a des erreurs effectivement liées aux mesures de températures ou d'émissivité.

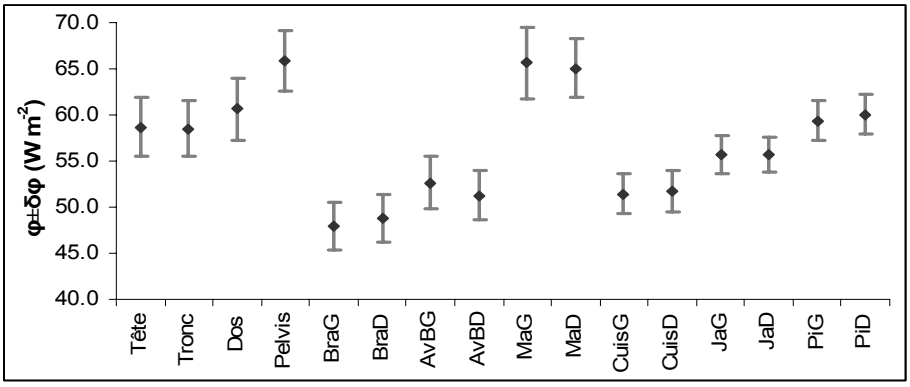


Figure 4.18 : Densité de flux et incertitude relatives sur les 16 segments corporels pour le cas MNUT

La densité de flux $\varphi_{i,j}^{net}$ et leur incertitude absolue sont présentées sur la *Figure 4.18* pour le cas MNUT. L'erreur tient compte des incertitudes sur les variables thermo-physiques qui sont de l'ordre de $\delta T = 0.1°C$ et $\delta\varepsilon = 0.05$. Pour les segments supérieurs, on trouve des erreurs environ de ± 3 W m^{-2} ; au niveau des cuisses, jambes et pieds, l'incertitude est de ± 2 W m^{-2}.

Conclusion

La précision des résultats est très liée à la finesse de la description géométrique. Pour faire une étude plus détaillée sur les échanges radiatifs, il faudrait que le corps et les surfaces actives, en particulier les panneaux, et la table, soient représentés par une géométrie plus fine. La décision été prise de continuer avec les analyses radiatives étant conscient de toutes ces irrégularités. D'ailleurs le modèle de rayonnement IR a été validé précédemment dans plusieurs configurations complexes [Althabégoity, 1996 ; Piniec, 1999].

4.4 - Cas des sujets dans un bureau

Dans cette partie, les résultats expérimentaux avec des sujets sont comparés aux résultats obtenus par modélisation à partir d'un couplage entre le modèle IR qui calcule les échanges infra-rouges et le modèle thermo-physiologique à 7 segments MARCOT (cf. *Annexe 1B*).

4.4.1 - Conditions de simulation

Le schéma général de simulation est donné sur la *Figure 4.19*. Les objectifs sont donc, d'une part, de comparer les données expérimentales (températures cutanées et sensations) aux valeurs calculées, et, d'autre part, d'analyser les flux radiatifs et voir s'ils ont une influence directe sur les sensations ou sur le comportement de régulation des panneaux.

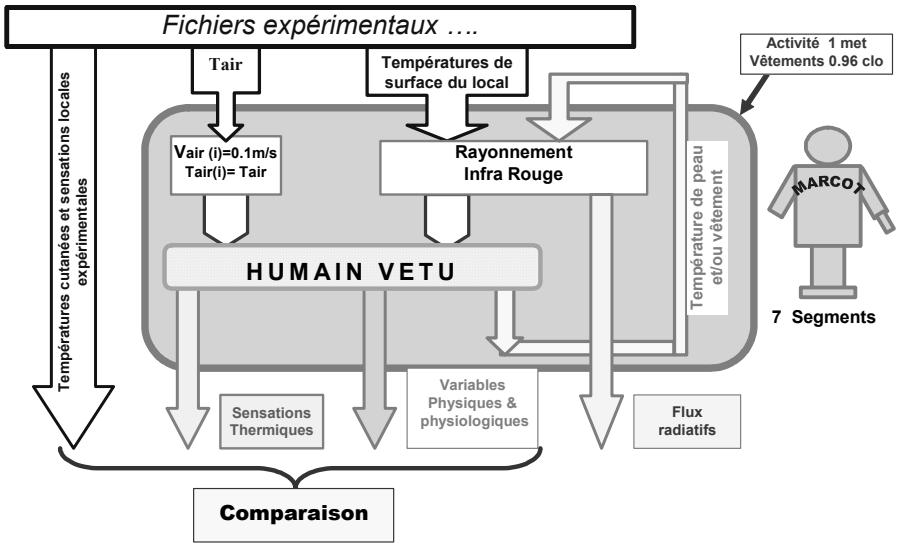


Figure 4.19 : Schéma de connexion entre les différents modules

Les températures des murs, bureau, etc., et les conditions d'ambiances sont celles qui ont été mesurées dans les expériences réelles. Dans le modèle thermo-physiologique, certaines valeurs sont fixées :

- le métabolisme est à 1.0 met ;
- la vitesse d'air est uniforme sur tous les segments (v = 0.1 m/s) ; puisqu'elle n'a pas été mesurée, nous avons pris une valeur 'standard' dans le bâtiment ;
- la tenue vestimentaire est de 0.96 clo [Althabégoity, 1996] ;
- on suppose que les panneaux chauffants affectent peu la température locale de l'air ; donc la température d'air a été supposée égale sur tous les segments.

Le modèle de calcul de flux radiatif contient les mêmes facteurs de forme que précédemment, donc 27 surfaces au total dont 16 pour le corps humain. Etant donné que le modèle de thermo-physiologie ne comporte que 7 segments, des regroupement sont faits pour passer de 7 à 16 et inversement. Par ailleurs, pour comparer aux résultats expérimentaux, une autre correspondance doit être faite. Le *Tableau 4.16* donne ces correspondances :

7 Segments	Tête	Tronc	Bras Gauche	Bras Droit	Mains	Jambes	Pieds
16 surfaces du corps pour le calcul IR	1-Tête	2-Tronc 3-Dos 4-Pelvis	5-BraG 7-AvBG	6-BraD 8-Av_BD	9-MaG 10-MaD	11-CuisG 12-CuisD 13-JaG 14-JaD	15-piG 16-piD
14 points de mesures lors des Expé.	8-Front 14-Cou	6-Dos-BasG 7-AbdómenD 12-Thorax_G 13-EpauleD		10-Av_BrasG 11-BraD	9-MainG	2-JaG-post 3-JaD-avant 4-CuisG-post 5-CuisD-avant	1-piedD

Tableau 4.16 : Correspondances entre les dénominations des segment, surfaces et points de mesure

4.4.2 - Prédiction des températures cutanées

Les 18 cas ont été analysés, mais on reprend l'exemple du cas HO8 pour présenter les résultats des simulations. La *Figure 4.20* donne les températures de peau mesurées et calculées pour six segments et le corps. La configuration géométrique simulée étant totalement symétrique, la température cutanée obtenue pour le BraD est similaire pour le BraG (donc n'est pas présentée).

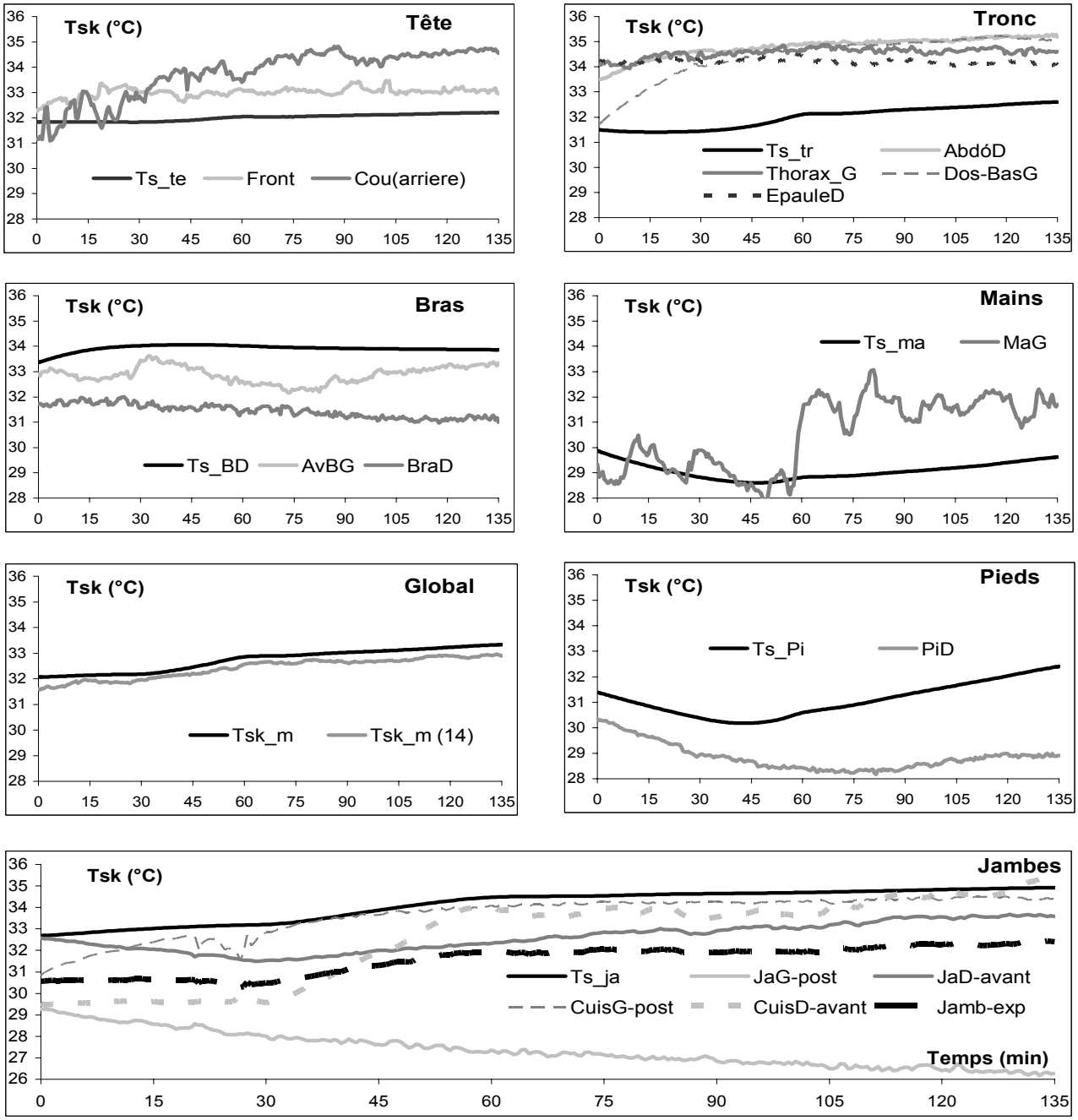


Figure 4.20 : Températures de peau relevées et calculées pour six segments et le corps
(les conditions d'expérience correspondent à l'individu HO8)

Les résultats de simulation sont évidemment plus 'lisses' que les résultats expérimentaux, par exemple pour les mains. L'écart entre les températures simulées et expérimentales (d'environ 2K) pour les segments supérieurs (tête, tronc, bras et mains) est probablement partiellement liée au fait que la température de la '*Table top*' qui a été utilisée dans la simulation est erronée. Dans l'expérience, le tronc et le dos sont en contact avec la chaise ; en revanche, dans la simulation, on ne prend pas en compte l'isolation de la chaise, par conséquent la température est plus basse.

Pour les jambes, pour lesquelles nous avons le plus de points de mesures, on constate que la température calculée (Ts_ja) a le même comportement que la moyenne des valeurs expérimentales (Jamb-exp). Il faut noter que la température mesurée au niveau du mollet postérieur (JaG-post) est particulièrement basse : ceci est certainement dû au fait que c'est une localisation qui, d'une part, 'ne voit pas' les panneaux chauffants et, d'autre part, est très influencée par le plancher qui est froid.

Il faut noter que les températures cutanées calculées par le modèle de thermo-physiologie correspondent à un individu standard n'ayant pas les mêmes caractéristiques physiques et physiologiques (poids, surface, habillement ou comportement thermorégulateur) que le sujet d'expérience. Il est connu dans la littérature que, si on soumet plusieurs fois le même individu au même environnement, on trouve des températures de peau et des sensations différentes (appelées différences intra-individuelles). Les écarts inter-individuels entre personnes différentes peuvent être du même ordre de grandeur : la dispersion en température varie selon les segments et peut aller jusqu'à 5K pour les mains.

Malgré les écarts constatés, on peut donc considérer que le modèle MARCOT reproduit correctement l'évolution des températures de peau. Les températures vestimentaires varient de 24 à 28°C. Nous n'avons pas les mesures de températures vestimentaires réelles pour les comparer avec les valeurs de simulation.

4.4.3 - Prédiction des sensations

Les sensations thermiques sont déterminées à partir des températures cutanées dans le tableau de Galéou (1991). Les sensations obtenues par la simulation et l'évaluation subjective pour l'individu HO8 (cf. *Figure 4.21*) sont cohérentes dans l'ensemble. Les sensations simulées sont de ± 1 point par rapport aux sensations réelles, sauf pour les jambes et le tronc.

Un écart de ± 1 point est compatible avec les différences inter-individuelles ; s'il existe une différence en température entre expérience et simulation, il existe aussi une différence dans les sensations. Malgré un écart important entre les températures simulées et expérimentales sur les mains et les pieds, la différence en sensation n'est que d'un point, ce qui est tout à fait acceptable.

Les mêmes différences de sensation ont été trouvées pour les autres expériences analysées. Ces écarts sont plus particulièrement notables sur le tronc et les jambes. Pour le tronc, on pense que les sensations basses viennent du fait que l'isolation de la chaise n'existe pas dans le modèle MARCOT. Au niveau des jambes, il y a donc probablement des modifications liées au système de chauffage local sur le bas du corps.

Améliorations apportés aux échelles de sensations

La relation température/sensation a surtout été étudiée pour l'homme dans l'habitat [Galéou, 1991] pour des conditions relativement homogènes. On a pu constater que, dans les véhicules où l'ambiance est très hétérogène, il fallait apporter des modifications. Nous avons donc décidé de créer une nouvelle relation spécifique au LHS.

Au niveau des sensations, on constate qu'il faut corriger les sensations prédites pour le tronc et jambes. Par observations, une amélioration simple comme suit peut être effectuée. Par exemple,

$$S_{ja} = S_{ja_MG} - 1 \qquad \text{et} \qquad S_{tr} = S_{tr_MG} + 1$$

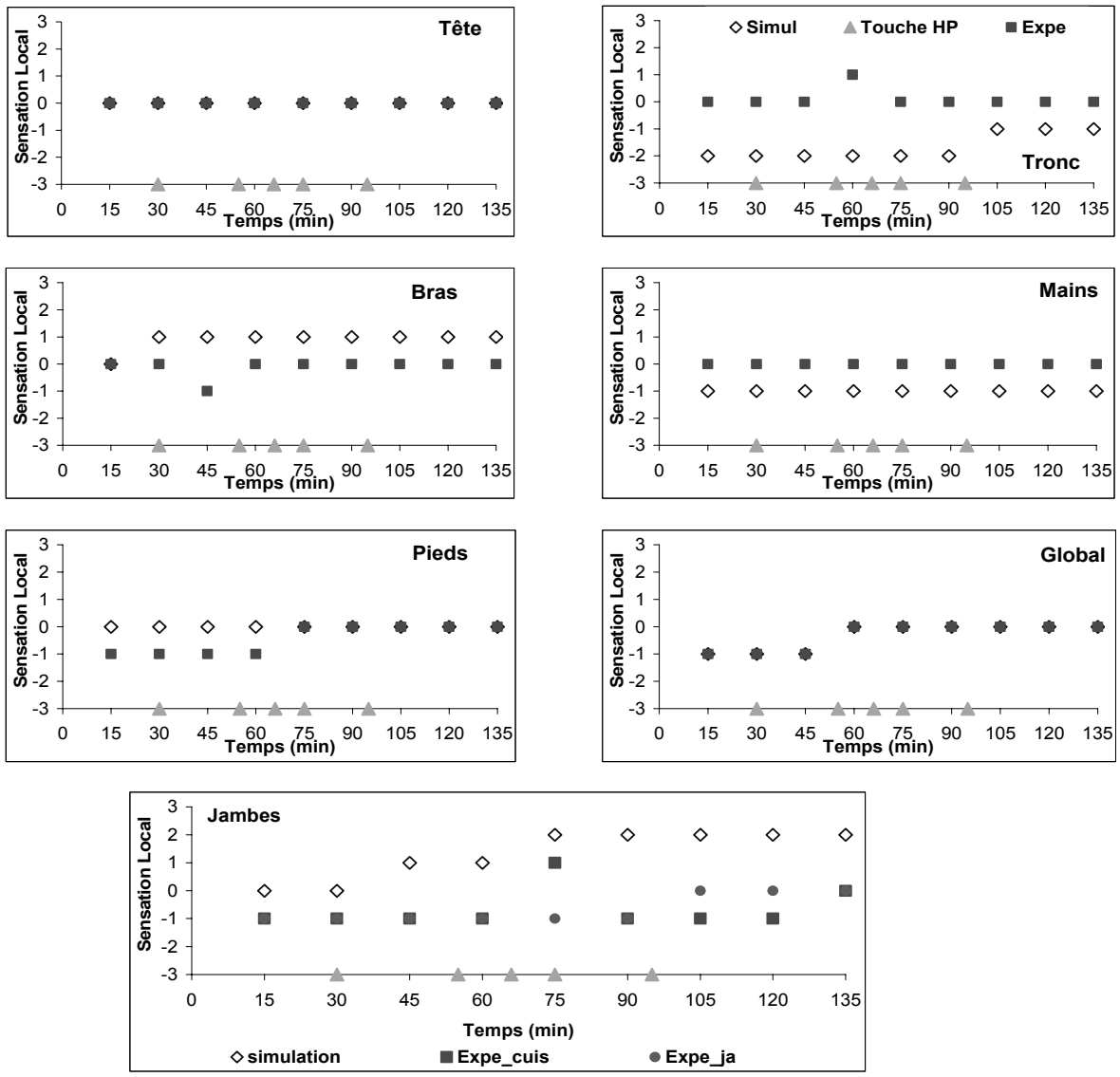


Figure 4.21 : Sensations réelles et simulées pour le cas d'individu HO8
(NB : Les triangles indiquent le moment où le HP a été touché)

4.4.4 - Evolution des flux

Un des avantages du modèle thermo-physiologique est de calculer les flux de chaleur échangés sur le corps. Ce sont des valeurs impossibles à obtenir lors d'une expérience. La *Figure 4.22* montre les pertes de chaleur par les différents modes dans le cas HO8. Les pertes latentes restent constantes autour de 10 W ; le sujet ne transpire pas, il ne s'agit que de l'évaporation diffuse. Les pertes par convection varient très peu et restent plus ou moins dans la gamme de 40 à 45 W. Le flux sec varie de 120 W (t = 0) à 87 W (t = 135). L'échange par rayonnement est d'environ de 77 W (t = 0) et il est réduit à 37 W (t = 135).

Les évolutions des densités de flux radiatifs locaux sont présentées sur la *Figure 4.23*. Les segments comme les mains, les jambes et les pieds arrivent à atteindre un flux faible par rapport au début de l'expérience.

On s'intéresse également au changement de ces flux radiatifs, surtout pour les segments les plus soumis au LHS. Diverses expériences faites par Mettavant (2001) montrent qu'à partir d'une différence de 20 W m^{-2} ($\Delta\varphi R$) un individu peut percevoir un changement de flux radiatif. On peut calculer cette différence de la manière suivante :

$$\Delta\varphi R_{(t)} = \varphi R_{(t)} - \varphi R_{(t=30)}$$

où le temps (t) est toujours supérieur à t = 30 min (nous avons choisi t = 30 min, car c'est le début de la mise en marche des panneaux).

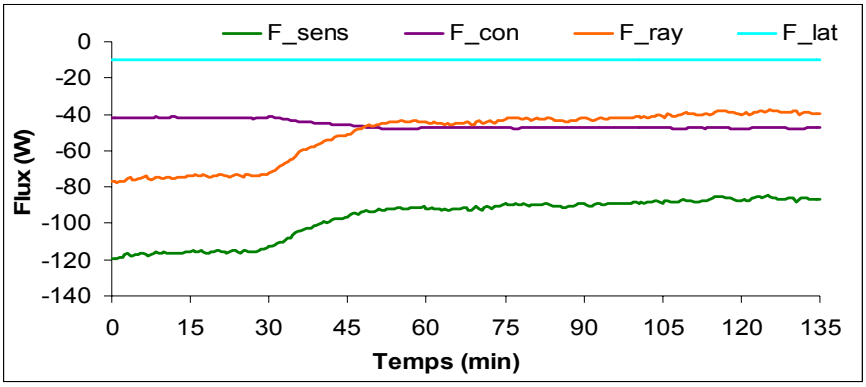


Figure 4.22 : Evolutions des pertes de chaleur par les différentes modes pour l'individu HO8

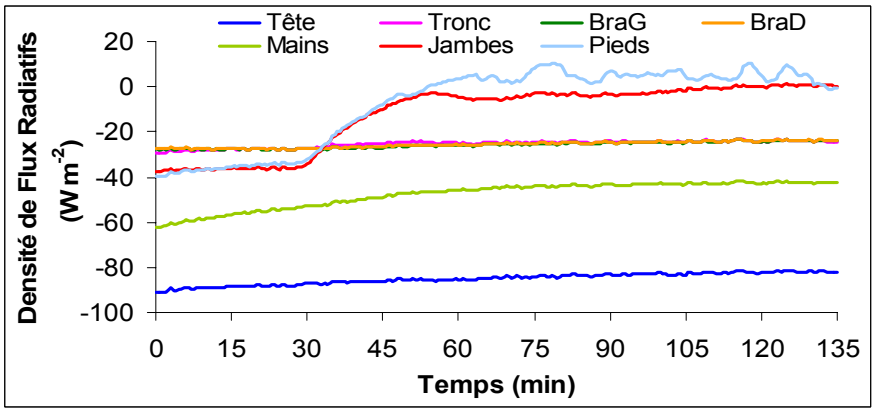


Figure 4.23 : Evolution des flux radiatifs locaux pour l'individu HO8

Les différences de flux locaux/globaux ont été calculées par rapport à t = 30 min pour tous les participants 'hommes' (cf. *Annexe 4A*). Par exemple, pour l'homme HO8, quand plusieurs panneaux sont en marche avec une puissance élevée, les variations de flux sur des segments comme les jambes et les pieds dépassent ce seuil de 20 W m^{-2} (*Figure 4.24*). Pour les autres segments, les variations sont très faibles et ce seuil de 20 W m^{-2} n'est pas atteint. Comme il a déjà été signalé, seuls les segments inférieurs sont nettement influencés par le LHS.

Lorsque les panneaux sont à une température égale à la température de l'air, pour le même cas, on obtient des valeurs inférieures. Il est évident que le seuil dépend de la température d'enceinte : plus les températures des panneaux sont élevées, plus la possibilité de dépasser 20 W m^{-2} est importante.

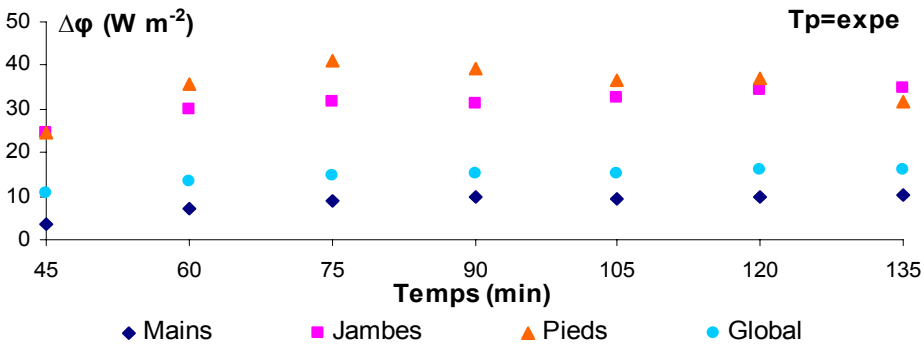


Figure 4.24 : Ecart de densité de flux radiatifs (Δφ) par rapport au début de l'essai pour l'homme HO8

4.4.5 - Relations flux - sensations et flux - comportements

Cette partie continue les analyses et discussions commencées à la fin du *Chapitre 3* sur les variables intervenant sur la sensation et/ou le comportement. La question que l'on se pose maintenant est : est-ce que le flux radiatif local peut être un facteur qui engendre le changement de sensation et ensuite modifie le comportement ? Avec les mêmes hypothèses qu'au *Chapitre 3*, les observations sont données dans le Tableau présenté en *Annexe 4B*. Les principales informations délivrées sont les suivantes.

La plupart des hommes montrent une forte corrélation entre le changement d'un point de sensation et les flux échangés sur les segments exposés au LHS. Par exemple, la *Figure 4.25* montre la vitesse de variation de flux radiatif ($d\varphi/dt$) pour les trois segments de l'homme HO3.

Si on compare les écarts de température de peau et le flux radiatif présentés dans le Tableau de l'*Annexe 4B*, on voit que le flux joue un rôle plus important que la température de peau pour un $\Delta S = 1$; par exemple la *Figure 4.26* montre les évolutions de dT_{sk}/dt et de $d\varphi/dt$ pour la cuisse pour l'expérience HO3.

On constate que la sensation de la cuisse a augmenté d'un point entre t = 30 et t = 45 min, au cours de cette période la température de peau a évoluée lentement de 29.3 à 30.0°C de façon continue *(dT_{sk}/dt est faible)*, par contre la variation de flux radiatif est très importante. Toutes les variations de densités de flux échangés pour chaque segment et pour chaque sujet sont données dans l'*Annexe 4A*. On constate qu'au cours du temps les segments supérieurs ont une faible variation, sauf les mains qui sont influencées par la table qui chauffe. Les jambes et les pieds ont évidement des variations de densité de flux plus importantes qui peuvent aller jusqu'à 45 W m^{-2}. Il faut noter que c'est le flux échangé au niveau de la surface des vêtements. La limite de perception est de 20 W m^{-2} au niveau de la peau comme décrit avant.

Les comportements des hommes sont donc liés aux vitesses de variations de flux radiatifs locaux, surtout pour les cuisses qui déclenchent une baisse de puissance de panneau horizontal. Donc, pour le cas du LHS, le comportement est une fonction de tous les paramètres suivants :

$$\text{Comportement} \rightarrow f\begin{pmatrix} \text{Sensation} \\ \Delta\varphi \\ \text{Variables inconnues} \end{pmatrix}$$

Bien que les paramètres mesurés et calculés soient utilisés pour expliquer le comportement, on ne connaît pas l'aspect psychologique dans ces expériences.

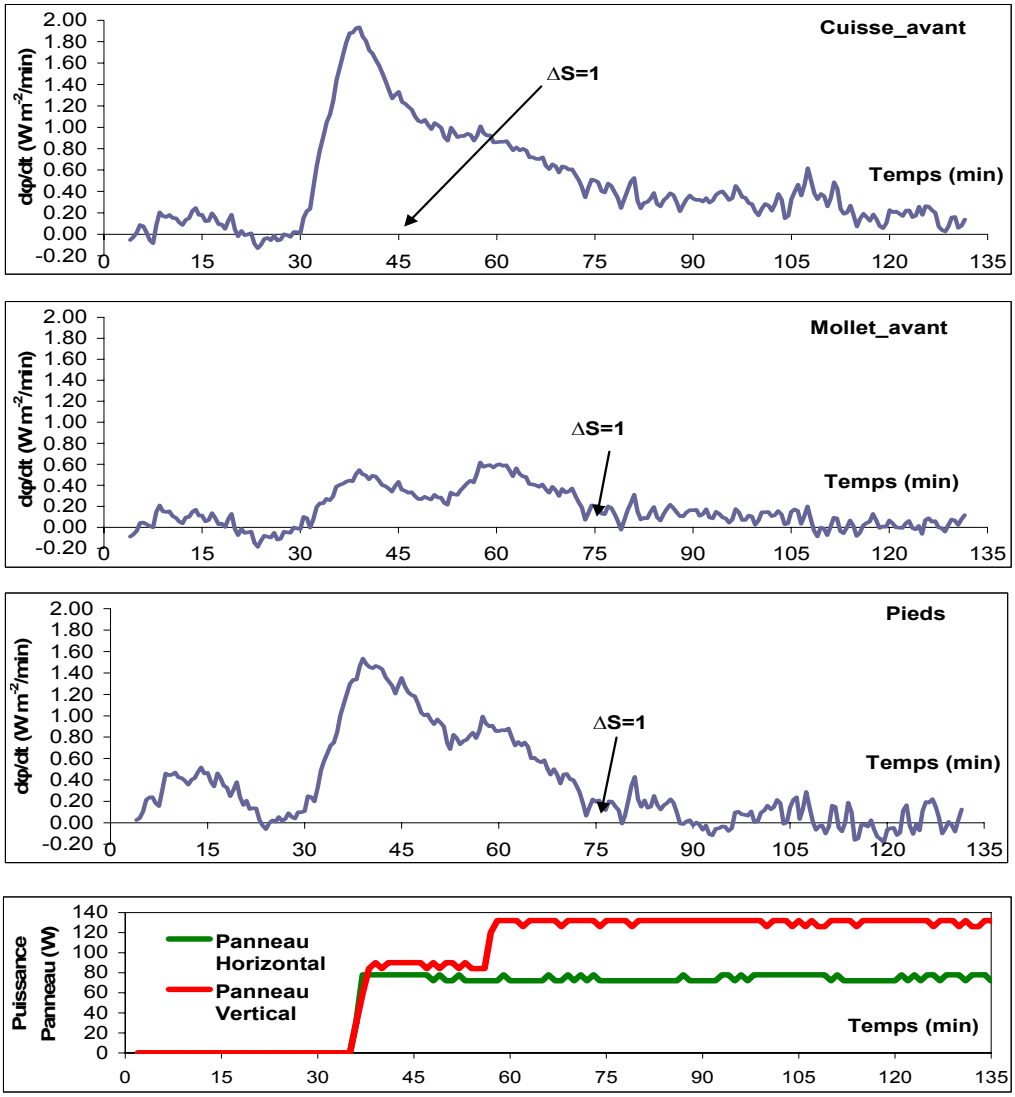


Figure 4.25 : Vitesse de variation de flux local et changement de puissance panneau pour l'homme *HO3*
(Noté : Chauffe-pieds fonctionne à une puissance constante de 25 W)

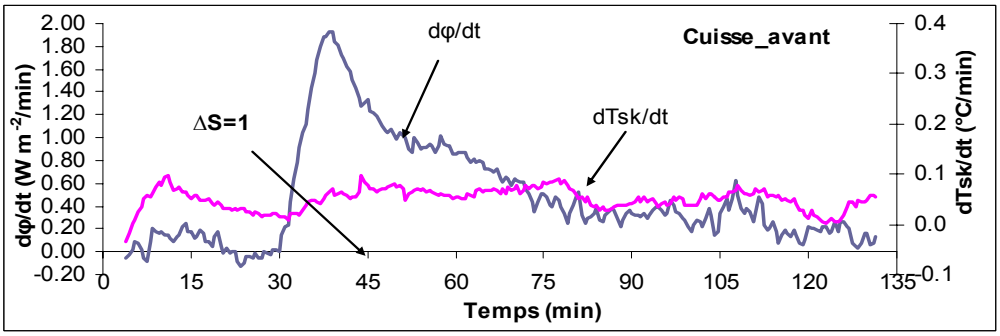


Figure 4.26 : Vitesse de variation de flux et de température de cuisse pour l'homme *HO3*

4.5 - Discussions et conclusions

Le *Tableau 4.17* est un résumé du Tableau de l'*Annexe 4B*. Il apparaît nettement que, dans presque tous les cas, les changements de sensation sont liés aux variations des densités de flux radiatif. L'effet de la vitesse de variation des températures cutanées dT_{sk}/dt est moins évident, car d'une part elle est faible et d'autre part elle est en partie prise en compte dans le Tableau 'sensation-température' (cf. *Chapitre 3*), puisqu'une variation de T_{sk} correspond à une variation de sensation.

Par ailleurs, dT_{sk}/dt est étroitement liée à $d\varphi/dt$, donc il n'est pas facile de faire la part de chaque composant.

D'après ces observations on peut conclure qu'en présence du LHS en fonctionnement, les sensations sont modifiées de :

$$\Delta S = f\ \{(dT_{sk}/dt), (d\varphi/dt), C\}$$

C représente une variation liée à un phénomène non quantifiable qui est probablement psycho-sociologique. Par exemple, le simple fait que les sujets sachent qu'ils peuvent avoir ou qu'ils ont eu une action, fait qu'ils perçoivent l'environnement différemment sans que celui-ci soit changé de manière quantifiable.

Segment		HO2	HO3	HO4	HO5	HO6	HO7	HO8	HO9	H10
Cuisse_ avant	ΔS	1	1	0	0	1	1	1	1	0
	ΔS = f()	dTsk/dt* dφ/dt	dTsk/dt dφ/dt			dTsk/dt dφ/dt	dTsk/dt* dφ/dt	dTsk/dt dφ/dt	dTsk/dt dφ/dt	
Mollet_ avant	ΔS	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	ΔS = f()	dTsk/dt dφ/dt	dφ/dt	dφ/dt		dTsk/dt* dφ/dt	dTsk/dt* dφ/dt*	dTsk/dt dφ/dt	dφ/dt	
Pied	ΔS	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	ΔS = f()	dTsk/dt dφ/dt	dTsk/dt dφ/dt	dφ/dt		dφ/dt	dTsk/dt* dφ/dt*	dφ/dt	dTsk/dt dφ/dt	dφ/dt

Tableau 4.17 : Synthèse des causes évidentes de variation de sensation.
Les cellules grises représentent les variations qui ne sont pas considérées car elles sont faibles

Dans un premier temps, on écrit alors ΔS la modification de sensation lié au LHS :

$$\Delta S = \alpha.(dT_{sk}/dt) + \beta.(d\varphi/dt)$$

α et β sont deux paramètres qu'il faut alors déterminer. Ils ne sont pas forcément liés et peuvent être différents pour chaque segment. L'analyse du *Tableau 4.17* permet certaines conclusions :

- Pour les pieds, dT_{sk}/dt semble avoir une faible influence, donc on suppose :

$$\Delta S_{pieds} = \beta_{pieds}.(d\varphi_{pieds}/dt)$$

- Pour les jambes, on peut écrire :

$$\Delta S_{cuisse} = \alpha_{cuisse}.(dT_{sk,cuisse}/dt) + \beta_{cuisse}.(d\varphi_{cuisse}/dt)$$

$$\Delta S_{mollet} = \alpha_{mollet}.(dT_{sk,mollet}/dt) + \beta_{mollet}.(d\varphi_{mollet}/dt)$$

- Que ce soit pour les mollets ou pour les cuisses, l'influence de (dT_{sk}/dt) n'est pas évidente dans tous les cas. Par ailleurs, il faut rappeler que, dans le modèle MARCOT, les jambes correspondent à un seul segment, par conséquent nous sommes obligés d'avoir une seule relation pour ce segment, que l'on peut écrire :

$$\Delta S_{jambes} = \alpha_{jambes}.(dT_{sk,\ jambes}/dt) + \beta_{cuisse}.(d\varphi_{cuisse}/dt) + \beta_{mollet}.(d\varphi_{mollet}/dt)$$

Lorsque le LHS ne fonctionne pas, nous garderons les correspondances sensation-température données en fin de *Chapitre 3* et, lorsqu'il est en fonctionnement, nous envisageons de modifier les sensations en fonction des relations discutées ci-dessus.

On obtient alors le modèle suivant de sensation en présence du LHS :

LHS Off : pour tous les segments : $Sens_{,i} = f(T_{sk,i})$ et $Sens_{,glo} = f(T_{sk,moy})$

On utilise alors la relation issue des travaux de Galéou, dont certaines plages sont modifiées comme on l'a vue dans le *Chapitre 3*.

<u>LHS On</u> :

- Jambes : $Sens_{,jambes} = S(T_{sk,jambes}) + \Delta S_{jambes}$

  avec $\Delta S_{jambes} = \alpha_{jam}.(dT_{sk,cuisse}/dt)+\beta_{cuis}.(d\varphi_{cuisse}/dt)+\beta_{mol}.(d\varphi_{mollet}/dt)$

- Pieds : $Sens_{,pieds} = S(T_{sk,pieds}) + \Delta S_{pieds}$

  avec $\Delta S_{pieds} = \beta_{pi}.(d\varphi_{pieds}/dt)$

- Autres segments : $Sens_{,i} = f(T_{sk,i})$

- Global : $Sens_{,glo} = f(T_{sk,m})$

Les relations $Sens_{,i} = f(T_{sk,i})$ et $Sens_{,glo} = f(T_{sk,m})$ sont alors les mêmes que les précédentes, car les segments supérieurs ne sont pas influencés par la présence du LHS et la prise en compte de l'effet du LHS pour les jambes et pieds est inclus dans le terme ΔS. Les coefficients manquants α et β seront déterminés lors de la simulation de l'ensemble dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5
Le régulateur comportemental local (LBR)

5.1 - Introduction

Les études bibliographiques (cf. *Chapitre 1*) montrent que plusieurs chercheurs s'intéressent au potentiel d'économies d'énergie réalisées grâce à une baisse de la température intérieure d'un bâtiment. Les occupants doivent avoir la possibilité d'atteindre une situation de confort personnalisé par la création 'd'une bulle de confort', assurée par exemple par un système de chauffage local. L'individu qui utilise ce système doit pouvoir le réguler lui même comme il le souhaite en fonction de son état de confort global et/ou local. Ainsi, nous souhaitons voir si, grâce au LHS, un sujet peut régler son propre microclimat pour améliorer son confort personnel.

L'objectif de ce chapitre est de créer un modèle de 'Régulateur Local' (*Local Behavioural Regulator – LBR*) qui prend en compte les comportements humains. Ce régulateur sera intégré dans l'ensemble de simulation d'un local habité en utilisant MARCOT pour représenter le comportement thermique de l'être humain.

5.2 - Construction d'un modèle de régulateur local

Au cours des chapitres précédents, nous avons conclu que les relations *température-sensation,* issues des travaux de Galéou (1991) pour un habitat en conditions relativement homogènes, ne sont pas satisfaisantes dans le cas du chauffage local. Nous avons donc apporté des modifications à ces relations. Afin de ne pas modifier MARCOT, il a été décidé d'inclure ces modifications spécifiques au système de chauffage local dans le module de 'régulation comportemental local'. Par ailleurs, les réactions comportementales prévues correspondent aux actions que les sujets ont eues lors des expériences dans des locaux réels (cf. *Chapitre 3*), c'est-à-dire des modifications des puissances des trois panneaux du système de chauffage local (LHS).

Ainsi le modèle (LBR) de régulation comportementale du système de chauffage local comporte deux parties distinctes. La première permet le calcul des sensations spécifiques au LHS, la deuxième détermine le comportement par rapport à la variation des puissances des panneaux.

Rappelons que nous avons considéré uniquement les expériences du groupe d'hommes, car toutes les caractéristiques du modèle de thermo-physiologie sont celles d'un homme.

5.2.1 - Modification du calcul des sensations

D'après les résultats des *Chapitres 3 et 4*, nous avons conclu que, d'une part les relations entre sensations et températures (S = f(température)) du modèle TRIM ne sont pas bien adaptées au LHS et que, d'autre part, il semble que d'autres variables entrent en compte dans cette configuration, comme la variation de température cutanée et/ou le flux radiatif local. Donc, nous avons décidé d'intégrer ces phénomènes dans un nouveau calcul de sensation (Sens = f($S_{Galéou}$)), spécifique au système de chauffage local.

Pour les plages température-sensation, nous proposons les modifications suivantes :

- Pour la tête et les mains, on utilise les plages de températures correspondant au cas dévêtu (cf. *Chapitre 3*).
- Au niveau des jambes, nous avons décalé les plages, les valeurs de températures de peau correspondant à S = 3 deviennent les valeurs limites pour S = 2.
- Les sensations pour les pieds et le corps sont satisfaisantes ; on garde donc les plages du modèle d'origine [Galéou, 1991].

A la fin du *Chapitre 4*, outre le décalage des plages de température-sensation, nous avons conclu que, pour les segments du bas du corps, certaines variations de sensation sont liées à d'autres variables ; ainsi nous avons obtenu les expressions suivantes lorsque les panneaux fonctionnent :

<u>Jambes</u> : $S_{jambes} = S(T_{sk,jambes}) + \Delta S_{jambes}$

avec $\Delta S_{jambes} = \alpha_{cuisses}\left(\frac{dT_{sk,cuisses}}{dt}\right) + \beta_{cuisses}\left(\frac{d\varphi_{cuisses}}{dt}\right) + \beta_{mollets}\left(\frac{d\varphi_{mollets}}{dt}\right)$

<u>Pieds</u> : $S_{pieds} = S(T_{sk,\,pieds}) + \Delta S_{pieds}$ avec $\Delta S_{pieds} = \beta_{pieds}\left(\frac{d\varphi_{pieds}}{dt}\right)$

Les coefficients α et β ne peuvent être déterminés que par identification entre modèle et expériences. Par conséquent, nous aborderons ce point ultérieurement.

5.2.2 - Fonctionnement

Le fonctionnement du LBR est basé sur les sensations thermiques (S) données sur une échelle de -3 à +3, comme le modèle de comportement global (GBR) qui été fondé sur le PMV (de -3 à +3). Comme dans le GBR, un certain nombre de changements sont rendus possibles dans le régulateur local. Par exemple, ce sont de petites ou de grandes variations de la puissance des panneaux horizontal et/ou vertical, mise en marche ou arrêt du chauffe-pieds, etc.

Dans le régulateur global, nous avions considéré de petites variations de l'isolation vestimentaire globale. Cette possibilité est difficilement applicable au niveau local et nous n'avons pas envisagé de changement vestimentaire. En effet, dans le modèle MARCOT, la description des vêtements est très fine. Ainsi, pour chaque élément vestimentaire local, il faut indiquer plusieurs paramètres thermo-physiques. Dans notre laboratoire, ce modèle de vêtement a été validé pour deux tenues bien particulières [Althabégoity, 1996]. Il n'est donc pas envisageable de faire des variations de ces tenues de façon simple.

Dans les expériences faites avec les hommes, la régulation de la puissance est engendrée par un certain nombre de 'causes' pas toujours faciles à déterminer. On sait tout de même que les causes majeures sont les changements de sensations thermiques globale et/ou locales et les flux échangés par les segments exposés au LHS. Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence que le fonctionnement du LHS affecte très peu les parties supérieures du corps. En conséquence, nous avons fait l'hypothèse que ce sont seulement les modifications qui interviennent sur les deux segments inférieurs (jambes et pieds) qui poussent les sujets à agir sur les panneaux.

En ce qui concerne la puissance des panneaux (vertical et horizontal), il n'était pas possible de permettre une variation continue. Nous avons donc supposé que les réglages correspondaient à un bouton gradué de 0 à 100 % de façon discontinue par saut de 25 % de la puissance maximale. Ces actions peuvent être positives ou négatives, c'est-à-dire qu'elles correspondent à des augmentations ou des réductions de puissance. Elles sont classées de la façon suivante, en fonction de l'amplitude de la réaction :

- petite variation : la puissance varie de 25 % de la puissance maximale,
- moyenne variation : la puissance varie de 50 % de la puissance maximale,
- forte variation : la puissance est mise au maximum ou au minimum.

Le *Tableau 5.1* rassemble les causes et les actions comportementales que nous avons prises en compte. Les principales sont les suivantes :

- Au niveau global on a défini trois zones : sensation "très froid", sensations "entre -2 et 2 " et sensation "très chaud". Une sensation "très chaud" ou "très froid" peut engendrer des réactions fortes, donc des changements de puissance importants. Par exemple, lorsque S_glo = -3, tous les panneaux fonctionnent à puissance maximale et inversement, si S_glo = +3, le sujet éteint les trois panneaux.
- Au niveau de la sensation locale, nous avons décidé d'utiliser les informations tirées des expériences, par exemple, les hommes augmentent la puissance du panneau horizontal lorsque ils ont froid au niveau des cuisses et inversement lorsqu'ils ont chaud. Il faut rappeler que l'action sur le panneau horizontal est plus marquée chez les hommes.

Contrôle Global d'après la sensation globale

Cause	**S_glo**	**-3**	**-2**	**-1**	**0**	**+1**	**+2**	**+3**
		Très froid	Froid	Léger^t Froid	Neutre	Léger^t Chaud	Chaud	Très Chaud
Effet	$P_{panneaux}$	LHS = P_{max}	Vérifier sensations locales – jambes et pieds *comme le montre le Tableau ci-dessous.*					LHS = 0
	Chauffage global	Treg ↗	Pas de changement de Treg					Treg ↘

Contrôle du Chauffe pieds (CP) d'après la sensation sur les pieds

Cause	**S_ pieds**	**-3**	**-2**	**-1**	**0**	**+1**	**+2**	**+3**
Effet		CP fonctionne à puissance constant.					CP arrêt	

Contrôle des Panneaux Horizontal (HP) et Vertical (VP) d'après la sensation et flux sur les jambes

Cause	**Sensation_ Jambes**	**-3**	**-2**	**-1**	**0**	**+1**	**+2**	**+3**
Effet	$P_{panneaux}$	+100%	+ 50%	+ 25 %	0	- 25 %	- 50 %	-100 %
	Actions conditionn-elles	VP ↗ HP ↗	VP ↗ HP ↗	$\lvert\varphi_{cuis}\rvert \leq \lvert\varphi_{mollet}\rvert$ ⇨HP ↗ $\lvert\varphi_{cuis}\rvert > \lvert\varphi_{mollet}\rvert$ ⇨VP ↗ ou VP ↗ et HP ↗	rien faire	$\varphi_{cuis}\rvert > \lvert\varphi_{mollet}\rvert$ ⇨HP↘ $\varphi_{cuis}\rvert \leq \lvert\varphi_{mollet}\rvert$⇨VP↘		HP = 0 VP = 0

Tableau 5.1 : Raisonnement de 'cause-effet' pour le fonctionnement de LBR

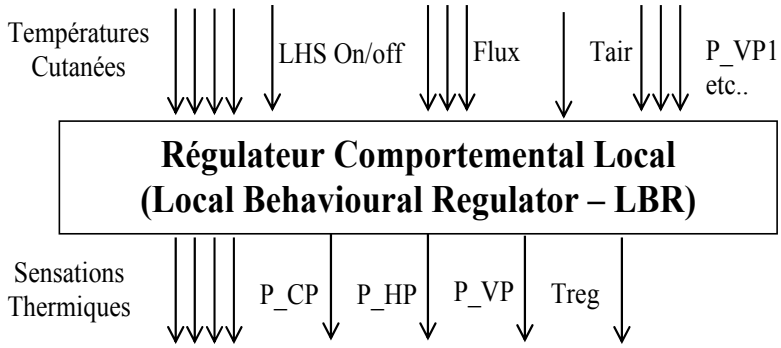
Dans le *Tableau 5.1*, '$P_{panneaux}$' correspond à l'amplitude de variation des puissances des panneaux ; LHS = P_{max} signifie qu'il allume tout à puissance maximale et LHS = 0 qu'il éteint les 3 panneaux. Comme il y a deux panneaux, il devient difficile de déterminer quelle puissance de panneau il faut augmenter ou diminuer. Nous avons fait la supposition que l'individu réagit en fonction des densités de flux radiatif qu'il échange localement sur les cuisses et les mollets. Prenons un exemple : si l'individu a une sensation thermique sur les jambes de 2 (S_{jambes} = +2), c'est-à-dire qu'il a chaud, il doit donc baisser la puissance du système. Il va alors réagir sur le panneau horizontal (HP↘) s'il échange un flux sur les cuisses (φ_{cuisse}) supérieur à celui sur les mollets (φ_{mollet}), ou bien, dans le cas contraire, il va réagir sur le panneau vertical. Lorsqu'une personne a froid (S_{jambes} = -2), on lui donne la possibilité de réagir sur les deux panneaux simultanément.

Nous avons également ajouté d'autres actions simples comme, par exemple, le réglage du chauffe-pieds (CP). Généralement, le froid aux pieds est une des causes majeures d'inconfort local ; par conséquent, le CP est arrêté uniquement quand les pieds sont relativement chauds ($S_{pieds} \geq 1$) et, dans tous les autres cas, il chauffe. Une autre action est autorisée lorsque la sensation globale est dans les plages extrêmes, c'est-à-dire -3 ou +3. Après avoir réagi sur les panneaux locaux, pour améliorer l'état général de confort, le sujet peut intervenir sur la température de consigne de chauffage de la pièce (T_{reg}) par une baisse ou une augmentation de 1.5°C. Ceci a pour but de voir si

les occupants touchent le thermostat central ou non, et quelles en seront les conséquences sur la consommation d'énergie.

5.2.3 - Présentation du module LBR

Le module LBR est constitué, comme tous les modules de l'environnement TRNSYS, d'un noyau de calcul documenté par les PARAMETRES, fixés pour la simulation, et les INPUT, variables d'entrée pour le pas de temps considéré. Les OUTPUT sont les variables de sortie du modèle. La *Figure 5.1* donne le schéma complet des entrées et sorties du modèle. Trois *paramètres* permettent de choisir les puissances maximales des trois panneaux du LHS. Les *entrées* comportent les températures de peau, les flux sur les jambes, l'état du LHS au pas de temps précédent et l'entrée "On/Off" qui correspond au fait qu'on peut permettre ou non au sujet d'agir sur le LHS. Par exemple lors des expériences, au cours de la première demi-heure, les panneaux sont obligatoirement éteints.



Entrées ou Inputs

n°	nom	Définition	Unité
1	Tsk(1)	Température cutanée Tête	°C
2	Tsk(2)	" " Tronc	°C
3	Tsk(3)	" " BraD	°C
4	Tsk(4)	" " BraG	°C
5	Tsk(5)	" " Mains	°C
6	Tsk(6)	" " Jambes	°C
7	Tsk(7)	" " Pieds	°C
8	Tsk(8)	" " Global	°C
9	P_CP1	Puissance chauffe-pieds (t-1)	W
10	P_HP1	Puissance panneau horizontal (t-1)	W
11	P_VP1	Puissance panneau vertical (t-1)	W
12	Ta	Température de l'air local (t-1)	°C
13	Treg1	Temp. régulation globale (t-1)	°C
14	φcuis	Densité de flux cuisse_avant	W/m^2
15	φmollet	Densité de flux mollet_avant	W/m^2
16	φpi	Densité de flux sur pieds	W/m^2
17	Ion	LHS on / off (1 ou 0)	-

Paramètres ou Parameters

n°	nom	Définition	Unité
1	HPmax	Puissance Maxi du HP	W
2	VPmax	" " " " " VP	W
3	CPmax	" " " " " CP	W

Sorties ou outputs

n°	nom	Définition	Unité
1	S(1)	Sensation Tête Ste	-
2	S(2)	" Tronc Str	-
3	S(3)	" BraD Sbd	-
4	S(4)	" BraG Sbg	-
5	S(5)	" Mains Sma	-
6	S(6)	" Jambes Sja	-
7	S(7)	" Pieds Spi	-
8	S(8)	" Global Sglo	-
9	P_CP	Puissance chauffe-pieds	W
10	P_HP	Puissance panneau horizontal	W
11	P_VP	Puissance panneau vertical	W
12	Treg	Temp. consigne générale	°C

Figure 5.1 : Le régulateur comportemental local (LBR)

L'organigramme de calcul est indiqué sur la *Figure 5.2*. La première partie du module détermine les sensations thermiques qui sont ensuite utilisées dans la deuxième partie de régulation comportementale. En *sortie*, le module donne l'état du LHS, la température du thermostat du local et la sensation de l'individu.

Il faut noter que, dans notre travail, les températures cutanées locales et la moyenne seront calculées par MARCOT.

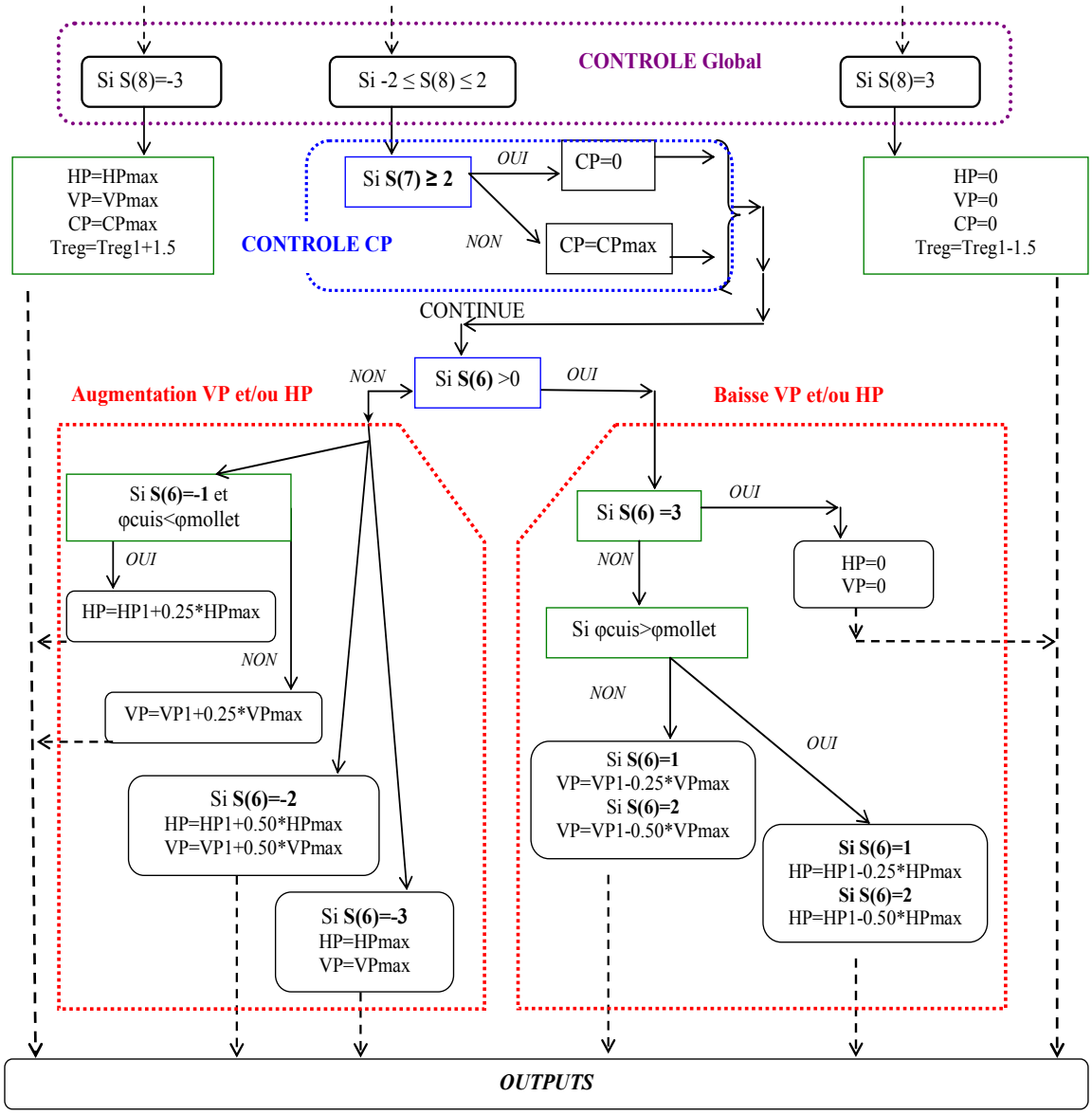


Figure 5.2 : Organigramme du LBR

5.2.4 - Intégration dans TRNSYS

Au cours des expériences nous avons constaté que le LHS a une forte inertie thermique. Lorsque la puissance des panneaux est modifiée, ils mettent longtemps pour réagir en température. Afin de prendre en compte ce phénomène, nous avons développé un module de '*comportement thermique du LHS*' en régime transitoire pour l'intégrer dans la simulation de l'ensemble. Ce module est décrit dans *l'Annexe 5A*.

Il faut souligner que le pas de temps minimal pour la simulation du bâtiment est de ½ heure ou 1 heure, ce qui est largement supérieur aux temps caractéristiques des réactions thermo-physiologiques et/ou comportementales de l'être humain. Ce pas de temps est imposé à tous les modules de calcul. Par ailleurs, dans un premier temps, nous souhaitons vérifier le fonctionnement correct du régulateur LBR couplé à MARCOT et au LHS. En conséquence, nous n'allons donc pas coupler cet ensemble avec le reste d'un bâtiment de façon à pouvoir réduire le pas de temps de calcul. Le schéma général des connections entre les composants est donné sur la *Figure 5.3*.

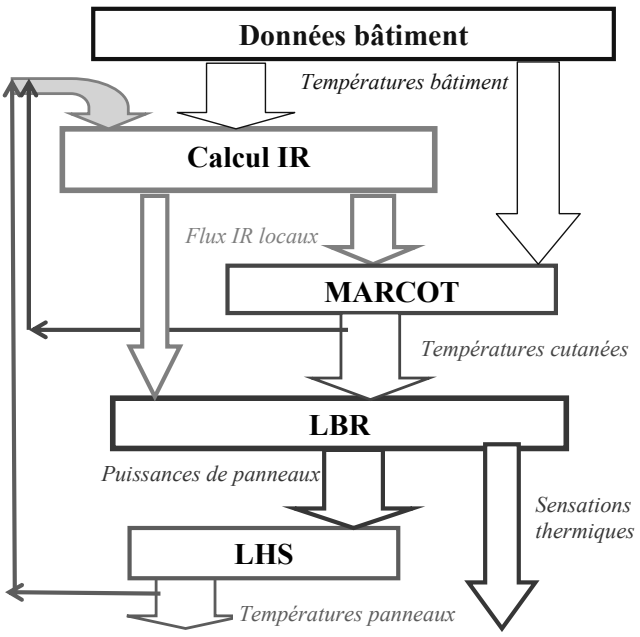


Figure 5.3 : Schéma des connections entre les composants dans l'environnement TRNSYS

<u>Conditions générales des simulations</u> :

Nous avons choisi des conditions simples, qui correspondent aux conditions expérimentales. Les variables qui restent constantes sont les suivantes :

- L'activité métabolique reste fixée à 70 W m^{-2} (1.2 met).
- La vitesse d'air est uniforme sur le corps et fixée à Va = 0.1m/s.
- L'isolation vestimentaire est fixée à 0.96 clo, ce qui correspond à la tenue vestimentaire d'hiver. La tenue vestimentaire de référence dans le modèle MARCOT a légèrement été modifiée au niveau du tronc et des bras, tout en gardant la valeur de tenue à 0.96 clo. Ce changement a été fait pour se rapprocher le plus possible de la tenue portée par les sujets lors des expériences.
- Les puissances maximales des panneaux sont :

HP_{max}	VP_{max}	CP_{max}
60 W	133 W	25 W

Nous avons gardé la possibilité de connaître simultanément les sensations issues de MARCOT d'après la relation d'origine et celles calculées par le module LBR.

Pour les données représentatives des conditions internes du bâtiment, trois options ont été testées :

Conditions 1 : On utilise les données mesurées dans le local lors des expériences avec sujets réels (température d'air, de parois, des panneaux, cf. *Chapitre 3*). Ceci a pour but de vérifier si le comportement de l'ensemble reste cohérent avec les données réelles et tout particulièrement les nouvelles sensations calculées.

Conditions 2 : On suppose que la température du local évolue par palier de 10 à 22°C. Ceci nous permet de déterminer à partir de quelle température moyenne le sujet met en marche le LHS.

Conditions 3 : Les conditions environnementales du local sont celles d'un bâtiment soumis à une météo réelle (cf. *Chapitre 2*). Nous voulons savoir si, en demi-saison, l'utilisation d'un LHS améliorer le confort des occupants sans déclencher le chauffage global.

5.3 - Résultats de simulation

5.3.1 - Conditions 1 : Environnementales réelles

L'objectif principal de cette simulation est de voir si les sensations calculées (S) par le module LBR concordent avec les résultats expérimentaux (S_{exp}). Nous souhaitons également voir si il y a une amélioration par rapport au modèle d'origine (S_MG). A cause des différences inter-individuelles, nous avons préféré regarder une expérience réelle en détail. Selon le tableau établi au *Chapitre 4* et présenté en *Annexe 4B*, certains cas ne montrent pas de fortes corrélations entre la sensation et la vitesse de variation des flux et/ou de la température. *Donc, nous avons choisi le cas HO3, car il montre une sensibilité forte (graphes des vitesses de variations présentés dans le Chapitre 3 et 4). Ce cas représente les comportements simples qui sont facile à étudier.*

Remarque : Le modèle donne des résultats correspondant au pas de temps de calcul. Pour pouvoir comparer nos résultats aux mesures, nous avons complété les données manquantes en supposant qu'entre deux questionnaires les sujets n'ont pas changé de sensations thermiques.

(a) Conditions de simulations

On utilise les données expérimentales HO3 pour toutes les températures de l'environnement - température d'air, de parois, des panneaux, etc. Pour les premières 30 minutes, nous avons maintenu le LHS éteint, comme dans l'expérience. Les températures de peau sont calculées par le modèle MARCOT. Le pas de temps des simulations est de 0.5 min.

(b) Validation des sensations

La *Figure 5.4* compare les trois sensations (S, S_exp et S_MG) pour les parties supérieures et inférieures du corps. Après avoir changé l'isolation au niveau du tronc et des bras, on peut remarquer que les sensations calculées correspondent mieux aux sensations expérimentales. Comme on a constaté dans le *Chapitre 4*, les écarts entre les valeurs de sensations expérimentales et calculées pour les mains et la tête sont tout à fait acceptables.

Malgré le décalage des plages de la relation température-sensation par rapport aux plages d'origine, on constate toujours par moment une différence de ±1 pour les jambes, mais parfois la sensation calculée (Sja) s'accorde avec la sensation de cuisse réelle (Scuis_exp). Pour les pieds et le corps, on obtient un très bon accord. Globalement, les modifications effectuées ont amélioré le calcul des sensations. Bien sûr, il existe toujours des différences entre les sensations réelles et calculées pour certaines périodes. Il faut tout de même garder à l'esprit que nous avons prolongé les sensations entre deux questionnaires et que peut-être, en réalité, s'ils en avaient eu la possibilité, les sujets auraient modifié leurs votes dans la période.

(c) Analyse des différences entre sensations réelles et calculées

En général, les différences ne sont pas très importantes et nous cherchons à comprendre d'où proviennent ces différences et, plus particulièrement, la sensation sur les jambes, car elles interviennent dans la régulation comportementale. Les raisons de ces différences peuvent être diverses :

- Comme nous l'avons déjà signalé, les sensations prédites sont déterminées à partir des températures cutanées calculées par MARCOT. Il est donc normal que parfois les sensations ne correspondent pas exactement à celles des expériences car les températures sont légèrement différentes. Le modèle de thermo-physiologie réagit plus rapidement aux variations du climat que l'occupant réel. En conséquence, par exemple en début d'expérience, l'homme HO3 note une sensation de tronc neutre et la sensation prédite est froide (S = -1) (*Figure 5.4*).
- Dans le modèle, cuisses et mollets sont regroupés en un seul segment alors que dans les expériences on a quatre mesures de température sur les jambes (*Figure 5.5*).

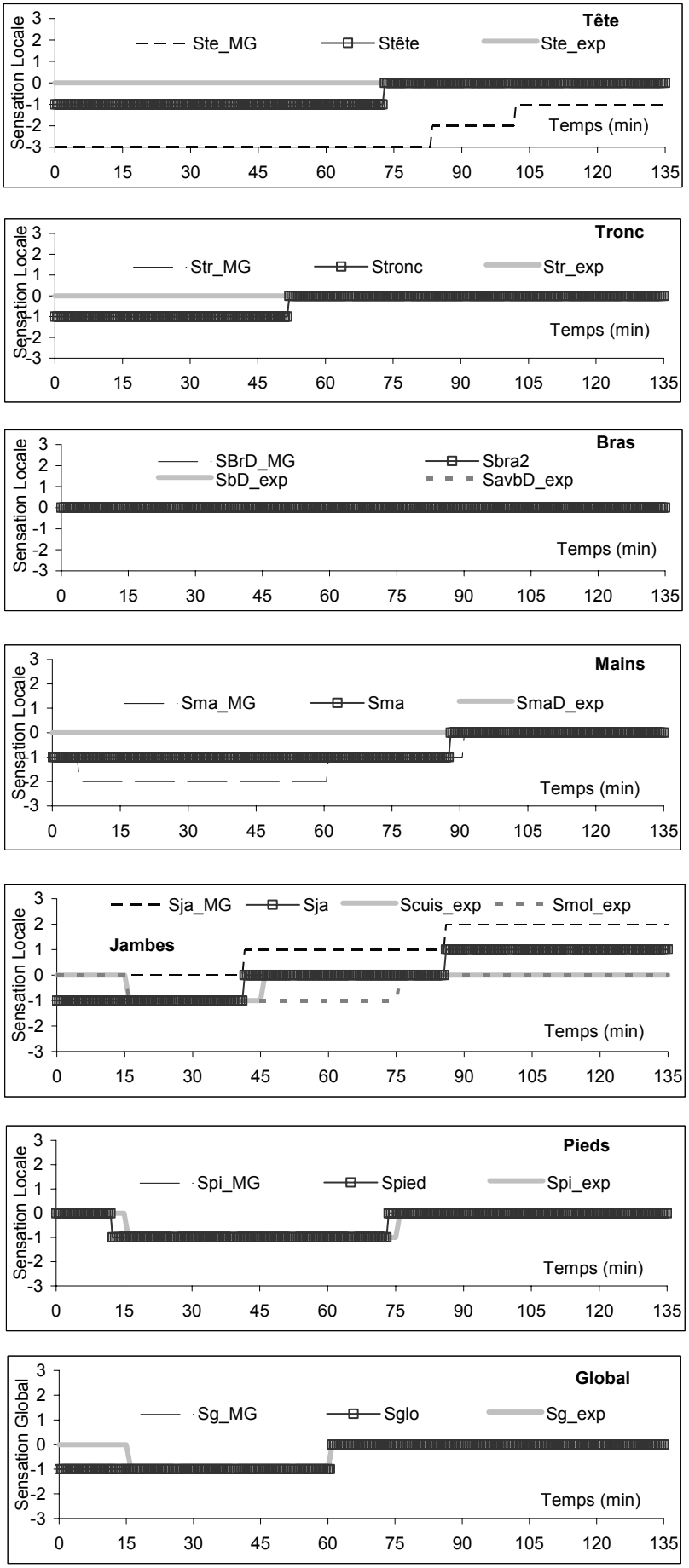


Figure 5.4 : Sensations calculées (par 2 méthodes) et réelles pour certains segments et le global (*Cas HO3*)

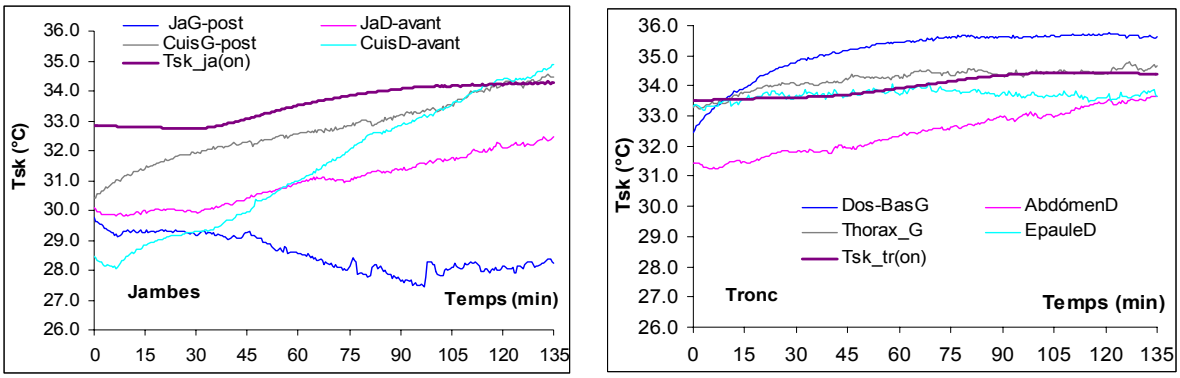


Figure 5.5 : Températures cutanées calculées et réelles pour le tronc et les jambes (*Cas HO3*)

Première approche : influence du taux de variation des températures de peau

Dans la littérature, le poids (α_{jam}) accordé au terme ($dT_{sk,\ ja}/dt$) est d'environ 0.1 à 0.2. On sait que l'influence du flux reçu est plus forte sur les cuisses que sur les mollets ; on peut donc supposer que β_{cuis} est supérieur à β_{mol}. Il est évident que diverses valeurs pourraient être valables pour les paramètres β_{cuis}, β_{mol} et α_{jam}. Nous avons alors essayé plusieurs combinaisons de ces paramètres pour voir lesquelles permettaient de s'approcher au mieux des résultats expérimentaux. Dans le *Chapitre 3*, il a été noté que la vitesse de variation de la température cutanée des pieds à t = 75 min est de l'ordre de 0.20°C/min, entraînant une augmentation de la sensation thermique des pieds pour l'homme HO3, ce qui n'est pas représentatif de l'ensemble des observations.

Plusieurs étapes ont été nécessaires pour déterminer une expression de cet écart de sensation ΔS qui est propre au LHS. Pour les jambes, par exemple :

- Les vitesses de variations de la température et les densités flux radiatifs ont été remplacées par des moyennes glissantes pour s'affranchir des fluctuations trop rapides (dans MS Excel).
- Ensuite on a comparé les sensations expérimentables à celles calculées, avec la relation $S_{jambes} = f(T_{sk,\ jambes})$, ce qui nous a permis d'obtenir les valeurs de $\Delta S_{exp\text{-}cal}$.
- Enfin, nous avons testé plusieurs valeurs de α_{jam}, β_{cuis} et β_{mol} dans l'expression : $\Delta S_{jambes} = \alpha_{cuisses}.\left(\frac{dT_{sk,cuisses}}{dt}\right) + \beta_{cuisses}.\left(\frac{d\varphi_{cuisses}}{dt}\right) + \beta_{mollets}.\left(\frac{d\varphi_{mollets}}{dt}\right)$, de façon à obtenir l'égalité $\Delta S_{jambes} = \Delta S_{exp\text{-}cal}$. Au préalable, les valeurs de ΔS_{jambes} ont été arrondies à la valeur entière la plus proche.

Nous avons alors obtenu la combinaison suivante, qui améliore l'estimation de la sensation de façon assez significative (*Figure 5.6*) :

$$\alpha_{jam} = -0.1,\ \beta_{cuis} = -0.7 \text{ et } \beta_{mol} = -0.2$$

D'où :

$$S_{jambes} = S(T_{sk,jambes}) - 0.1.\left(\frac{dT_{sk,cuisses}}{dt}\right) - 0.7.\left(\frac{d\varphi_{cuisses}}{dt}\right) - 0.2.\left(\frac{d\varphi_{mollets}}{dt}\right)$$

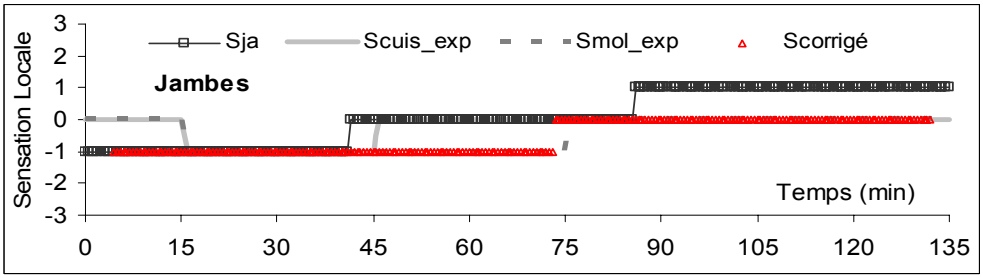


Figure 5.6 : Sensations corrigées et prédite pour le cas *HO3*

L'amélioration des sensations prédites de cette façon reste une approche très personnalisée, car elle correspond uniquement à l'homme HO3. Ces résultats sont à généraliser avec une grande prudence. En effet, si on regarde le tableau récapitulatif en *Annexe 4B*, on voit que chaque individu semble avoir des réactions qui lui sont très personnelles. Par ailleurs, il est clair que le nombre de points expérimentaux n'est pas du tout suffisant et que la gamme de sensation parcourue est très limitée. Ces conclusions ne sont donc que qualitatives ou, éventuellement, des pistes de réflexion et on a décidé d'abandonner momentanément cette voie dans notre étude.

Deuxième approche : influence des flux

Pour affiner les corrections, nous avons décidé de revenir aux pistes qui apparaissent lors d'exploitation des données expérimentales HO3 :

- la plupart des sensations des cuisses et des mollets ont une valeur de -1 en début d'essai et 0 en fin d'essai (t = 135 min),
- le flux reçu sur les cuisses maintient la sensation si elle est à la neutralité, mais change le comportement envers les panneaux, en particulier sur le panneau horizontal ; par contre, il semble que, si la sensation est froide, un flux élevé augmente la sensation d'un point (notons que : $d\varphi_{cuisse}/dt >> d\varphi_{mollet}/dt$, cf. *Chapitre 4*).

Donc, en nous basant sur ce raisonnement, on peut déterminer à partir de quelle valeur de densité de flux (φ_{cuisse}) on doit garder la sensation prédite égale à zéro. Pour le *cas HO3*, on peut dire que :

si $\varphi_{cuisse} \geq 23.5$ W/m², $\Delta S_{jambes} = -1$ et si $\varphi_{cuisse} < 23.5$ W/m², $\Delta S_{jambes} = 0$

Ensuite, ce ΔS_{jambes} est utilisé pour corriger la sensation : $S_{jambes} = S(T_{sk,\,jambes}) + \Delta S_{jambes}$.

Les résultats obtenus avec cette approche sont présentés sur la *Figure 5.7*. On observe quelques oscillations de la sensation autour de 90 min. Le pas de temps de simulation est très petit et bien inférieur à ce que pourraient noter les sujets réels, ces fluctuations sont du domaine de la résolution numérique et il ne faut pas en tenir compte.

Après avoir appliqué cette modification à tous les cas expérimentaux pour une vérification générale, on estime que les corrections apportées permettent de prédire les sensations de manière suffisamment satisfaisante dans le cas du LHS.

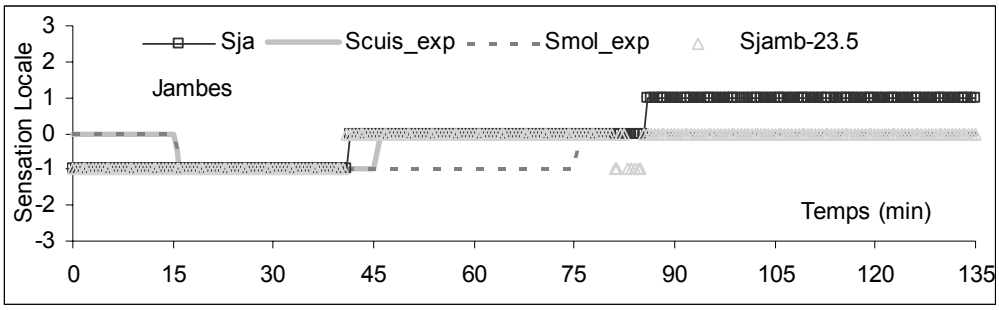


Figure 5.7 : Sensations corrigées suivant le flux sur les cuisses

(d) Validation du Comportement

L'augmentation de puissance des panneaux (VP et/ou HP) est basée sur la sensation des jambes et la densité du flux radiatif sur les cuisses et les mollets, comme il a été présenté sur la *Figure 5.2*. Au cours de la première demi-heure, les panneaux sont éteints. Au moment où le sujet est autorisé à toucher la régulation du LHS, les sensations calculées au niveau des jambes et des pieds étant de -1, le LBR augmente donc la puissance des panneaux.

Lorsque la sensation des jambes est égale à -1, nous avons testé deux possibilités :

- Suivant l'option A, le sujet a le comportement décrit plus haut et il tient compte de la sensation et des densités de flux locaux sur les cuisses (φ_{cuisse}) et les mollets (φ_{mollet}).
- Suivant l'option B, son comportement ne dépend que de la sensation sur les jambes.

La *Figure 5.8.a* présente les puissances expérimentales des panneaux pour le cas HO3. Rappelons que cela entraîne que la température d'air dans la pièce augmente d'environ 17 à 19.5°C

La *Figure 5.8.b* présente les évolutions des flux radiatifs pour le même cas HO3. Notons que la densité de flux radiatif échangé reste beaucoup plus importante sur les cuisses que sur les mollets.

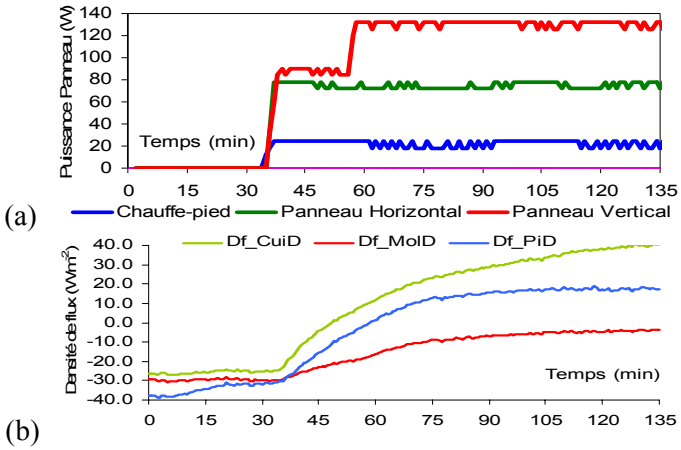


Figure 5.8 : Puissances des panneaux et densités de flux radiatifs pour les segments inférieurs dans les conditions expérimentales HO3

Le comportement avec l'*option A* est présenté sur la *Figure 5.9*. Le panneau HP ne fonctionne pas, car $\varphi_{cuisse} > \varphi_{mollet}$ mais le panneau vertical (VP) et le chauffe-pieds (CP) fonctionnent à puissance maximale.

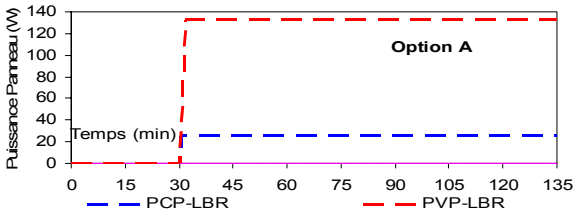


Figure 5.9 : Comportement simulé avec l'option A

Avec *l'option B*, la sensation sur les jambes étant de -1, les deux panneaux HP et VP sont déclenchés simultanément (*Figure 5.10*).

Il semblerait que l'option B donne des résultats plus proches de la réalité.

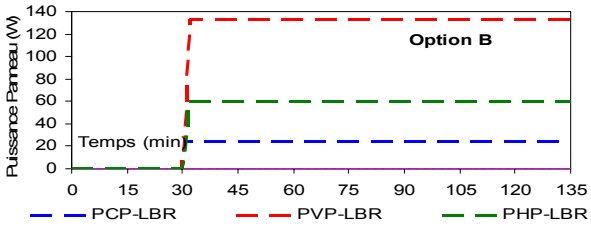


Figure 5.10 : Comportement simulé avec option B

Si on regarde les résultats expérimentaux de l'individu HO3, il est probable qu'étant donné que la sensation sur les cuisses est neutre après t = 90 min, il n'a peut être pas besoin de continuer à utiliser le panneau horizontal. Peut être que d'autres facteurs interviennent, ou bien il estime qu'il a un peu chaud, mais trouve ça confortable. Il faut rappeler que notre modèle prédit la sensation, qui est assez objective, et non le confort, qui est très subjectif, mais qui est plus à l'origine des réactions comportementales. Il faudra peut être prolonger le temps d'expérience dans le futur pour voir les réactions d'un sujet à la fin de la troisième heure par exemple.

5.3.2 - Conditions 2 : Ambiance uniforme

(a) Ambiance constante à 18°C

Nous nous sommes interrogé sur les effets du LHS sur l'état thermique de l'homme. Pour cela, nous avons fait deux simulations avec une ambiance dans la pièce uniforme et fixée à 18°C, ce qui est une température légèrement inférieure à une situation thermique optimale, mais correspond à ce qui peut se passer dans un bureau non chauffé. Nous ne comparons les résultats qu'à partir de la fin de la première heure, car on suppose que la première heure correspond à une période de stabilisation et à la création d'un passé thermique de l'homme comme fait dans les compagnes

exprimentales. A la fin de la première heure, dans les deux simulations, les sorties du modèle de thermo-physiologie sont identiques.

- LHS_ OFF : correspond au cas où LHS ne fonctionne pas au cours de toute l'exposition ;
- LHS_ON : correspond au cas où le LHS est éteint au début, puis allumé à puissance maximale pour le reste du temps de simulation à partir de t = 2h.

Les températures des panneaux et Table top sont présentées sur la *Figure 5.11* pour le cas LHS_ON. On constate qu'il faut presque 3 heures pour que les températures soient stabilisées.

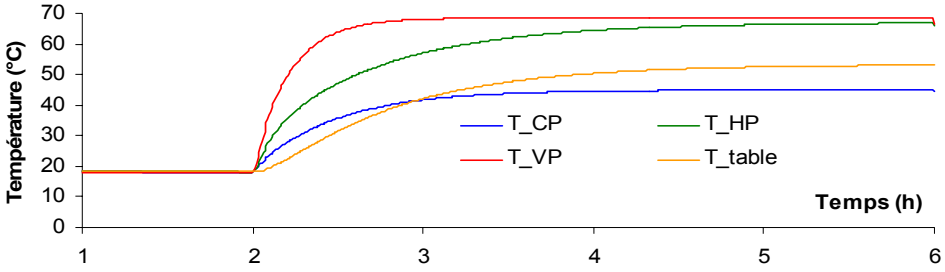


Figure 5.11 : Températures des panneaux pour le cas LHS_ON

La *Figure 5.12* donne les températures cutanées globale et locales de certains segments pour les deux situations. On constate que les écarts de températures des segments supérieurs (tête, tronc, bras) sont inférieurs à 1K. Par contre, les segments soumis directement au LHS présentent des écarts beaucoup plus importants. Pour les jambes, cet écart est d'environ 1.5K et de presque 6K pour les pieds. Il est normal que les petits segments comme les mains et les pieds montrent une baisse de température plus forte que les autres segments. Ces écarts entraînent finalement une différence de plus de 1°C sur la température moyenne cutanée.

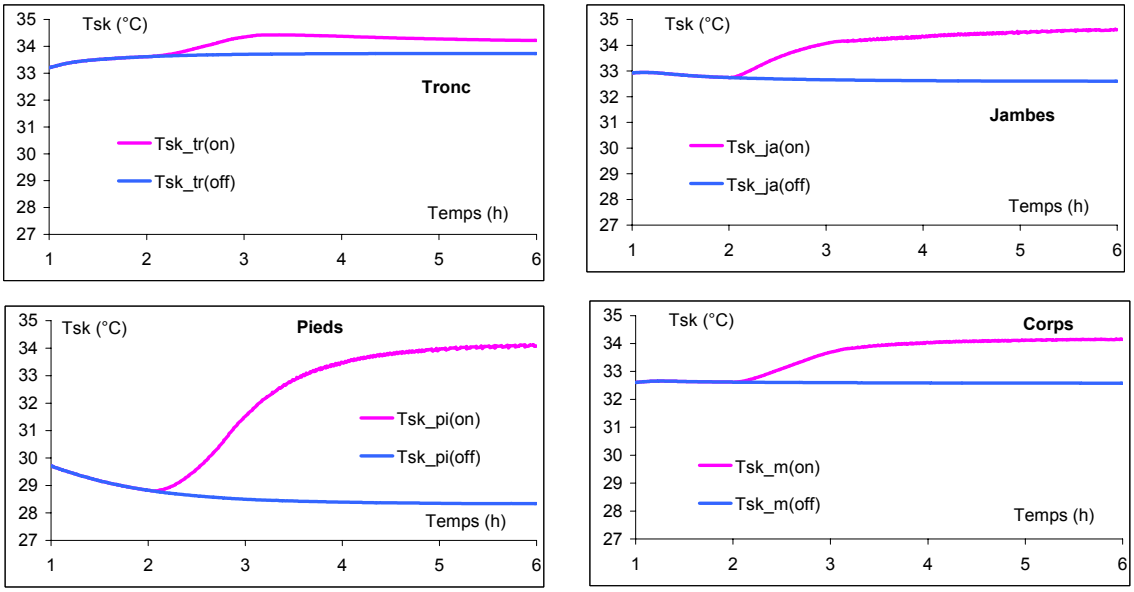


Figure 5.12 : Températures de peau lorsque le LHS est éteint (LHS_OFF) et lorsque le LHS marche (LHS_ON)

Ces résultats montrent clairement l'effet important du LHS sur le comportement thermo-physiologique de l'homme. Par ailleurs, il faut noter que l'ensemble atteint des valeurs stables vers t = 5h, ceci est du à l'inertie du LHS et celle du corps humain. Cette simulation nous aide à comprendre pourquoi, dans les expériences, les hommes mettent parfois beaucoup de temps pour déclarer une sensation neutre. Quand les sujets sont soumis à une ambiance froide comme 18°C, les températures cutanées sont basses et conduisent à des jugements sensoriels froids (*Figure 5.13*). Dans une ambiance fixée à 18°C (LHS_OFF), les gens auront toujours froid, les sensations sont

toutes négatives. Par contre le LHS permet de rétablir une situation thermique plus acceptable, puisque avec LHS_ON, toutes les sensations atteignent 0 et même +1 sur les pieds.

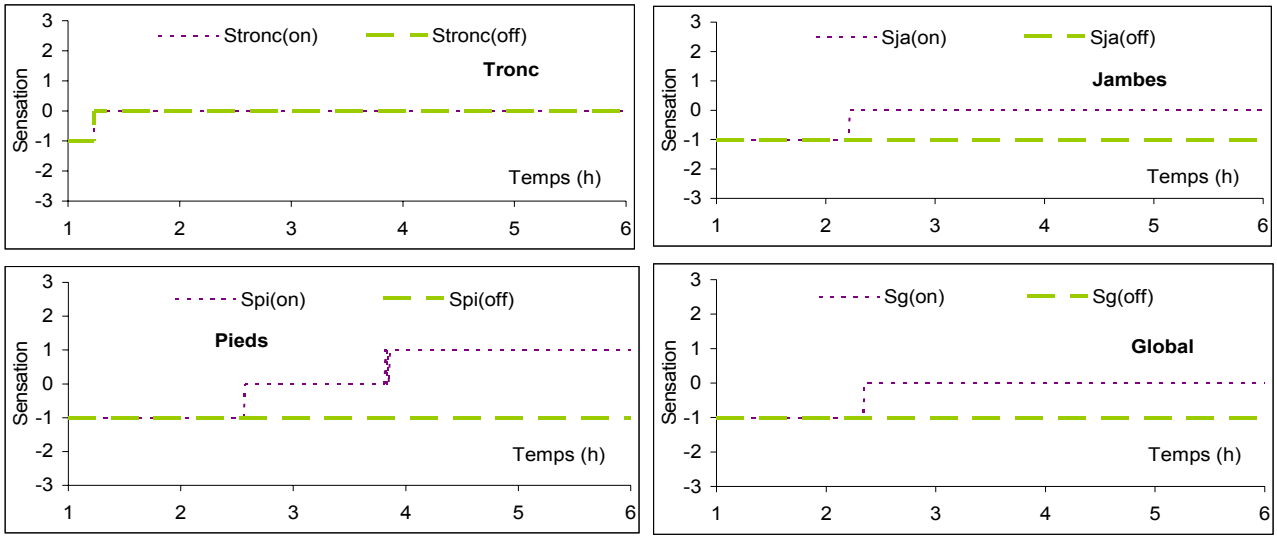


Figure 5.13 : Sensations pour certain segments lorsque le LHS est éteint et en marche

(b) Ambiance uniforme variable par palier (10 à 22°C)

Dans cette simulation, les températures dans le local (température d'air et de surface) varient par palier de 2°C toutes les deux heures entre 10 et 22°C, comme le montre la *Figure 5.14*. Les paliers sont suffisamment longs (2 h) pour que thermophysiologie et LHS atteignent un régime presque stationnaire en fin de palier. Ceci nous permet d'analyser les limites de déclenchement du LHS. La *Figure 5.15* donne les variables du LHS (puissances et température de chaque panneau) correspondantes.

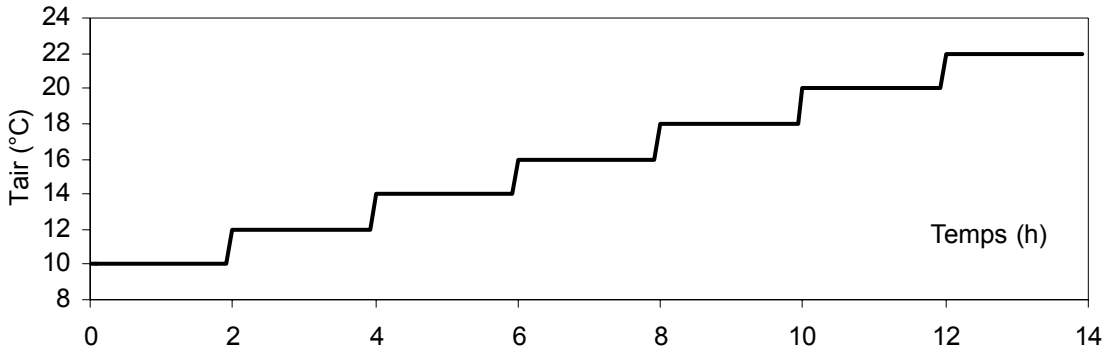


Figure 5.14 : Variation de la température d'ambiance

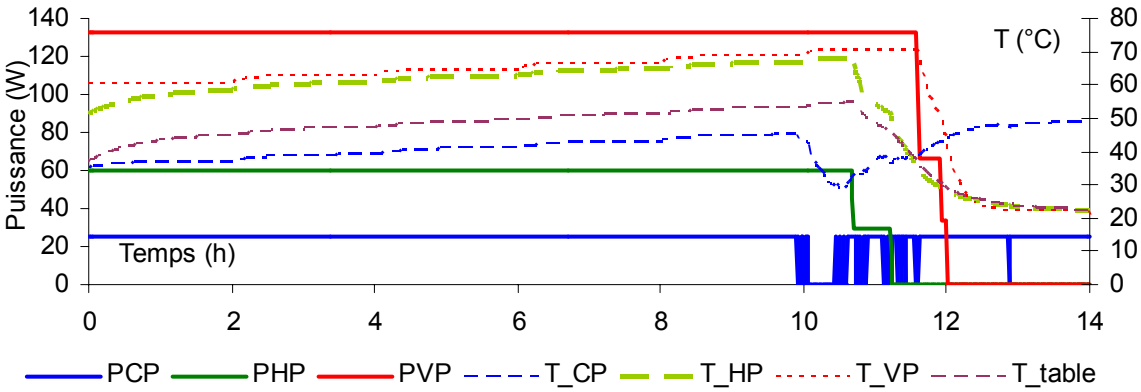


Figure 5.15 : Puissances et températures des panneaux et du dessus de table (Table top)

Pour des ambiances comprises entre de 10 et 18°C, le LHS marche à la puissance maximale. On peut constater qu'à partir de 20°C, le panneau horizontal est diminué, car il fonctionne avec une puissance de 30 W et ensuite il est arrêté. Le chauffe-pieds peut être éteint également, si la sensation des pieds atteint zéro. Selon ces résultats, le LHS peut être éteint complètement à partir d'une température d'ambiance autour de 22°C ; toutefois, après l'arrêt des deux panneaux principaux, le chauffe-pieds est rallumé. Notons que si l'individu est un peu plus habillé, cette valeur peut être différente.

Les évolutions des températures et des sensations pour le tronc, les jambes et pieds et le corps sont présentées sur la *Figure 5.16*.

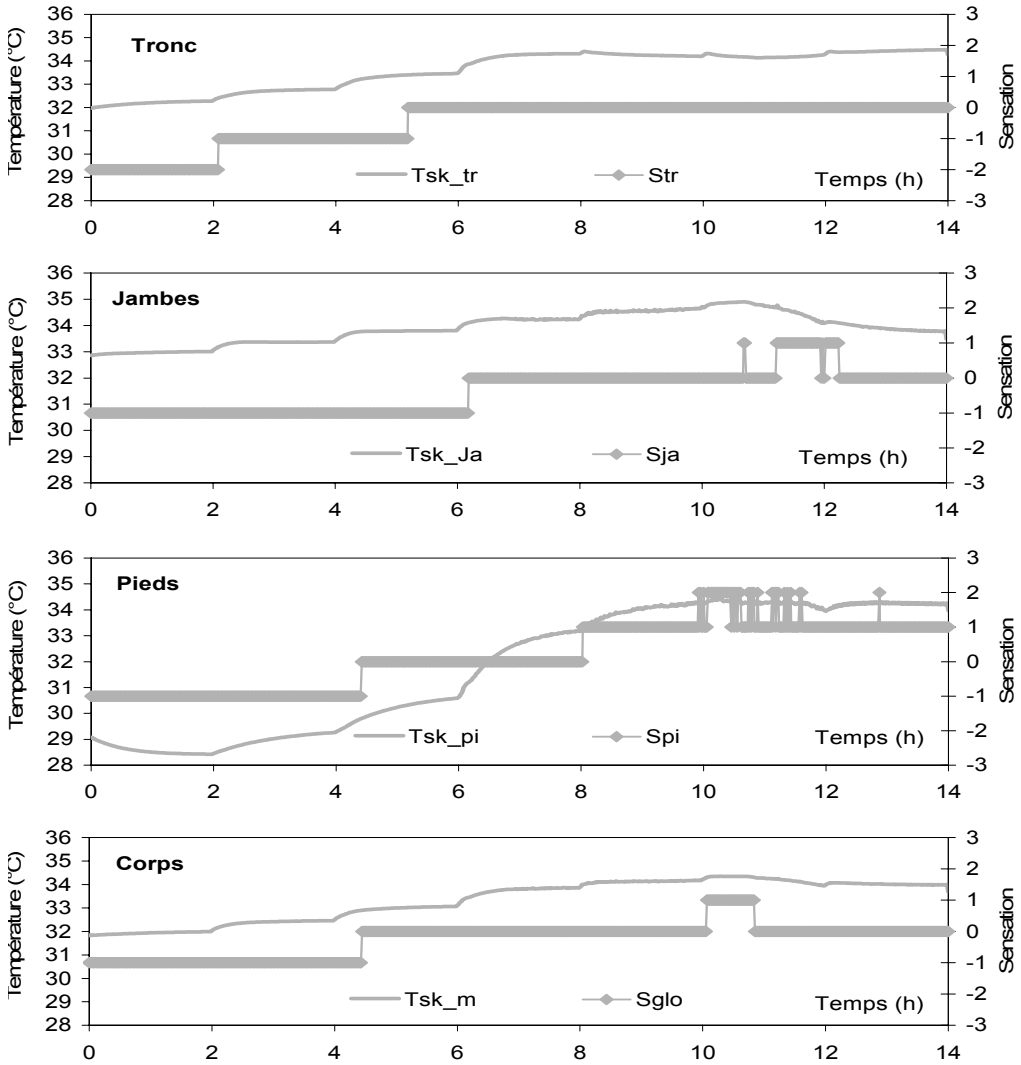


Figure 5.16 : Températures et sensations pour une variation d'ambiance par palier

On peut en tirer les informations suivantes :

- Dans une ambiance froide entre 10 et 14°C, il est normal que les températures de peau locales soient en baisse, ce qui donne des sensations froides, malgré l'usage d'un système de chauffage local à puissance maximale.
- À partir de 16°C, bien que l'ambiance soit froide, on arrive à garder des sensations proches de la neutralité pour les jambes, les pieds et le corps grâce à la possibilité de contrôler le LHS.
- Les baisses de puissance des panneaux (aux alentours de 10 h et 12 h) sont bien liées à l'augmentation de la sensation des jambes et pieds. Lorsque l'ambiance est à plus de 20°C, on peut constater des oscillations de certaines sensations (jambes, pieds et corps). Ceci signifie que le LHS peut être parfois éteint.

- Globalement, le corps atteint une sensation minimale égale à -1, par conséquent le thermostat global (T_{reg}) n'est pas touché. Il aurait fallu imposer des températures cutanées inférieures à 32°C pour observer une sensation très froide qui déclencherait une action forte.

La *Figure 5.17* présente les densités de flux radiatifs pour plusieurs segments. Pour une ambiance à 18°C, les densités de flux radiatifs reçus sont autour de 0 W m^{-2} pour les mollets, 20 W m^{-2} pour la poitrine et les pieds et environ 40 W m^{-2} pour les cuisses. Par contre, on constate que les segments qui ne sont pas influencés par le LHS, comme le dos et les bras, perdent en permanence de la chaleur. La tête, qui ne voit presque pas le LHS, perd en permanence un flux très important. Dans les ambiances froides, on constate une grande variation de flux échangés ; par contre, une fois que le LHS est éteint, les densités de flux redeviennent plus homogènes.

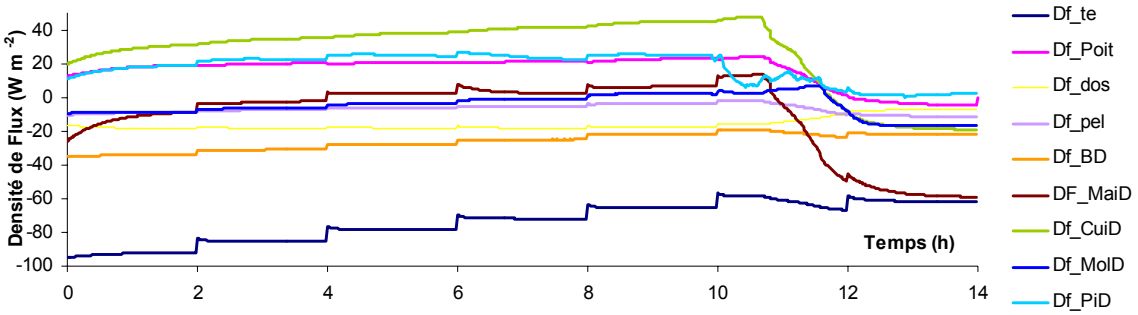


Figure 5.17 : Evolution des flux radiatifs lors des variations de la température ambiante par palier

Remarque : Afin d'établir la même comparaison que dans les conditions ambiantes fixées, nous avons fait une simulation identique en l'absence de LHS. On trouve que, dans les conditions ambiantes de 10°C, les températures cutanées sont plus basses par rapport au cas où le LHS fonctionne : pas de changement pour la tête et le tronc, mais 1 à 1.5°C de moins pour les jambes et le corps (zones vêtues) et jusqu'à 3°C de moins pour les mains et les pieds (zones nues).

5.3.3 - Conditions 3 : Bâtiment en demi-saison

Comme nous l'avons déjà souligné, les pas de temps caractéristiques du bâtiment et du LBR ne sont pour l'instant pas compatibles. Par conséquent, nous ne pouvons pas actuellement faire un couplage de l'ensemble car dans le logiciel TRNSYS le pas de temps est commun à tous les modules. En conséquence, nous utiliserons les résultats de simulation d'un bâtiment pour les températures d'ambiance, air et parois, en demi-saison. Cette expérience permettra d'observer, d'une part, si le système de chauffage local peut améliorer les jugements sensoriels des utilisateurs et, d'autre part, si l'inertie d'un bâtiment a une influence sur le fonctionnement d'un LHS. Il est bien évident que la rétroaction de l'influence du LHS sur la thermique du bâtiment fera alors cruellement défaut.

(a) Conditions de simulations

On a choisi deux types de bâtiment, l'un de forte inertie thermique, baptisé lourd (HWB) et l'autre de faible inertie, appelé léger (LWB). Ils ont été choisis d'après les données du *Chapitre 2* pour effectuer les simulations en demi-saison (quelques jours en octobre). La *Figure 5.18* montre les conditions météorologiques, identiques pour les deux types de bâtiment, ainsi que les température intérieures obtenues. La température moyenne extérieure est de 13.6°C. La température de l'air interne (T_{in}) pour ces trois jours est environ de 15.6°C pour LWB et 16.8°C pour HWB. Les puissances maximales des panneaux du LHS dans l'un et l'autre bâtiment sont : HP = 60 W, VP = 133 W et CP = 25 W. Le pas de temps des simulations est d'1 minute.

Les actions comportementales sur les panneaux dans les deux types des bâtiments sont regroupées sur la *Figure 5.19*. Le panneau vertical fonctionne à la puissance maximale dans les deux cas. A partir du deuxième jour dans le bâtiment léger, le HP fonctionne à 45 W et on trouve des oscillations pour le chauffe-pieds. Ce comportement est en partie lié à l'augmentation de la

température T_{in}. Il faut noter que les températures moyennes des deux types de bâtiment sont différentes ainsi que l'amplitude des variations. Il est donc logique que, dans le bâtiment léger, le sujet ait plus souvent tendance à toucher la régulation du LHS.

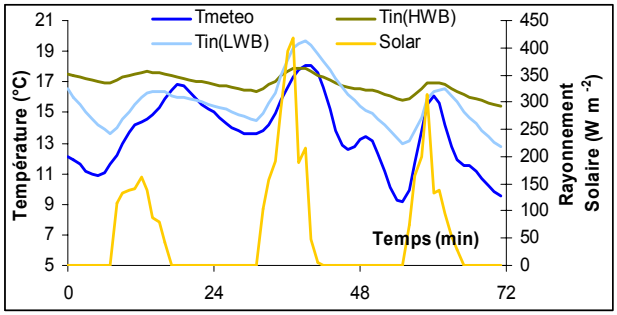


Figure 5.18 : Evolutions des conditions météorologiques pour trois jours en demi-saison

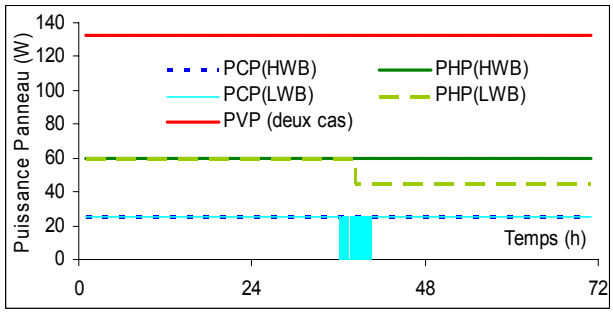


Figure 5.19 : Comportement des puissances des panneaux dans les bâtiments (léger et lourd)

Pour chaque bâtiment, deux simulations ont été effectuées, selon que le LHS n'est pas en fonctionnement (LHS_OFF) ou bien qu'il est présent et le sujet peut le réguler s'il le souhaite (LHS_ON).

L'évolution des sensations est donnée sur la *Figure 5.20* pour le bâtiment lourd et sur la *Figure 5.21* pour le bâtiment léger avec et sans LHS.

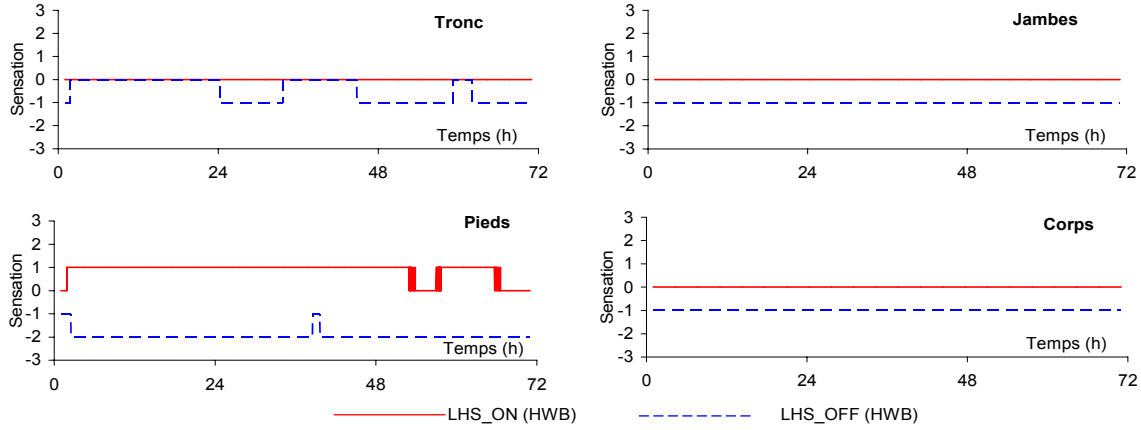


Figure 5.20 : Sensations globale et locales en demi-saison dans le cas du bâtiment lourd (*HWB)*

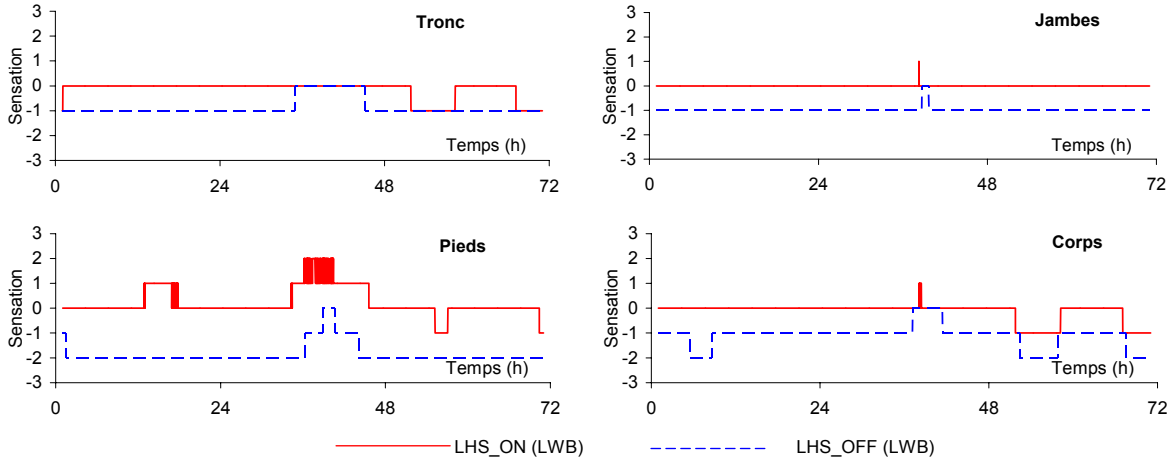


Figure 5.21 : Sensations globale et locales en demi-saison dans le cas du bâtiment léger (*LWB)*

Dans un premier temps, on constate que les sensations sont toujours plus stables dans le HWB. Ceci est lié aux faibles amplitudes de variation de la température ambiante. Dans les deux types de bâtiment, les sensations sont négatives en l'absence de LHS et deviennent positives ou nulles avec la présence du LHS. Les flux radiatifs dans les deux cas sont nettement réduits grâce à

LHS et les ordres de grandeur sont proches de ceux présentés dans la *Section 5.3.2*. Il est clair qu'avec une faible puissance (218 W), on peut rétablir le confort en demi-saison sans recourir au chauffage de la pièce entière.

Dans le bâtiment léger (LWB), on constate que, vers la 30ème heure, la sensation thermique sur les pieds oscille, ce qui a entraîné des hésitations dans la mise en marche du chauffe-pieds et inversement peut-être. Au cours de la troisième journée, l'occupant a un peu froid au niveau global la plupart du temps, car la T_{in} est inférieure à 14°C sauf vers midi où elle est autour de 16°C. Le panneau horizontal n'est pas réaugmenté car la sensation des jambes est neutre et la sensation globale n'est pas suffisamment basse pour qu'il déclenche la mise en route à puissance maximale.

5.4 - Conclusions

Les conclusions de ce chapitre concernent la validité du module de régulation lui-même et les résultats quantitatifs que l'on peut tirer des simulations réalisées.

On a montré qu'un module comme *LBR-Sensation* est un outil facilement intégrable dans le système de simulation pour étudier et améliorer le confort et la consommation énergétique. Les résultats obtenus sont logiques et ils ont été calés sur un certain nombre d'expériences réelles. On peut envisager une régulation plus fine, mais elle doit être compatible avec les temps de réaction des panneaux ou, plus généralement, avec le système LHS utilisé.

Les résultats présentés dans ce chapitre restent préliminaires, mais très intéressants car ils montrent la possibilité et l'intérêt de développer des modèles précis des systèmes de LHS et de leur fonctionnement selon l'inertie du bâtiment. On a noté que l'ensemble 'être humain et LHS' est sensible à l'inertie thermique du bâtiment. Il est indispensable pour le concepteur/designer de prendre cet aspect en compte. Bien évidemment d'autres facteurs comme les valeurs des puissances maximales des panneaux, leur inertie thermique, leur position et tous les aspects techniques et ergonomiques sont autant de paramètres dont il faudrait mesurer l'influence.

En conclusion, il apparaît que, si on donne aux occupants la possibilité de régler deux ou trois panneaux rayonnants proches d'eux, on peut effectivement améliorer leur confort local en demi-saison, sans avoir besoin de chauffer la pièce entière. On peut ajouter aussi le fait que l'occupant n'utilisera le LHS que s'il est présent dans le local ; les économies d'énergie en seront d'autant plus importantes. Dans les simulations avec les conditions internes d'un bâtiment soumis à une météo réelle, on constate que le confort est atteint grâce au LHS qui fonctionne en permanence et consomme donc 5.2 kWh par jour environ. Si on fait l'hypothèse que le LHS est éteint lorsque la personne n'est plus dans son bureau, pour 10 heures de fonctionnement, on aura alors une consommation journalière de 2.1 kWh, ce qui est faible par rapport au coût énergétique du chauffage du bureau entier. Ce système a par ailleurs l'avantage d'être individualisé et donc peut permettre de répondre aux différences inter et intra-individuelles à moindre coût énergétique tout en procurant le confort désiré par chaque personne.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A l'heure actuelle, de plus en plus d'efforts sont faits par les architectes pour que les bâtiments soient conçus en respectant les cibles de la '*Qualité Environnementale des Bâtiments*'. Economies d'énergie et confort optimal sont des objectifs prioritaires. Malheureusement, ils sont souvent antagonistes. La modélisation du comportement des occupants dans leur bâtiment aidera peut être à trouver les solutions optimales dans le futur.

La modélisation de la régulation adaptative présentée dans ce travail est une aide pour évaluer l'impact d'un certain type d'actions sur les consommations énergétiques. En particulier, l'importance du *comportement vestimentaire* relevé pendant les expérimentations sur le terrain est mise en évidence grâce aux modèles numériques. Les outils mis en place dans le système de simulations donnent des résultats encourageants. Il reste encore du travail pour améliorer le régulateur comportemental global, quelques exemples sont donnés dans les perspectives.

Il est certain que *la démarche adaptative* est porteuse d'espoir pour l'avenir. Récemment, les normes d'ASHRAE [Olesen et Brager, 2004] ont été modifiées, en partie pour augmenter les températures de confort pour la saison estivale dans les bâtiments naturellement ventilés. Cette réglementation est applicable lorsque l'occupant peut réagir sur l'ouverture et/ou la fermeture des fenêtres, pour un éventail d'activités de bureau. Cette norme est basée sur les données accumulées dans des campagnes expérimentales pour des climats variés, et l'on peut supposer qu'elle intègre les comportements vestimentaires. En revanche, pour les conditions hivernales, la norme reste inchangée par rapport à celle de 1992. Malgré de nombreuses observations et la confirmation d'économies potentielles d'énergie (indirectement) par le comportement vestimentaire, aucune nouveauté n'a été ajoutée.

Les contraintes sociales, les codes d'habillement peuvent être intégrés et conduire à des règles d'utilisation qui rendront les bâtiments plus économes en énergie. L'éducation des occupants et l'analyse socio-économique des bâtiments pourront désormais s'appuyer sur les résultats des simulations. Une sensibilisation auprès des gens est nécessaire pour intégrer la démarche adaptative au niveau du grand public. Un exemple concret est la campagne '*Cool Biz*' menée par le gouvernement Japonais au cours de l'été 2005. Durant cette campagne, les cadres Japonais ont été encouragés à aller au travail sans leurs cravates, ce qui a fait économiser 70 millions de kWh d'électricité en été !! Encouragé par cette campagne, le Japon envisage d'introduire '*Warm Biz*' qui incitera cette fois les salariés à venir travailler en grosse laine et autres tenues à effet thermique, ce qui permettra de travailler confortablement dans une pièce chauffée à seulement 20°C.

Par ailleurs, on constate une insatisfaction croissante liée aux températures statiques et globale dite « de confort », ainsi qu'une mauvaise gestion des ressources d'énergie, ce qui conduit à créer un intérêt pour développer une régulation de température variable. Pour faire face aux exigences du XXIème siècle, des ingénieurs ont conçu des systèmes de ventilation ou de chauffage personnalisés ou locaux permettant de créer une 'bulle de confort' autour de l'utilisateur. Ils ont pour but de compenser les différences inter-individuelles. Par exemple aux Etats-Unis, il y a une augmentation de la recherche et un marché potentiel pour des produits de chauffage/ventilation local (cf. *Chapitre 1*).

Dans les climats tempérés, un pays comme le Portugal poursuit sa recherche sur les prototypes de système de chauffage local avec l'objectif d'améliorer le confort des occupants en hiver, tout en économisant l'énergie sur le chauffage général du bâtiment. Nos résultats montrent que dans des bâtiments de types différents, on arrive nettement à réduire l'inconfort grâce à ce type de système.

Les perspectives sont divisées en deux parties : les améliorations numériques qui peuvent être envisagées assez rapidement et les perspectives à plus long terme qui demandent une approche pluridisciplinaires.

Améliorations de la modélisation :

- Pour la régulation comportementale globale, nous avons utilisé le PMV qui est simple et reconnu mais ne tient pas compte de certains phénomènes. On pourrait utiliser un modèle plus complexe comme celui de Gagge qui prend en compte la thermorégulation physiologique et également ajouter d'autres variables, comme par exemple, l'ensoleillement du corps humain, etc.
- Pour la régulation comportementale locale nous n'avons pas pu faire le couplage de l'ensemble car les différents modèles (bâtiment, MARCOT, LBR, etc.) devraient avoir des pas de temps différents, hors ceci est impossible dans TRNSYS que nous avons utilisée. Du travail numérique reste à faire pour permettre le couplage réel ce qui permettrait d'évaluer véritablement l'impact de la régulation comportementale du LHS sur le confort et la consommation énergétique de l'ensemble d'un bâtiment.
- Comme nous l'avons signalé à plusieurs reprises, la description de la géométrie est trop grossière, particulièrement celle du corps humain. Pour augmenter la précision du calcul des flux radiatifs, il faudra raffiner la géométrie de l'homme et du LHS, puis éventuellement prendre en compte des contacts éventuels.

Perspectives à long terme :

- Les expériences sur lesquelles nous avons travaillé sont peu nombreuses, il faudrait donc augmenter la base de données pour mieux cerner les effets d'un système de chauffage local. Les aspects techniques et le design, l'inertie du bâtiment, l'exigence des individus, l'aspect ergonomique sont autant de paramètres qui demandent plus de réflexion pour déterminer les conditions optimales de fonctionnement d'un système de chauffage et/ou de rafraîchissement local.
- On s'aperçoit de plus en plus que la perception humaine peut changer en fonction de l'environnement. Il faudrait donc améliorer la concertation entre psychologues, sociologues et thermiciens pour un traitement croisé des données physiologiques, (comme les températures cutanées), des données physique (flux locaux, …) et des données subjectives comme les sensations ou le confort. Il manque encore beaucoup de connaissances dans des environnements complexes et instationnaires comme ceux que nous avons abordés.
- De même il faut améliorer la connaissance de l'influence du passé thermique du sujet et du bâtiment. Les simulations calculent les sensations correspondant aux températures de peau du même pas de temps. La question intéressante soulevée est : est-ce que l'histoire de la thermique d'un bâtiment et celle de son occupant peuvent être un facteur important, peut-on l'utiliser pour économiser l'énergie ?
- Il est important de souligner que les travaux expérimentaux n'ont pas permis d'établir si le jugement sensoriel est influencé par une ambiance froide et quel rôle ceci peut jouer sur les sensations locales. On suppose chez les hommes ce phénomène est faible, par contre peut être chez les femmes c'est plus important. Ce phénomène devrait être approfondi dans le futur et ainsi améliorer la complémentarité des modèles de comportement global (GBR) et local (LBR).

BIBLIOGRAPHIE

Althabégoity, F. 1996. Echanges thermiques de l'homme dans un environnement fortement hétérogène. Cas de la voiture. Thèse en Energétique, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Akimoto, T., J. Matsuda, N. Nishihara, and S. Tanabe. 2004. Impacts of Non-Isothermal Task Conditioning System with Individual. Control on Thermal Comfort and Productivity. Room Vent Conference Proceedings, Coimbra.

Arens, E., C. Huizenga and H. Zhang. 2001. Thermal comfort modelling for the 21st century: breaking out of the comfort chamber. Conference ' Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century', UK.

Arens, E., T. Xu, K. Miura, Z. Hui, M. Fountain and F. Bauman. 1998. A study of occupant cooling by personally controlled air movement. *Energy and Buildings*, **27**, 45-59.

ASHRAE. 1997. ASHRAE Handbook, Fundamentals. Chapter 8: Thermal comfort. American Society of Heating, Refrigeration, Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA 30329.

ASHRAE. 1992. ASHRAE/ANSI Standard 55 (ISSN 1041-2336). Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigeration, Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta.

Auliciems, A. 1981. Towards a psycho-physiological model of thermal perception. *Int. Journal of Biomet.*, **25**(2), 109-122.

Azer, N. Z. and S. Hsu. 1977. The prediction of thermal sensation from a simple model of human physiological response. *ASHRAE Trans.*, **83**, 88-102.

Baker, N. and M. Standeven. 1995. A behavioural approach to thermal comfort assessment in naturally ventilated buildings. Proceedings from CIBSE National Conference, 76-84.

Berglund, L. G. and J. A. J. Stolwijk. 1972. 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, 157-191.

Botsford, J. H. 1971. A wet globe thermometer for environmental heat measurement. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1–10.

Brager, G. S. and R. J. de Dear. 1998. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, **27**, 83-96.

Brüel and Kĵaer. 1990. The Indoor Climate Analyser. TYPE T1213, Instruction Manuel.

Cadiergues, R. 2003. Confort thermique. NF ISO 7730: une norme plus que discutable. *Chauffage, Ventilation et Conditionnement D'Air (CVC) – La revue des climaticiens*, **822**, 31-37.

Candas, V. et C. Herrmann. 1995. Les bases physiologiques de l'inconfort thermique. SFT, France.

Cena, K. and R. J. de Dear. 1999. Field Study of Occupant Comfort and Office Thermal Environments in a Hot Arid Climate. *ASHRAE Trans.*, **105**(II), 204–217.

Chapman, K. S., J. Rutler and R. D. Watson. 2000. Impact of heating systems and wall surface temperatures on room operative temperature fields. *ASHRAE Trans.*, **106**, 506-514.

Chapman, K. S., J. E. Howell and R. D. Watson. 2001. Radiant panel surface temperature over a range of ambient temperatures. *ASHRAE Trans*., **107**.

Danielsson, Ulf. 1993. Convection coefficients in clothing air layers. Doctoral thesis. Department of Energy Technology. Division of Heating and Ventilation. The Royal Institute of Technology, Stockholm.

De Dear, R. J. 2002. http://atmos.es.-mq.edu.au/~rdedear/ashrae_rp884_home.html. Date access: 16 Août, 2002.

De Dear, R. J. and G. S. Brager. 2002. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34, 549-561.

De Dear, R. J. and G. S. Brager. 1998. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Technical Data Bulletin*, **14**(1), 27-49.

De Dear, R. J., E. Arens, and Z. Hui. 1997a. Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments. *Int. Journal of Biomet.*, **40**, 141-156.

De Dear R. J., G. S. Brager, and D. Cooper. 1997b. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report, ASHRAE RP-884.

DeGreef, J. M. and K. S. Chapman. 1998. Simplified Thermal Comfort Evaluation of MRT Gradients and Power Consumption Predicted with the BCAP Methodology. *ASHRAE Trans*., **104**.

Derbel, H. 1990. Modélisation dynamique des transferts de chaleur et l'humidité à travers le vêtement. Couplage avec deux modèles de thermorégulation humaine. Thèse en Energétique, Université Paul Sabatier.

Dounis, A. I. and D. E. Manolakis. 2001. Design of a fuzzy system for living space thermal comfort regulation. *Applied Energy*, **69**, 119-144.

Eftekhari M. M. and L. D. Marjanovic. 2003. Application of fuzzy control in naturally ventilated buildings for summer conditions. *Energy and Buildings*, **35**, 645-655.

Eissing, G. 1995. Climate assessment indices. *Ergonomics*, **38**(1), 47–57.

Fanger, P. O. 1970. Thermal Comfort. McGraw Book Hill Co., USA.

Faulkner, D., W. J. Fisk, D. P. Sullivan and S. M. Lee. 2002. Ventilation efficiencies of a desk-edge mounted task ventilation system. Proceedings of Indoor Air, Monterey, Canada.

Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer. 2003. First principles modelling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE Trans*., **109**(1), 179-186.

Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer. 2001. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int. J. Biometeorol.*, **45**, 143-159.

Fiala, D., K. J. Lomas and M. Stohrer. 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of American Physiological Society*, 1957-1972.

Fontaine, N. 2003. Livre Blanc sur les énergies. Débat national sur les énergies.

Fraisse, G., J. Virgone, et J. J. Roux. 1997. Thermal control of a discontinuously occupied building using a classical and a fuzzy logic approach. *Energy and Buildings*, **26**, 303-316.

Gagge, A. P. and J. A. J. Stolwijk and Y. Nishi. 1995. An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. Ergonomics and Human Factors II, ed. D. Oborne, Galliard (Printers) Ltd, Great Britain.

Gagge, A. P., A. Fobelets and L. G. Berglund. 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans*., **92**(2B), 709-731.

Gagge, A. P. 1973. Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation. Federation Proceedings, 32(5), 1572-1582.

Galeou, M., F. Grivel, et V. Candas. 1989. Le confort thermique: Aspects Physiologiques et Psychosensoriels.

Galeou, M. 1991. La sensation thermique de l'homme dans son habitat: des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Gaspar, A. 2005. *Personal communication*, Jan/Feb 2005.

Gaspar, A. 2004. Contribuiçao Para O Estudo De Ambientes Térmicos Interiores. PhD Thesis, Departamento de Engenharia Mecanica, Faculdade de Ciéncias e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

Gebhart, B. 1961. Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, Inc.

Grivel, F. and Candas, V. 1991. Ambient temperatures preferred by young European males and females at rest. *Ergonomics*, **34**(3), 365-378.

Guan, Y. D., M. H. Hosni and B. W. Jones. 2003a. Investigations of human thermal comfort under highly transient conditions for automobile applications – Part 1: Experimental design and human subject testing implication. *ASHRAE Trans*., **109**(2).

Guan, Y. D., M. H. Hosni, B. W. Jones, and T. P. Geilda. 2003b. Investigations of human thermal comfort under highly transient conditions for automobile applications – Part 2: Thermal sensation modelling. *ASHRAE Trans*., **109**(2), 898-907.

Guillemin, A. and N. Morel. 2002. Experimental results of a self-adaptive integrated control system in buildings: a pilot study. *Solar Energy*, **72**(5), 397-403.

Havenith, G. 2002. The interaction between clothing insulation and thermoregulation. *Exogenous Dermatology*, **1**(5), 221-230.

Havenith, G. 1997. Individual heat stress response. PhD Thesis. TNO Human Factors Research Institute, The Netherlands.

Hensel, H. 1981. Thermoreception and temperature regulation. *Monographs of the Physiological Society*, **38**, Academic Press, London.

Holmér, I. 2003. Manikin History and applications. 5th International Meeting on Thermal Manikin and Modelling (5I3M), Strasbourg, France.

Huizenga, C., H. Zhang and E. Arens. 2001. A model of physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, **36**, 691-699.

Humphreys, M. A. 1978a. Outdoor temperature and comfort indoors. Building research and practice, *Journal CIB*, **6**(2), 92-105.

Humphreys, M. A. 1978b. The influence of season and ambient temperature on human clothing behaviour. Proceedings of first International Indoor Climate, eds P.O. Fanger and O. Valbjørn, 699-713, Copenhagen.

Incropera, F. P. and D. P. DeWitt. 1981. Fundamentals of Heat Transfer. John Wiley and Sons, Inc, USA.

ISO 7726. 1998. Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities. *International Organization for Standardization (ISO)*, Genève, Switzerland.

ISO 7730. 1994. Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort. *ISO*, Genève, Switzerland.

ISO 9886. 1992. Evaluation of thermal strain by physiological measurements. *ISO*, Genève, Switzerland.

ISO 9920. 1995. Ergonomics of the thermal environment – Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothing ensemble. *ISO*, Genève, Switzerland.

Iwashita, G. and H. Akasaka. 1997. The effect of human behaviour on night ventilation rate and indoor air environment in summer – a field study in southern Japan. *Energy and Buildings*, **25**, 195-205.

Jones, B. W., S. Hong and E. A. McCullough. 1998. Detailed projected area data for the human body. *ASHRAE Trans*., **104**(2), 1327-1339.

Kaczmarczyk, J., A. Melikov, Z. Bolashikov, L. Nikolaev and P. O. Fanger. 2004. Thermal sensation and comfort with five different air terminal devices for personalized ventilation. Room Vent 2004, Coimbra.

Kenshalo, D. R. 1990. Correlations of temperature sensation and neural activity: a second approximation. In: Thermoreception and temperature regulation, eds J. Bligh and K. Voigt, Springer, Berlin, 67-88.

Kenshalo, D. R., C. E. Holmes and P. B. Wood. 1968. Warm and Cool thresholds as a function of rate of stimulus temperature change. *Perception and Psychophysics*, **3**, 81-84.

Kerslake, D. McK. 1972. The Stress of Hot Environments. Cambridge University Press.

Kuznetz, L. H. 1979. A two – dimensional transient mathematical model of human thermoregulation. *The American Physiological Society*, **273**(5), R266-R277.

Leduc, G. 2003. Analyse directe et inverse des échanges radiatifs: application à une enceinte habitée. Thèse en Energétique, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Lotens, W. A. 1988. Comparison of thermal predictive models for clothed humans. *ASHRAE Trans*., **94**(1).

Madsen, H. L. 2002. Individually controlled local heating. RoomVent Proceedings.

Mala. 2001. The predicted and measured values of WBGT in Suva. MSc Thesis. The University of the South Pacific, Fiji.

Mairiaux, P. and J. Malchaire. 1995. Comparison and validation of heat stress indices in experimental studies. *Ergonomics*, **38**(1), 58–72.

McCartney, K. J. and J. F. Nicol. 2002. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, **34**, 623-635.

McCartney, K. J. and J. F. Nicol. 2001. Developing an adaptive control algorithm for Europe: Results of the SCATs project. Conference Proceedings of Moving Thermal Comfort Standards into the 21st century, 176-196, Windsor, UK.

McCullough, E. A., B. W. Jones and J. Huck. 1985. A comprehensive data base for estimating clothing insulation. *ASHRAE Trans*., **91**, 29-47.

McIntyre, M. A. 1980. Indoor Climate. Architectural Sciences Series, Applied Sciences Publishers, London.

Melikov, A. K. 2004. Improving comfort and health by personalized ventilation. Proceedings of RoomVent 2004, Coimbra, Portugal.

Melikov, A. K., G. Langkilde, L. W. Rasmussen. 1998. Human Response to Local Heating for Use in Connection with Low Enthalpy Ventilation. RoomVent Proceedings, 2, 315-322.

Meyer, J. P. 1981. 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, Strasbourg.

Monteith, J. L. and M. H. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics. Arnold, London.

Morgan, C. and R. de Dear. 2003. Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate. *Climate Research*, **24**(3), 267 – 284.

Neilen, D. L., M. E. A. Schoffelen and H. L. Schellen. 2004. Thermal performance of a local bench heating system for churches. Proceedings of RoomVent 2004, Coimbra, Portugal.

Nelson, T. M. and T. B. Langness. 1992. Supplemental individual heating in offices: the oasis heating solution. Enhancing industrial performance: Experiences of integrating the human factor, Herman Kragt, London/Washington D. C., 205-232.

Newborough, M and S. D. Probert. 1984. Improving the thermal comfort of sedentary man. *Applied Energy*, **17**, 283-299.

Newsham, G. R. 1997. Clothing as a thermal comfort moderator and the effect on energy consumption. *Energy and Buildings*, **26**, 283-291.

Nicol, F. 2004. *Personal communication*, May/June 2004.

Nicol, F. 2003. MULCOM: http:www.learn.londonmet.ac.uk. Date access: 22 Mars, 2003.

Nicol, J. F. and K. McCartney. 2000. Smart Controls and Thermal Comfort Project. Oxford Brookes University, UK.

Nicol, J. F., I. A. Raja, A. Allaudin and G. N. Jamy. 1999. Climatic variations in comfortable temperatures: the Pakistan projects. *Energy and Buildings*, **30**, 261-279.

Nicol, J. F., and I. A. Raja. 1996. Thermal comfort, Time and Posture. Oxford Brookes University, England.

Niu, J. L., N. P. Gao and H. G. Zuo. 2004. Ventilation Efficiency of Personalized Ventilation: Experimental Study. Room Vent Conference Proceedings, Coimbra.

Oguro, M. 2001. Fundamental study on convective and radiative heat transfer on the human body surface. PhD Thesis, Taisei Corporation, Japan.

Oguro, M., E. Arens, R. De Dear, H. Zhang and T. Katayama. 2002a. Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under calm conditions. *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, **561**, 31-39.

Oguro, M., E. Arens, R. De Dear, H. Zhang and T. Katayama. 2002b. Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under airflow conditions. *J. Archit. Plann. Environ. Eng., AIJ*, **561**, 21-29.

Olesen, B. W. and G. S. Brager. 2004. Standard 55 – 2004. ASHRAE Journal, 20-28.

Parsons, K. C. 1993. *Human Thermal Environments*. Taylor and Francis Ltd, London.

Piniec, S. 1999. Thermique de l'homme dans une voiture: modélisation et expérimentation. Analyse de la métrologie. Thèse de doctorant, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

PT-Teknik. 2004. Thermal Manikin Manuel, Version TM 3.2 / R 110., Denmark.

Quayle, R. and F. Doehring. 1981. Heat Stress: A Comparison of Indices. *Weatherwise*, 120-124.

Quintela, D., A. Gaspar and C. Borges. 2003. Analysis of sensible heat exchanges from a thermal manikin. Fifth International Meeting on Thermal Manikins, Strasbourg, France.

Quintela, D., A. Gaspar and A. Raimundo. 2000. Development of local heating systems for thermal comfort and energy savings in buildings, Proc. International Conference UIE, Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisbonne, Portugal, 209-217.

Raimundo, A. M., A. R. Gaspar and D. A. Quintela. 2004. Analysis of a Local Heating System for Thermal Comfort: the numerical approach. Room Vent 2004, Coimbra.

Ring, J. W., R. J. de Dear and A. Melikov. 1993. Human thermal sensation: Frequency response to sinusoidal stimuli at the surface of the skin. *Energy and Buildings*, **20**(2), 159-165.

Ring, J. W. and R. J. de Dear. 1991. Temperature transients: A model for heat diffusion through skin, thermoreceptor response and thermal sensation. *International Journal of Indoor Air Quality and Climate*, **4**, 448-456.

Rohles, F. 1973. The revised modal comfort envelope. *ASHRAE Trans*., **79**, 52-59.

Rohles, F. and R. Nevins. 1971. The nature of thermal comfort for sedentary man. *ASHRAE Trans*., **77**(1), 240-246.

Rönnlund, M., M. Bohm, O. Norén, I. Holmér and H. Nilsson. 1999. Practical considerations from climatic measurements in cabs in field. CABCLI Consortium (ISSN 1401-4963), Florence, Italy.

RT 2000. Réglementation Thermique. Eds CSTB, France.

Rutman, E. 2003. Notions de Confort. Le contrôle des ambiances intérieures. *Chauffage, Ventilation et Conditionnement D'Air (CVC) – La revue des climaticiens*, **822**, 26-30.

Sari, H. 1999. Manikin needs in sport field. Proceedings of the third international meeting on Thermal Manikin Testing (3IMM), National Institute for Working Life. Sweden.

Schiller, G., E. Arens, F. Bauman, C. Benton, M. Fountain and T. Doherty. 1988. A field study of thermal environments and comfort in office buildings. *ASHRAE Trans*., **94**(2).

Siegel, R. and J. R. Howell. 1992. Thermal Radiation Heat Transfer (3rd Edition). Taylor and Francis, USA.

Sinclair, D. 1973. Psychophysiology of cutaneous sensation. In: The physiology and pathophysiology of the skin. Vol. 2: The nerves and the blood vessels, ed A. Jarrett, Academic Press, London, 429-473.

Sørlie, R., T. B. Langness and S. O. Hanssen. 1993. Maintaining acceptable thermal comfort with a low air temperature, by means of local heating. Proceedings of Indoor Air 93, Helsinki, Finland, 5, 377-382.

Sprague, C. H., R. B. Jai, R. G. Nevins, N. Z. Azer. 1974. The prediction of thermal sensation for man in moderate thermal environments via a simple thermoregulatory model. *ASHRAE Trans*., **80**(1), 130-146.

Stolwijk, J. A. J. and J. D. Hardy. 1966. Temperature Regulation in Man – A Theoretical Study. *Pflügers Archive*, **291**, 129–162.

Stolwijk, J. A. J. 1970. Mathematical Model of Thermoregulation. Physical and Behavioural Temperature Regulation, eds J. D. Hardy, A. P. Gagge and J. A. J. Stolwijk., Springfield, Chapter 48, 703-721.

Stolwijk, J. A. J. and J. D. Hardy. 1971. Control of body temperature. Handbook of physiology – reaction to environmental agents, Chapter 4, 45-68.

Stoops, L. 2001. The physical environment and occupant thermal perceptions in office buildings. An evaluation of sampled data from five European countries. Dept. of Building Services Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

Tanabe, S., C. Narita, Y. Ozeki and M. Konishi. 2000. Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation. *Energy and Buildings*, **30**, 205-215.

Tanabe, S., E. A. Arens, and F. S. Bauman. 1994. Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature. *ASHRAE Trans*., **100**(1), 39-48.

Tanabe, S., K. Kobayashi, J. Nakano, Y. Ozeki and M. Konishi. 2002. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65 MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, **1425**, 1-10.

Thellier, F., G. Leduc, M. Endravadan, A. Gaspar, A. Raimundo, and D. Quintela. 2004. Local radiative heat transfer on a human body. Analyses through Modelling. RoomVent 2004, Coimbra, Portugal.

Thellier, F., F. Althabégoity, and F. Monchoux. 1995. Modelling of radiative exchanges between a car driver and his vehicle. International Conference on Vehicle Comfort and Ergonomics, Bologne, Italy.

Thellier, F. 1989. Modélisation du comportement thermique de l'Homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort. Thèse, Université Paul Sabatier, France.

TRNSYS 2000. A Transient System Simulation Program. Reference Manual (version 15), Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, USA.

Van der Linden, A.C. Boerstra, A. K. Raue, and S. R. Kurvers. 2002. Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, **34**, 737-744.

Werner, J. 1989. Thermoregulatory Models. Recent research, current applications and future developments. *Scand. J. Work Environ. Health*, **15**(1), 34-46.

Werner, J. and P. Webb. 1993. A six cylinder model of human thermoregulation for general use on personal computers. *The Annals of Physiological Anthropology*, **12**(3), 123-134.

Wilkins, J. P. 1995. Adaptive comfort control for conditioned buildings. CIBSE National Conference, 9-16.

Wissler, E. H. 1964. A Mathematical Model of the Human Thermal System. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 26.

Wyon, D. P. 1996. Individual microclimate control: required range, profitable benefits and current feasibility. Proceedings of Indoor Air 96, Nagoya, Japan, 1, 1067-1072.

Xu, X. and J. Werner. 1997. A Dynamic Model of the Human/Clothing/Environment-System. *Appl. Human. Sci*., **16**(2), 61-75.

Xu, X. and J. Werner. 1995. Whole-body (THERMOSIUM) Model. Handbook on Predicting Responses to Cold Exposure, ed. P. Tikuisis; NATO unclassified, AC/243 (Panel 8) TR/20.

Zhang, H. 2003. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. PhD Thesis, University of California, Berkeley.

ANNEXE 1A: Predicted Mean Vote (*Vote Moyen Prévisible* – PMV) Predicted Percentage of Dissatisfied (*Pourcentage Prévisible D'insatisfaits* – PPD)

Les indices PMV et PPD sont à la base de la norme ISO 7730 et ont été établis par Fanger en 1970. Le PMV est basé sur un calcul de bilan thermique simplifié (S) du corps humain et ramène cette valeur à un indice de confort sur une échelle de -3 très froid à +3, très chaud. Il fait intervenir les quatre variables de l'ambiance (T_a, T_{mrt}, P_a, v_a) et les deux paramètre du sujet (M, I_{cl}). Le PPD est calculé à partir du PMV par une relation empirique.

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

$$PPD = 100 - 95\ exp\text{-}(0.03353.PMV^4 + 0.2179PMV^2)$$

Il faut noter que le PPD n'est jamais inférieur à 5 %.

D'après les normes les conditions de confort optimal sont atteintes si moins de 10 % de personnes sont insatisfaites ce qui correspond à un PMV compris entre -0.5 et 0.5

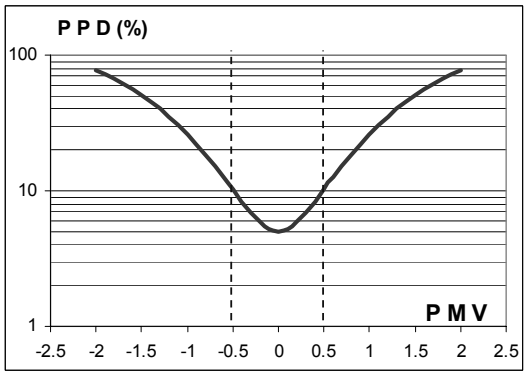


Figure 1A.1: Relation entre le PMV et le PPD (d'après ISO 7730).

Expressions	commentaires
$A = 0.303\exp(-0.036M) + 0.0275$	Coefficient empirique issue des expériences
$R_{esp} = 0.0014M(34 - T_a) + 1.72*10^{-5}M(5867 - P_a)$	Transferts secs et latents par la respiration
$E_{vap} = 3.05*10^{-3}(P_s - P_a) + 0.42(M - W - 58)$	Evaporation cutanée en condition de confort (relation semi empirique)
$R = F_{eff}f_{cl}\varepsilon\sigma(T_{cl}^4 - T_{mrt}^4)$ $C = h_c f_{cl}(T_{cl} - T_a)$	Transferts par rayonnement et convection à la surface des vêtements.
$T_{cl} = T_{sk} - 0.155I_{cl}(R + C)$	Température à la surface des vêtements
$T_{sk} = 35.7 - 0.028(M - W)$	Température cutanée en condition de confort
$h_c = 2.4(T_{cl} - T_a)^{0.25}$ si v < 0.1 m/s $h_c = 12.1\sqrt{v}$ si v > 0.1 m/s	Coefficient de transfert par convection
$f_{cl} = 1 + 0.2I_{cl}$ *si* $I_{cl} \leq 0.5\ clo$ $= 1.05 + 0.1I_{cl}$ *si* $I_{cl} > 0.5\ clo$	Facteur d'augmentation de surface lié aux vêtements

Ces deux indices sont conçus pour des conditions homogènes, proches de la neutralité et en régime permanent, et se limitent donc à cette utilisation.

Enfin, il faut noter que des études sur le terrain pour les bâtiments naturellement ventilé montrent que les valeurs de confort mesurées ne sont pas consistantes avec des valeurs calculées par l'équation de Fanger. Il y a d'ailleurs, plusieurs débats sur ce thème [De Dear et al 1997b ; Nicol 2003 ; Cadiergues 2003]. On a utilisé l'équation de Fanger donc peut être les résultats ne sont pas réalistes comme dans une situation réel. Notre but n'est pas de corriger le PMV; nous cherchons plutôt à tirer quelques informations utiles à partir des outils disponibles.

ANNEXE 1B: MARCOT - Modèle de comportement thermique de l'homme

Le modèle MARCOT (*Modèle d'Analyse et de Recherche des Conditions Optimales en Thermique*) a été réalisé au laboratoire PHASE. Son objectif est d'avoir un outil d'évaluation des enceintes habitées en termes d'effets sur le corps humain. Il permet le calcul de l'état thermique local du corps humain soumis à une ambiance thermique hétérogène complexe en conditions instationnaires [Thellier 1989]. Le cœur du modèle de thermorégulation humaine est basé sur le modèle de Stolwijk [Stolwijk 1970 ; Parsons 1993 ; Werner et Webb 1993]. Tous les transferts de chaleur et de masse au niveau cutané sont calculés avec précision et un modèle d'interpréteur permet la détermination des sensations thermiques locales. L'ensemble est intégré dans la simulation thermique des enceintes, c'est ce qui fait l'originalité de MARCOT et l'élargissement de son champ d'application, il peut être utilisé dans tout type d'ambiance thermique hétérogène et instationnaires: habitat, transports [Althabégoïty 1996], locaux industriels…

Le domaine d'application de MARCOT est essentiellement l'habitat, pour lequel il a été conçu. Le modèle numérique fonction sous l'environnement du logiciel TRNSYS (Transient System Simulation). Toutes les variables physiques de l'environnement sont calculées par des modules existants dans la bibliothèque de TRNSYS. On peut représenter le schéma général de connexion comme le montre la Figure 1B.1.

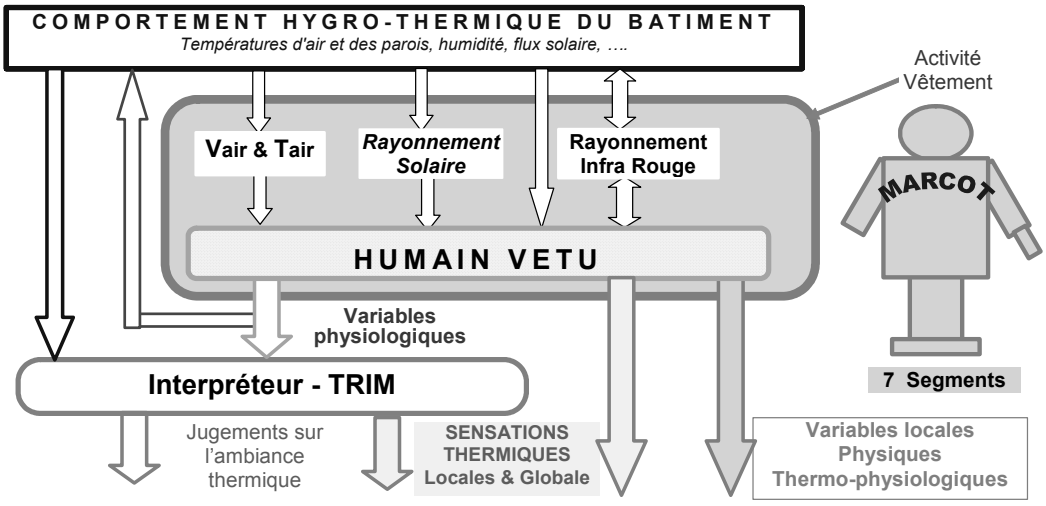


Figure 1B.1: Schéma général de connexion des composants dans TRNSYS.

Le Modèle MARCOT peut également être utilisé avec le modèle de sensation 'TRIM' [Galéou 1991] qui donne de nombreux renseignements sur la perception qu'à l'individu de son environnement thermique. Dans cette étude nous n'avons pas utilisé le module TRIM, mais les sensations thermiques sont calculées par des expressions simplifiées issues de ce modèle.

L'être humain est modélisé (Fig. 1B.2) par deux sous systèmes (cf. *Chapitre 1*):

• Système contrôlé ou régulé: c'est un système passif qui a les caractéristiques physiques et physiologiques réelles du corps humain (Tableau 1B.1). Il met en jeu uniquement les transferts de masse et de chaleur internes au corps et avec le milieu extérieur. Le corps est divisé en 29 compartiments ou nœuds isothermes. Il y a 7 segments divisés en 4 couches concentriques selon une représentation sphérique pour la tête et cylindriques pour les autres segments. Le 29ème compartiment, représenté par le sang est le seul "lien thermique" entre les segments.

	Tête	Tronc	Bras Droit	Bras Gauche	Mains	Jambes	Pieds
No. segment	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Poids %	5.40	51.70	4.75	4.75	0.90	27.80	1.30
Surface %	7.00	36.02	6.71	6.71	5.00	31.70	6.57
Surface m^2	0.132	0.681	0.127	0.127	0.095	0.599	0.124

Tableau 1B.1: Numéro, poids et surfaces relatifs et aires de chaque segment.

• Système de contrôle ou de régulation: c'est la partie active du système qui collecte et gère les informations sur l'état thermique du corps humain, il commande les réactions physiologiques nécessaires au maintien de l'homéothermie et les répartit sur le système contrôlé.

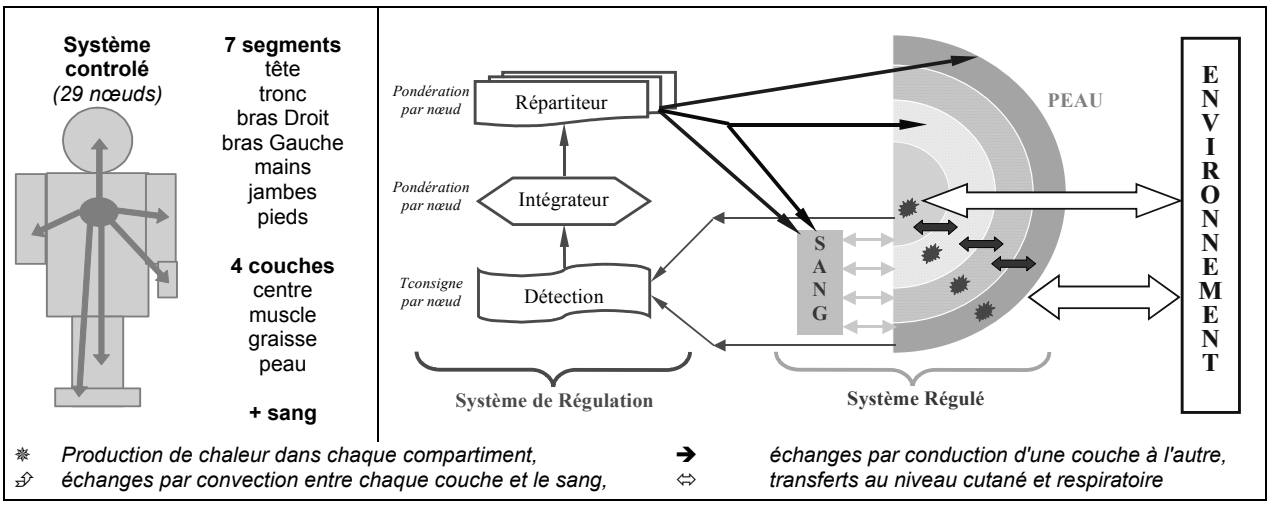


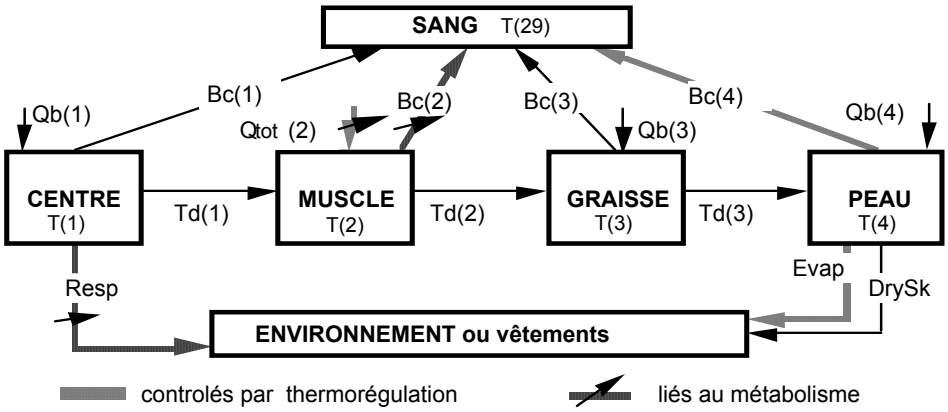
Figure 1B.2: Composition du corps humain dans le modèle de thermo-physiologie.

PRINCIPALES HYPOTHESES

- L'individu est un homme "standard" en bonne santé: Taille: 1.75 m; Masse: 74 Kg; Surface corporelle: 1.89 m²
- Les vêtements ne sont pas imperméables.
- Chaque couche est à température homogène. Pas de transfert dans le sens longitudinal.
- Les transferts par conduction entre les segments sont négligés.
- Les membres sont regroupés; jambes, mains et pieds.
- Le métabolisme basal est réparti dans toutes les couches. Le métabolisme d'activité et de frisson n'a lieu que dans les muscles.
- Le débit sanguin est constant au centre et dans la graisse.
- Les pertes respiratoires sont prises en compte dans la couche centrale de la tête et du tronc

BILAN THERMIQUE DE CHAQUE COUCHE

Pour chaque segment le bilan thermique est calculé, couche par couche, en tenant compte de la production de chaleur locale et de tous les échanges avec les autres couches ou avec le milieu extérieur. Certains transferts peuvent être modifiés par le système de régulation (Fig. 1B.3).



1B.3: Schématisation des échanges de chaleur dans un segment.

On peut écrire le bilan thermique de chaque compartiment : $\frac{dT(n)}{dt} = \frac{HF(n)}{C(n)}$

Centre	HF(1) = Q(1) - BC(1) - TD(1) - RESP(1)
Muscle	HF(2) = Q(2) - BC(2) + TD(1) - TD(2)
Graisse	HF(3) = Q(3) - BC(3) + TD(2) - TD(3)
Peau	HF(4) = Q(4) - BC(4) + TD(3) - DRYSK(i) + EVAPSK(i)

compartiment sanguin: $HF(29) = \sum_{n=1}^{28} Bc(n)$

HF - bilan thermique de chaque compartiment,
TD – pas de temps de calcul et
C(n) - capacité thermique du compartiment n.

La température de la couche cutanée représente la température de surface de la peau du segment. La température cutanée moyenne du corps est en fonction des températures cutanées locales par la relation suivante:

$Tsk = \frac{\sum Tsk(i) \times C(i)}{Csk}$ avec $Csk = \sum C(i)$ capacité thermique totale de la peau

La production de chaleur ou métabolisme (Q) est composée de trois parties: Q = Qb + Qa + Qsh

• Le métabolisme basal (Qb) est réparti dans toutes les couches.
• Le métabolisme lié à d'activité (Qa) et aux frissons (Qsh) n'est réparti que dans les muscles en fonction de coefficients qui dépendent entre autre de la masse musculaire et de coefficients définis par le système de régulation.

Les transferts de chaleur du noyau vers la surface sont de deux sortes:
• La convection sanguine (Bc) est régie par les mécanismes de thermorégulation (vasomotricité).

$$Bc(n) = BF(n) * Cb * [T(n)-T(29)] * (1-BPH)$$

BF: le débit sanguin est constant dans le centre et la graisse, il est régulé dans les muscles et la peau.
BPH: coefficient tenant compte de l'effet d'échangeur contre courant entre veines et artères.

• La conduction tissulaire (Td) se fait de manière radiale d'une couche à l'autre et dépend de l'épaisseur des couches et de leur conductivité thermique.

$$Td(k) = Tc(k) * [T(k)-T(k+1)]$$

Les transferts de chaleur entre le corps et le milieu ambiant se font au niveau cutané par chaleur sensible Drysk (conduction, convection, rayonnement) et par évaporation Evap. L'évaporation et la convection existent également au niveau des voies respiratoires.

Les échanges respiratoires sont pris en compte uniquement dans la couche centrale de la tête et du tronc

Resp = Cresp + Eresp avec Cresp = a.Qtot.(Texp - Ta) Eresp = b.Qtot ($Psat_{(Texp)}$- Pa)
Texp: Température de l'air expiré a et b sont des constantes

Les échanges au niveau de la peau peuvent être totalement différents selon les configurations qui sont :
- La surface corporelle est nue et directement en contact avec l'ambiance
- La surface est protégée de l'ambiance par un vêtement,
- La surface est en contact avec des objets tels que le sol, siège, lit, ….

Dans l'habitat on considère qu'en général les personnes restent suffisamment longtemps en contact avec un solide pour que l'équilibre thermique soit atteint, on défini alors un pourcentage de surface en contact sur laquelle le flux est nul. On peut également prendre en compte l'isolation, dû à une chaise par exemple, en augmentant la résistance thermique des vêtements localement. Pour des situations plus complexes (véhicule, …) un modèle de transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux a été développé au laboratoire, mais n'a pas été utilisé dans cette étude.

Les échanges thermiques sur la peau nue s'effectuent avec le milieu extérieur par convection, rayonnement et évaporation (Fig. 1B.4).

Les Transferts de chaleur par convection au niveau de la peau d'un segment s'écrivent : $Conv_{sk}(i) = hc(i).S(i).[Tsk(i) - Ta(i)]$

hc le coefficient d'échange est de la forme $hc = (a+b.Va^2)^{(1/3)}$
Les paramètres a et b sont différents pour chaque segment.

Les Transferts de chaleur par rayonnement dépendent beaucoup de l'environnement par conséquent, les flux échangés dans le domaine de l'infra-rouge ou les flux solaires reçus sont calculés respectivement à l'aide de deux modules développés au laboratoire.

Le module Rayonnement Solaire calcule les flux solaires reçus par l'individu en fonction de sa position dans le local, de toutes les données géométriques, de la course du soleil et des données météorologiques. *Dans ce travail nous n'avons pas considéré cette possibilité.*

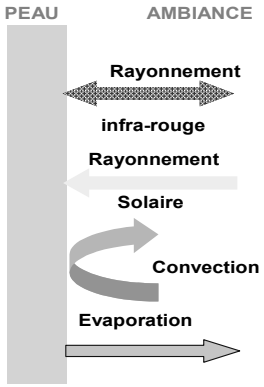


Figure 1B.4: Les échanges thermique sur la peau.

Le module Rayonnement Infrarouge calcule les flux nets à partir des températures des surfaces de l'enceinte et de l'homme. Les facteurs de forme sont calculés à partir d'une géométrie représentant l'ensemble du système (Habitat, système de chauffage, homme). La méthode de calcul est basée sur les puissances nettes échangées et elle est détaillée dans le *Chapitre 4.*

Les pertes de chaleur par évaporation sont en grande partie déterminées par le système de thermorégulation. Ces échanges ne sont jamais nuls, mais ils sont compris entre:

- Une valeur maximale appelée pouvoir évaporatoire maximum (Emax) qui correspond au flux de chaleur latente maximum pouvant être évacué dans l'ambiance dans le cas où la peau est totalement mouillée.

$$Emax(i) = he.S(i).[Psk(i) - Pa(i)]$$

Le coefficient d'évaporation (he) est lié au coefficient de transfert convectif (hc) par la relation de Lewis.

- Une valeur minimale qui correspond à la perspiration insensible ou évaporation diffuse (Ediff) est due à diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées. Elle n'a lieu que sur les surfaces de la peau non mouillées.

$$\text{Ediff(i)} = [1 - \omega(\text{i})].\,0.06.\text{Emax(i)}$$

En définissant la mouillure cutanée ω comme la fraction de peau mouillée, on peut alors écrire que la chaleur latente évacuée à la surface de la peau (Evap) est la somme de l'évaporation diffuse (Ediff) et de l'évaporation de la sueur (Esw): Evap(i) = Ediff(i) + Esw(i)

Avec Esw(i) = $\omega(\text{i})$. Emax (i) évaporation de la sueur sur la fraction de peau mouillée. La mouillure cutanée ω est calculée par la comparaison entre la quantité d'eau maximum pouvant se trouver sur la peau et la quantité d'eau se trouvant sur la peau à un instant donné. La quantité d'eau produite est déterminée par le système de régulation.

Les Transferts à travers les vêtements Lorsque la peau est recouverte d'un vêtement, les transferts se compliquent. Le rôle essentiel des vêtements est de modifier les échanges entre la surface cutanée et le milieu environnant en créant un microclimat sous vestimentaire. Notre objectif ici n'est pas de donner une description fine du modèle de vêtement [Derbel 1990, Althabégoïty 1996]. Le vêtement est représenté par 2 couches. La première couche correspond à une couche d'air et la deuxième à l'ensemble des tissus constituant le vêtement. Tous les transferts représentés sur la Figure 1B.5 sont pris en compte. Les échanges au niveau cutané sont alors liés aux conditions dans la couche d'air sous- vestimentaire auquel s'ajoute le flux radiatif passant à travers le tissu. Le bilan thermique de chaque couche (air et tissu) est calculé en tenant compte de tous ces échanges. Il peut y avoir couplage entre les transferts de masse et de chaleur lorsque le tissu absorbe et désorbe de l'eau.

- Les échanges sous vestimentaire: ce terme regroupe en fait les trois modes d'échange (convection, conduction, rayonnement) dans la lame d'air située entre la peau et la surface interne du tissu. La convection interne sous vestimentaire est la plus difficile à calculer, car elle dépend de la température de l'air, de la peau et du tissu mais surtout du débit d'air qui circule. Ce débit dépend des ouvertures du vêtement, de sa perméabilité, de la vitesse d'air à la surface et de l'activité du sujet (effet de pompage dû aux mouvements).
- La Conduction à travers le tissu dépend essentiellement de la nature du vêtement et des propriétés du tissu.
- La Convection et le Rayonnement à la surface du vêtement s'effectuent sur une surface S(i)*fcl(i) de vêtement à température Tcl(i). Le facteur (fcl) d'accroissement de surface d'échange dû aux vêtements, dépend du type de vêtement (épaisseur du tissu, coupe,...). Les équations de calcul des transferts en surface sont les mêmes que dans le cas de la peau nue.

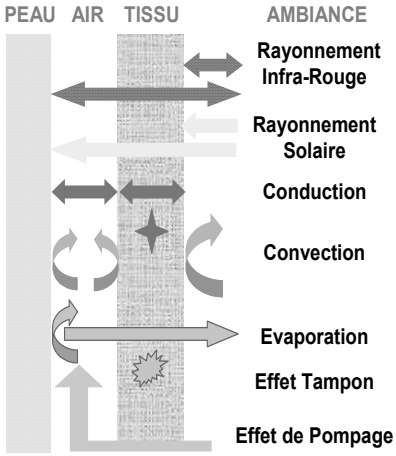


Figure 1B.5 : Les échanges travers les vêtements.

- Les Transferts de chaleur par évaporation sont calculés avec les mêmes expressions que pour la peau nue, mais la pression de vapeur de l'environnement est alors celle de la couche d'air sous vestimentaire. Les transferts d'eau liquide directement à la surface de la peau ou la condensation ne sont pas pris en compte.

***Remarque** : Pour ce modèle de vêtements un très grand nombre de paramètres sont nécessaires pour décrire les propriétés thermo-physiques locales de chaque pièce constituant le vêtement. Ce modèle a été validé pour seulement quelques tenues vestimentaires pour lesquelles nous avons toutes les propriétés. Pour ces raisons nous n'avons pas envisagé de régulation comportementale locale sur la tenue vestimentaire.*

SYSTEME DE CONTROLE

Le système de thermorégulation du corps humain est très complexe et donc difficile à modéliser. Les physiologistes l'ont représenté par un système à rétroaction. Il détermine les réactions physiologiques internes du corps et commande le débit d'eau suée, l'augmentation de production de chaleur due aux frissons et le débit sanguin cutané. Les équations qui représentent le système de contrôle ne sont pas linéaires, il est donc impossible, sans le modèle, d'en prévoir les effets. Il peut être décomposé en trois parties comme décrit au *Chapitre 1*:

(1) La première correspond aux thermorécepteurs qui détectent l'état thermique du système contrôlé. Par comparaison entre la température des compartiments et leur température de consigne respective (Tset). Un signal donne une information de "chaud" ou de "froid".

ERROR (n)=T(n)-Tset(n)

si ERROR(n)>0 alors WARM(n)=T(n)-Tset(n)
si ERROR(n)<0 alors COLD(n)=Tset(n)-T(n)

(2) l'intégrateur détermine l'amplitude des commandes à partir des informations données par les thermorécepteurs.

Signaux cutanés	WARMSK= Σ WARM(i)*SKR(i)	COLDSK=Σ COLD(i)*SKR(i)
Signal central	ER1=WARM(1)-COLD(1)	
Signal produit	ERP=WARM(1)*WARMSK - COLD(1)*COLDSK	

(3) La répartition des commandes est envoyée dans le système contrôlé et permet de réguler : la sudation, les frissons, et la vasomotricité.

- Sudation SWEA=CSWEA*ER1+SSWEA*ERSK+PSWEA*ERP
- Vasomotricité BF(i)=((BFB(i)+SKV(i)*DILA)/(1.0+SKC(i)*STRI))

Vasodilatation : DILA=CDILA*ER1+SDILA*ERSK+PDILA*ERP
Vasoconstriction: STRI=-CSTRI*ER1-SSTRI*ERSK-PSTRI*ERP
- Frissons CHIL=-CCHIL*ER1-SCHIL*ERSK-PCHIL*ERP
production de chaleur dans les couches musculaires Qsh(i) = CHILI(i)*CHIL

SENSATIONS THERMIQUES LOCALES

Les sensations sont exprimées sur l'échelle ASHRAE en 7 points:

-3 très froid	-2 froid	-1 légèrement froid	0 neutre
3 très chaud	2 chaud	1 légèrement chaud	

Deux possibilités sont envisageables :
- Soit les sensations sont calculées dans MARCOT.
- Soit on peut utiliser le module TRIM qui donne plus d'informations sur le climat.

***Calcul interne à MARCOT des sensations*,** trois modes de calcul sont possibles :

(1) - la sensation locale sur un segment i et la température cutanée sont reliées par une relation polynomiale

$$Sens_{(i)} = a0_{(i)} + a1_{(i)}.Tsk_{(i)} + a2_{(i)}.Tsk_{(i)}^2 + a3_{(i)}.Tsk_{(i)}^3$$

Les coefficients a sont différents pour chaque segment
La sensation est alors une fonction continue, ce qui ne représente pas forcément la réalité mais permet une évaluation assez fine.

(2) - les sensations locales sont déterminées à partir d'un tableau de correspondance (Température cutanée/Sensation) issue du modèle TRIM (cf. *Annexe 1C*)

(3) - Des jugements thermo-sensoriels locaux sont calculés à partir de "températures de sensation" qui prennent en compte la température cutanée locale et la température de l'air inspiré. Le jugement peut également être modifié éventuellement en fonction de l'ensoleillement [Piniec 1999]. Cette relation est valable uniquement dans des conditions très particulières correspondant aux véhicules.

Remarque: Dans cette étude nous avons opté pour utiliser la première possibilité, c'est à dire le calcul simplifié interne à MARCOT et avec le mode de calcul (2) qui donne des résultats sur la même échelle que celle utilisé dans les expériences.

LES SORTIES du modèle sont: toutes les grandeurs thermo-physiologiques et physiques accessibles. Les principales sorties sont :

T_{sk}, $T_{skl(i)}$	Températures cutanées moyenne et locales des 7 segments (°C)
T_{clo}, $T_{cl(i)}$	Températures moyenne de surface des vêtements et locales des 7 segments (°C)
w, w(i)	Mouillure moyenne cutanée et locales des 7 segments
Sens, Sens(i)	Sensation thermique globale et les 7 segments
C_{onv}, R_{ay}, D_{ry}	Echanges de chaleur totale par convection, rayonnement et sec (W)
Evap	Perte de chaleur par évaporation (W)

Remarque: Les flux de chaleur échangés au niveau de la peau (Conv, Evap, Ray, Dry) sont négatifs s'ils sont perdus et positifs s'ils sont gagnés.

ANNEXE 1C: TRIM - Modèle de Sensations Thermiques Locales

Nous ne décrivons ici en détail que la partie du modèle TRIM *"TRI des variables de Marcot"* [Galéou 1991] que nous avons utilisé.

Dans la version complète le modèle donne des indications (Fig. 1C.1) sur:
- Les jugements thermo-sensoriels locaux qui dépendent de la température de peau et/ou de la mouillure.
- Les interactions, c'est à dire que dans les cas d'ambiances particulièrement hétérogènes, il peut y avoir 5 types d'interactions, par exemple, une température opérative nettement basse (noté "air froid") modifie les sensations thermiques sur les extrémités.
- Un jugement sur le climat en général en fonction de la température opérative.
- L'évaluation des risques d'inconfort liés: aux asymétries de rayonnement, au courant d'air et au sol chaud ou froid.

Toutes ces évaluations de la qualité de l'ambiance sont différentes selon les cas. Il a été défini quatre cas correspondant à deux niveaux d'activité et deux niveaux de vêtements.

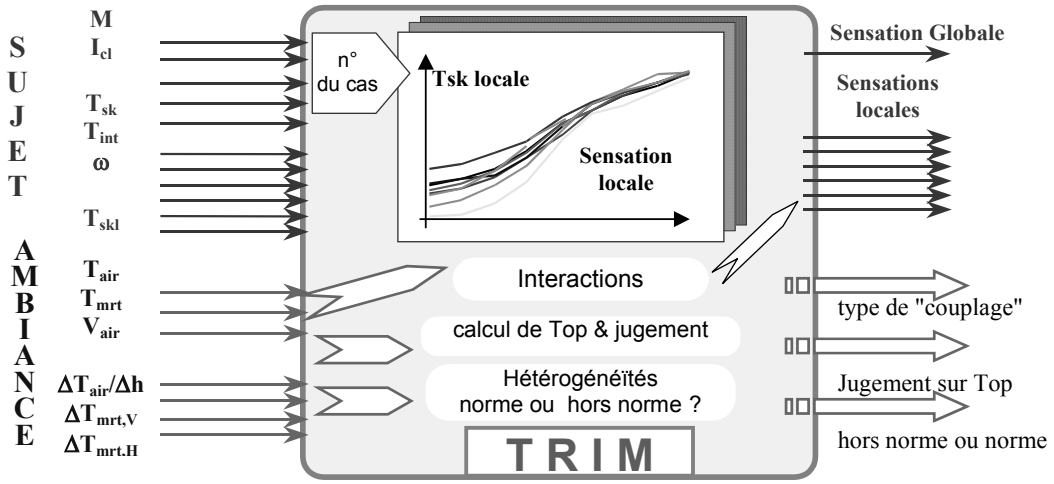


Figure 1C.1: Schéma de principe de TRIM.

L'hypothèse de base est que les sensations thermiques locales dépendent directement des températures cutanées locales de même pour la sensation globale. A chaque plage de température correspond une sensation. Cette relation n'est pas linéaire et elle est différente selon les cas. Les limites sont données dans le Tableau 1C.1 uniquement pour les deux cas que nous avons utilisé dans cette étude, c'est à dire pour les activités faibles. La Figure1C.2 donne un exemple graphique de cette relation et le polynôme qui est utilisé dans le calcul simplifié en mode (1) dans MARCOT.

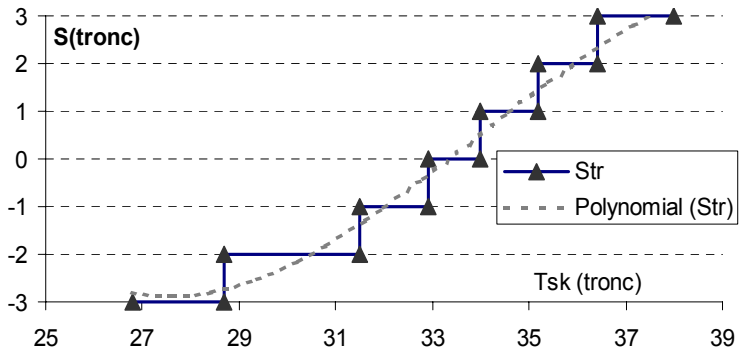


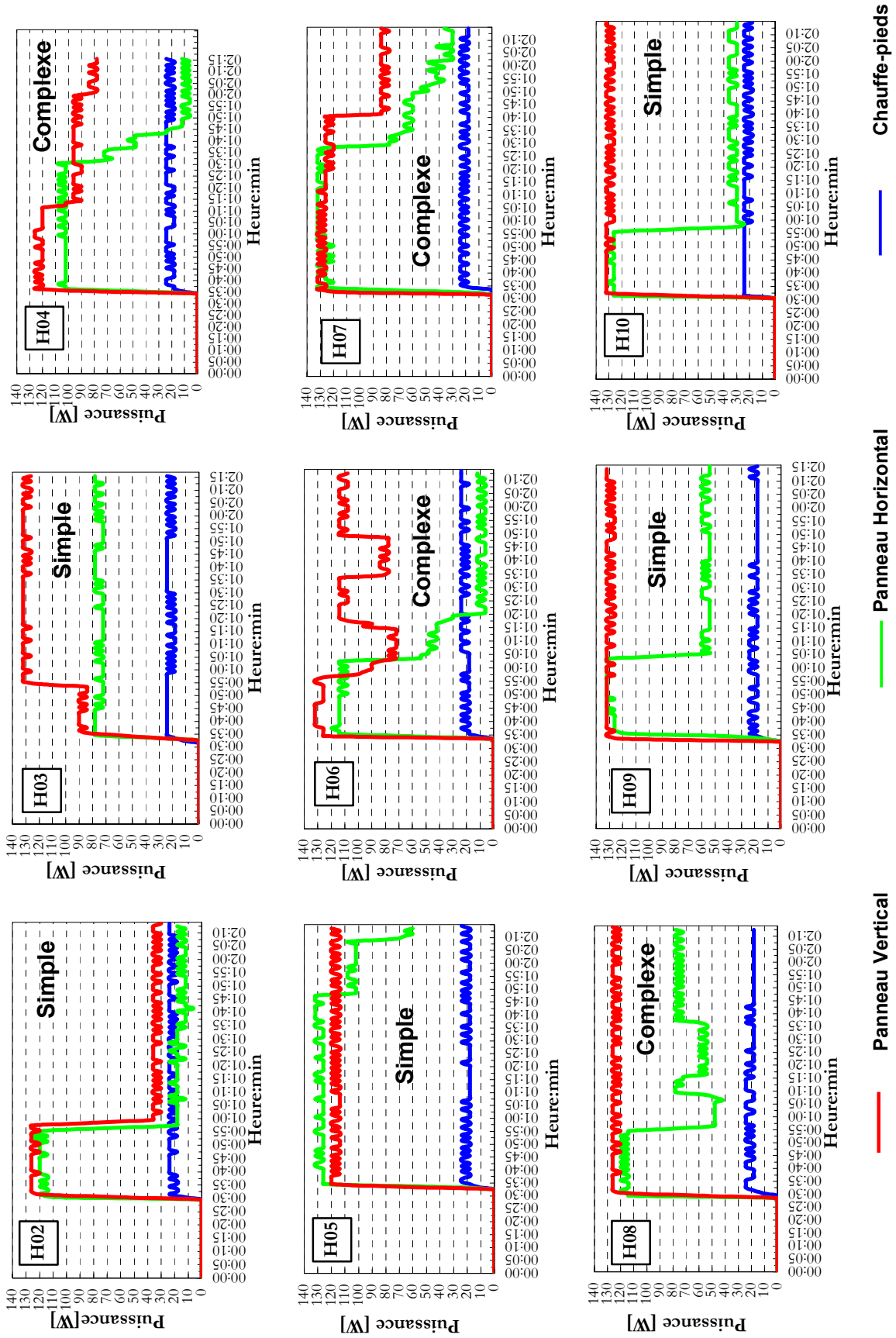
Figure 1C.2: Exemple de correspondance (Température-Sensation) pour le tronc.

Dans le Tableau 1C.1 les lignes notées "Air_fr" ou "Air_ch" correspondent aux limites dans le cas où il y a des interactions. Si l'air est froid, Tair < 18°C, les plages de températures sont alors décalées pour la tête, les mains et les pieds, on utilise alors les limites notées "Air_fr" pour ces trois segments. De même en condition chaude Tair > 40°C on utilise les limites "Air_ch."

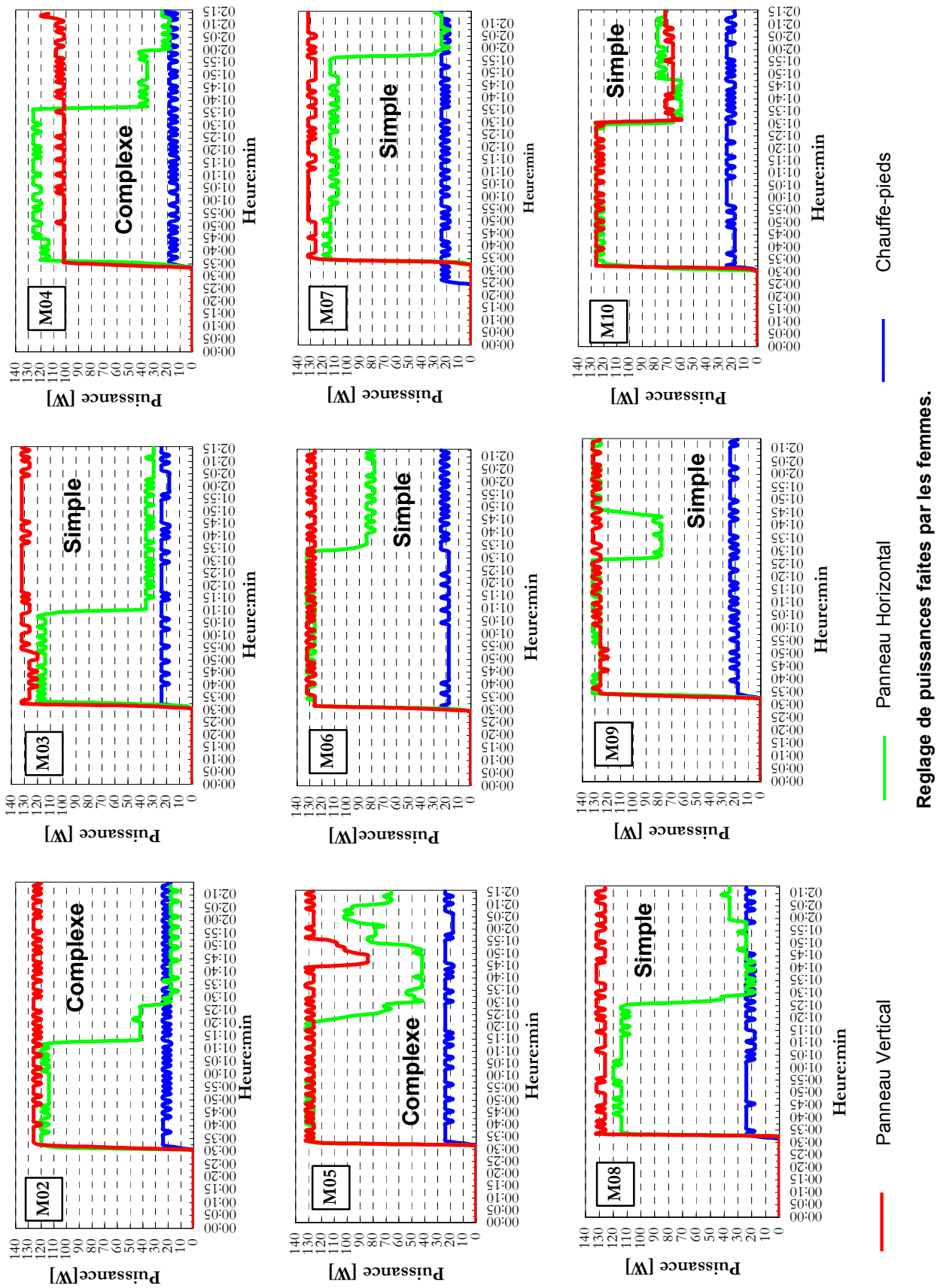
Repos: métabolisme ≤ 120 W/m²															
		TF -3		F -2		LF -1		N 0		LC 1		C 2		TC 3	
Tsk	***24.8***		**29.8**		**31.6**		**32.9**		**34.2**		**34.6**		**35.4**		**37.6**
Ttête	**28.7**		**29.0**		**31.2**		**32.9**		**34.9**		**36.4**		**38.4**		**41.0**
Tte _ Air Fr			22.3		28.4		31.8		33.9		36.0				
Tte _Air Ch			29.0		32.3		33.7		35.1		36.2		38.4		
Ttronc	***26.8***		**28.7**		**31.5**		**32.9**		**34.0**		**35.2**		**36.4**		**38.0**
Tbras	***21.5***		**27.3**		**29.4**		**31.8**		**33.9**		**35.1**		**37.1**		**39.1**
Tmains	***15.9***		**23.4**		**26.0**		**30.5**		**33.9**		**36.6**		**40.3**		**42.7**
Tma _ Air Fr					24.0		25.5		27.5		33.2		34.2		
Tma _Air Ch			26.0		28.6		32.2		35.2		37.4				
Tjambes	***24.3***		**27.2**		**29.3**		**32.3**		**33.5**		**34.8**		**36.8**		**38.8**
Tpieds	***16.3***		**21.1**		**24.8**		**29.3**		**31.8**		**33.5**		**36.5**		**38.6**
Tpi _Air Fr					24.8		27.5		29.5		34.1		37.5		
Tpi _Air Ch					24.0		27.5		30.3		33.4		35.7		
Repos: métabolisme < 120 W/m²															
		TF -3		F -2		LF -1		N 0		LC 1		C 2		TC 3	
Tsk	***24.8***		**30.1**		**31.7**		**33.1**		**34.3**		**34.7**		**35.7**		**37.0**
Ttête	**28.7**		**31.9**		**32.1**		**34.1**		**34.7**		**35.5**		**37.4**		**39.0**
Ttronc	***27.8***		**30.4**		**32.4**		**33.4**		**34.0**		**34.7**		**36.7**		**38.1**
Tbras	***21.5***		**27.3**		**29.8**		**32.4**		**33.3**		**34.7**		**36.6**		**38.0**
Tmains	***15.9***		**27.7**		**29.0**		**32.0**		**33.6**		**34.8**		**40.0**		**42.7**
Tjambes	***26.3***		**29.2**		**30.9**		**32.2**		**33.0**		**34.1**		**34.9**		**38.8**
Tpieds	***20.0***		**23.4**		**28.7**		**31.4**		**33.3**		**34.3**		**35.0**		**38.6**

Tableau 1C.1: Plages des sensations de TRIM [Galéou 1991] pour les cas d'activité faible.

ANNEXE 3A: Comportements sur les panneaux

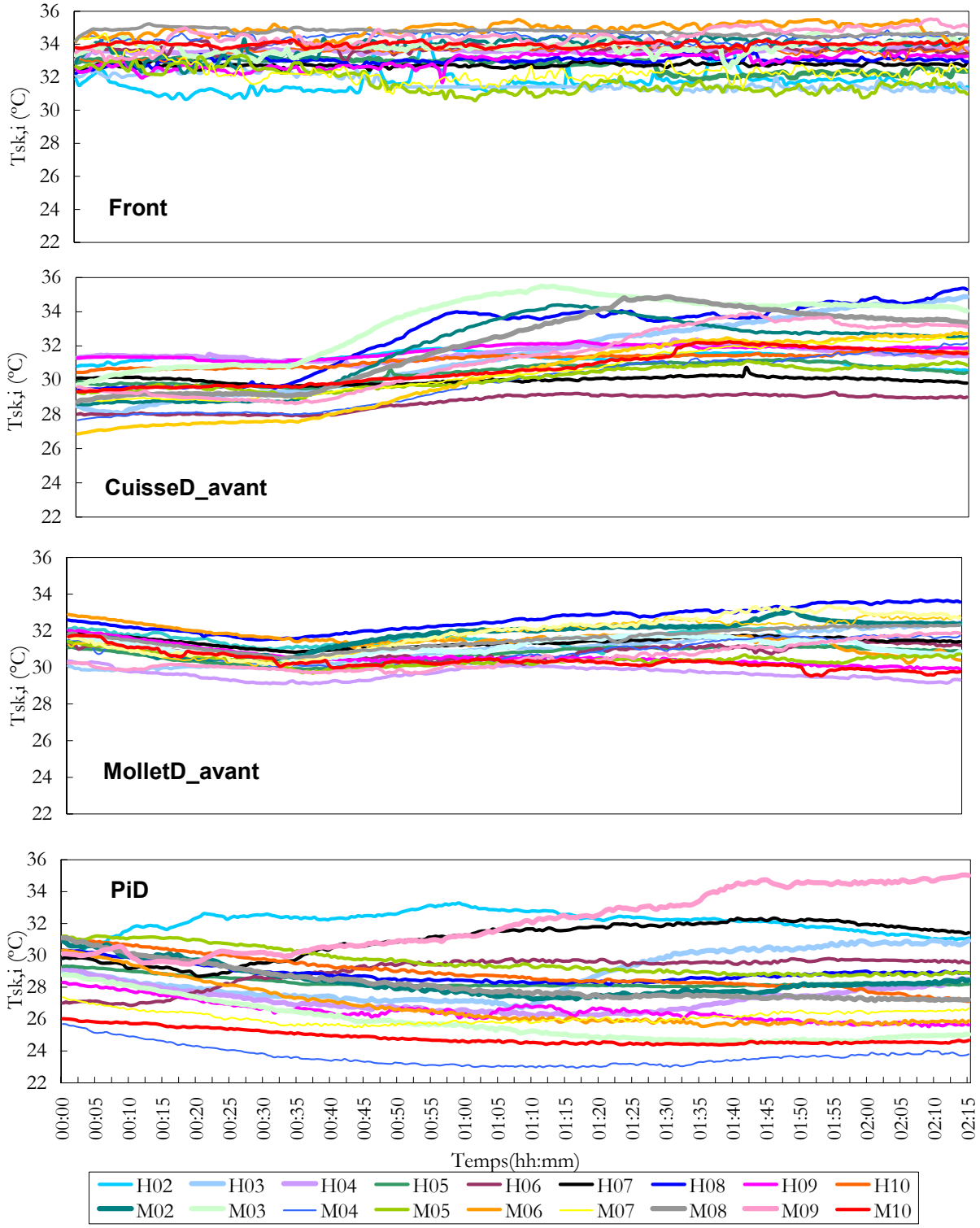


Reglage de puissances faites par les hommes.



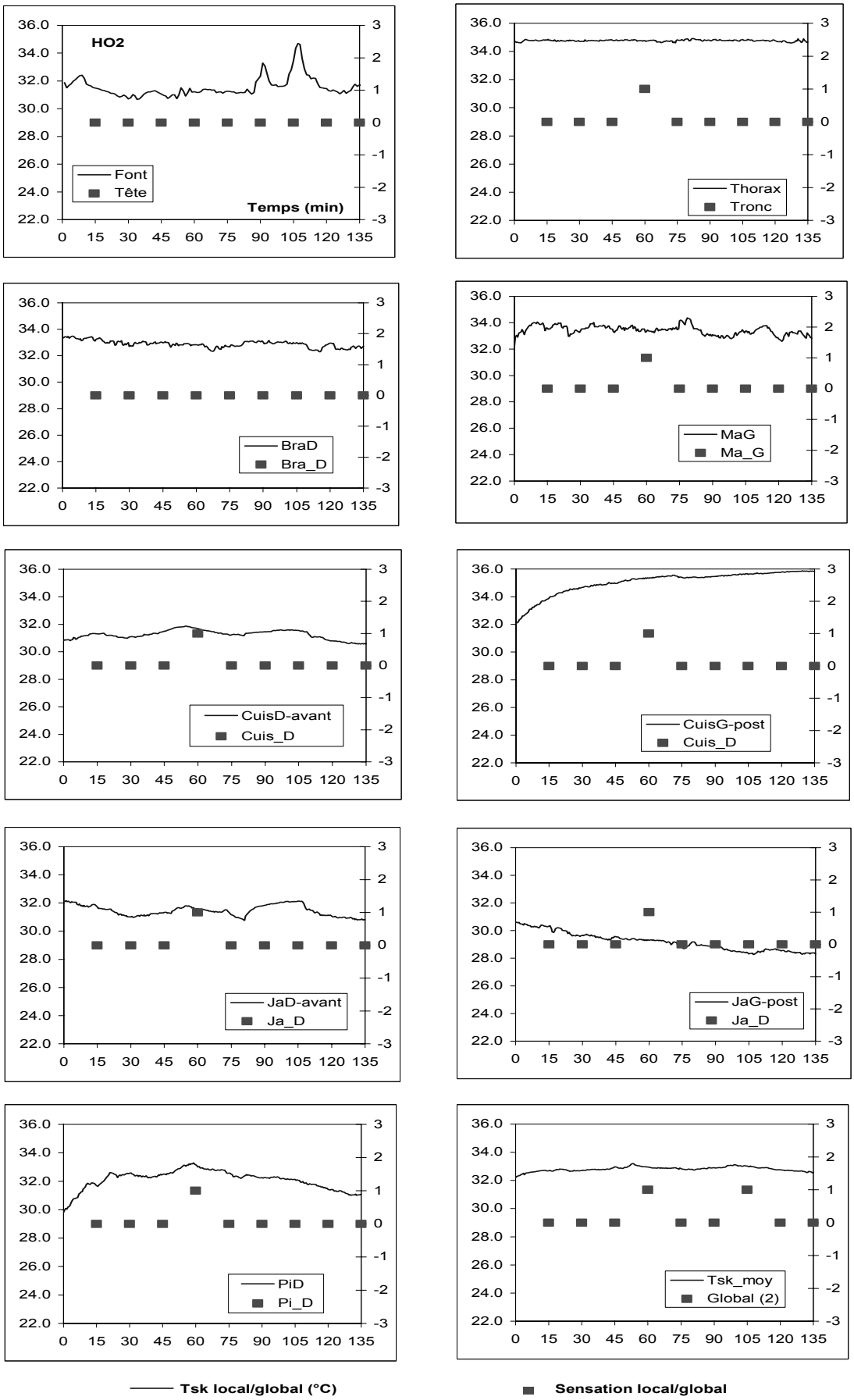
Reglage de puissances faites par les femmes.

ANNEXE 3B: Températures cutanées locales pour les expériences dans le bureau

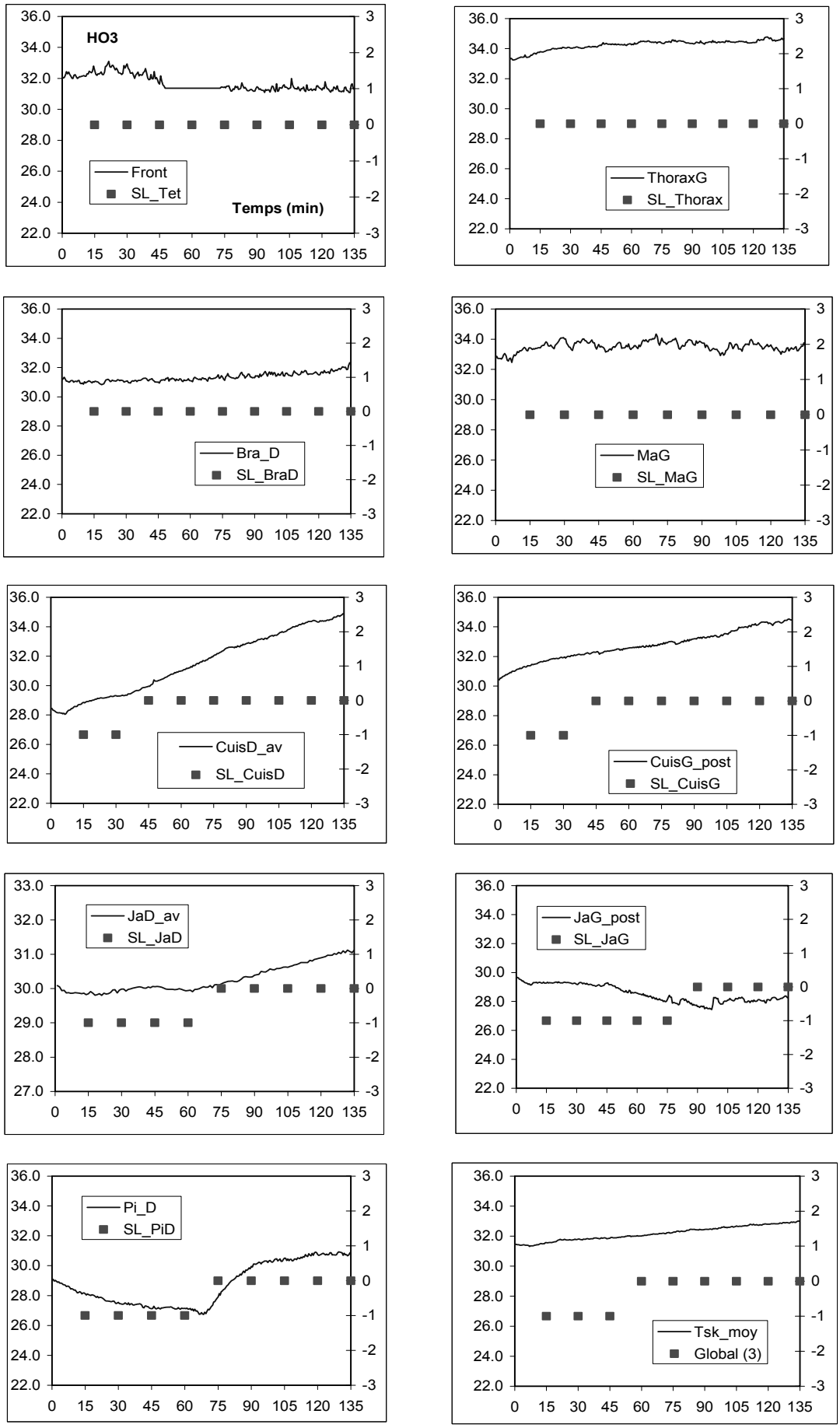


Evolutions des températures de peau locales pour les 18 participants.

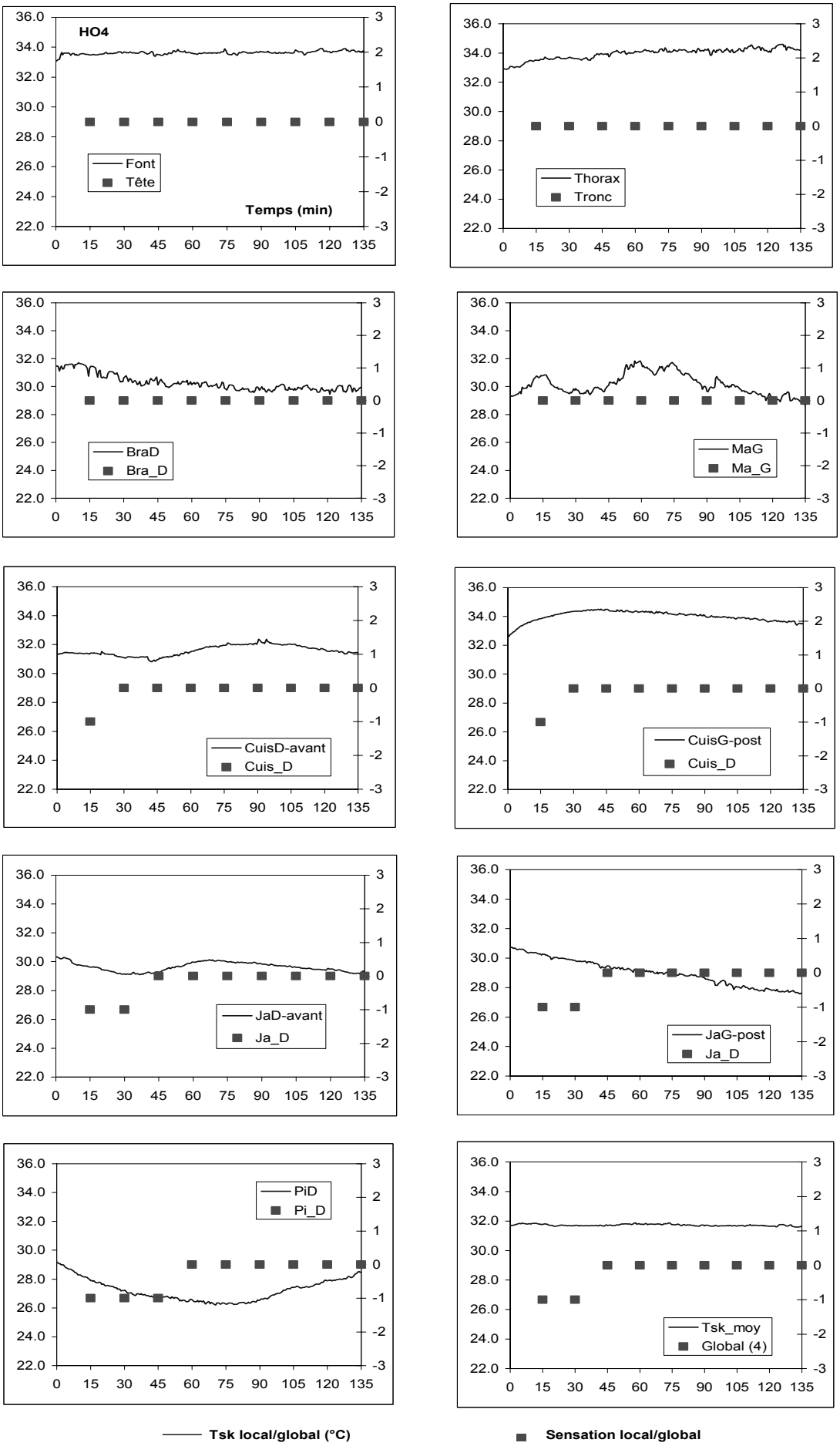
ANNEXE 3C : Températures cutanées et sensations pour les hommes



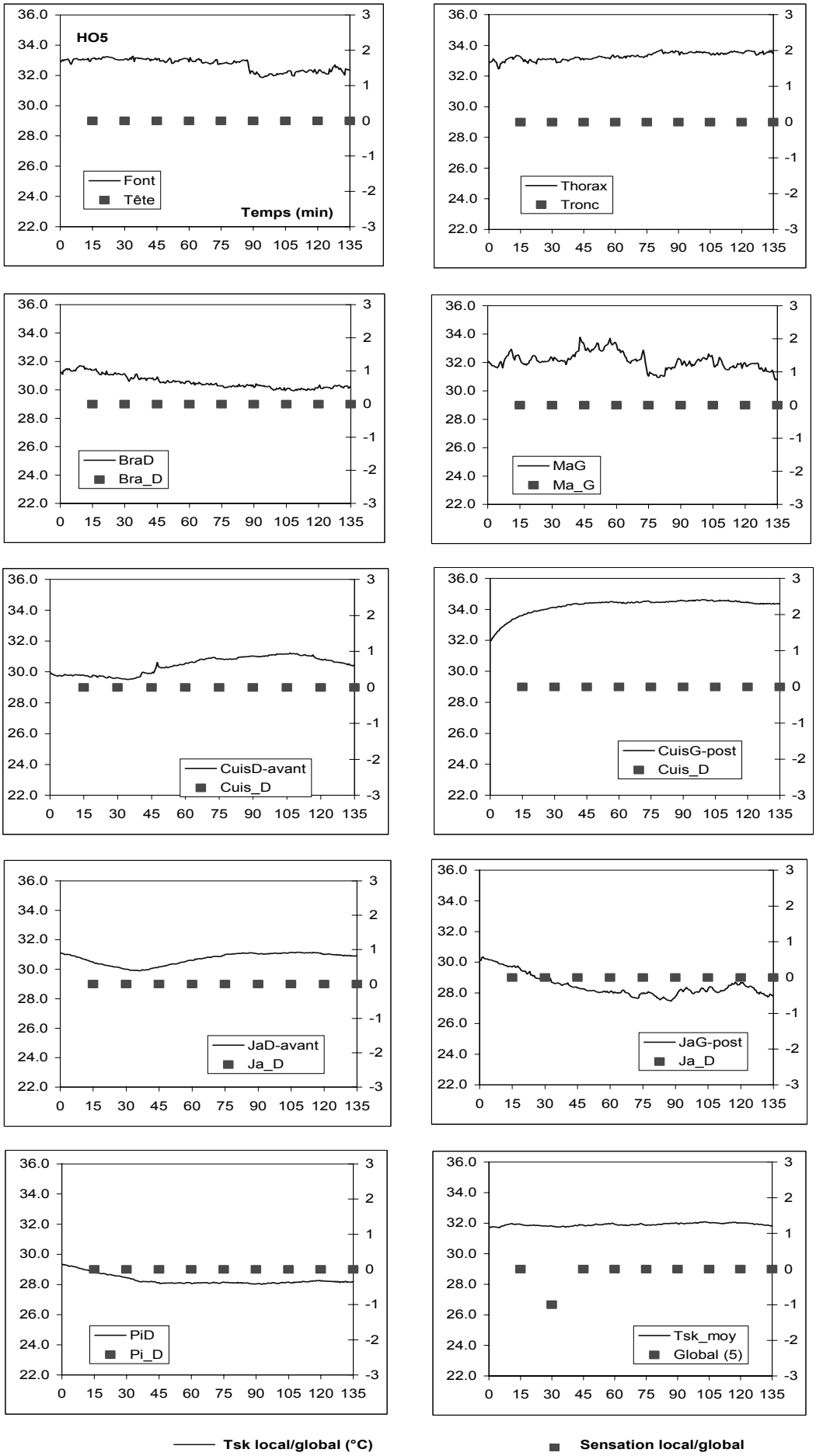
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO2.



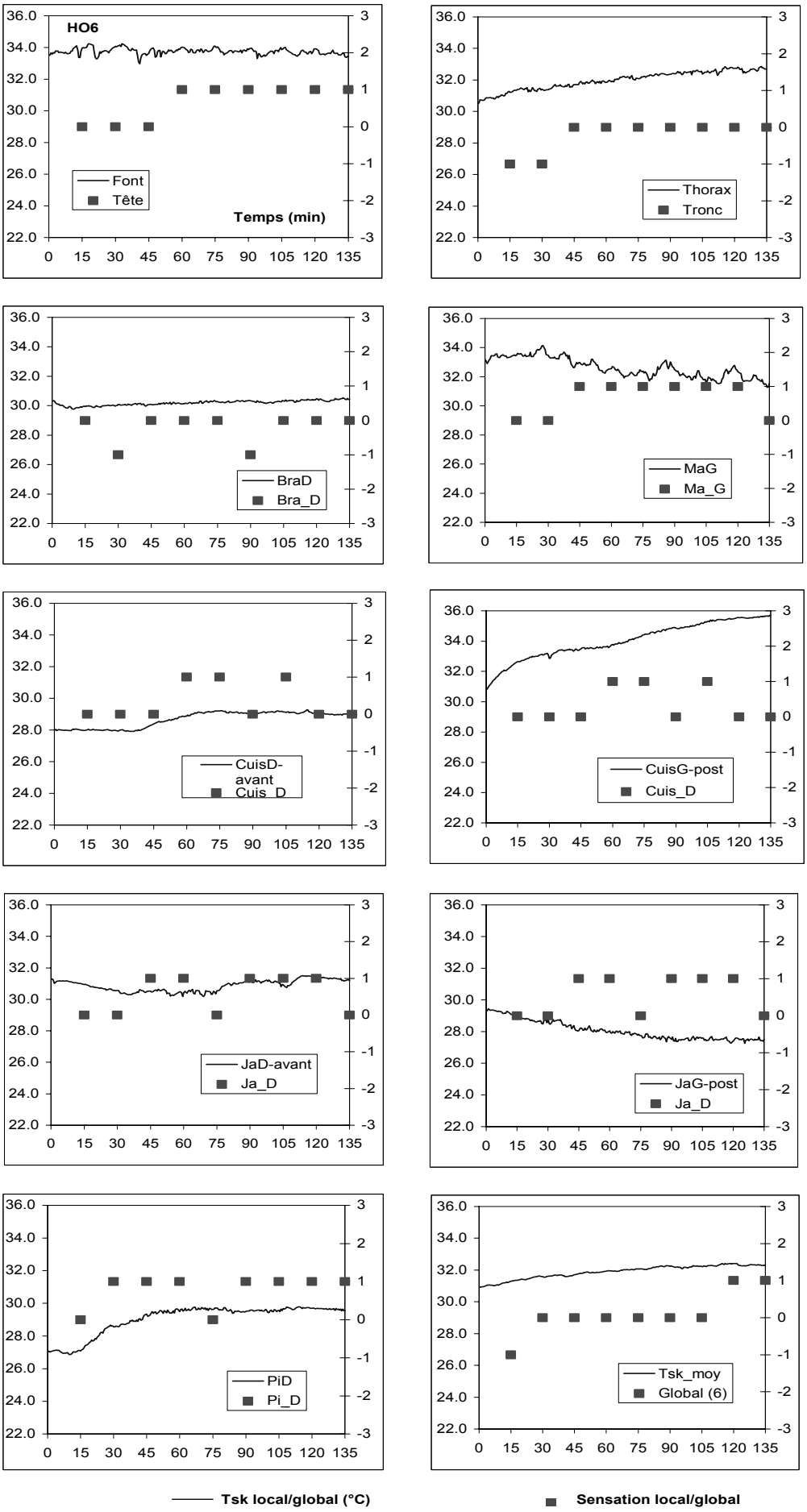
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO3.



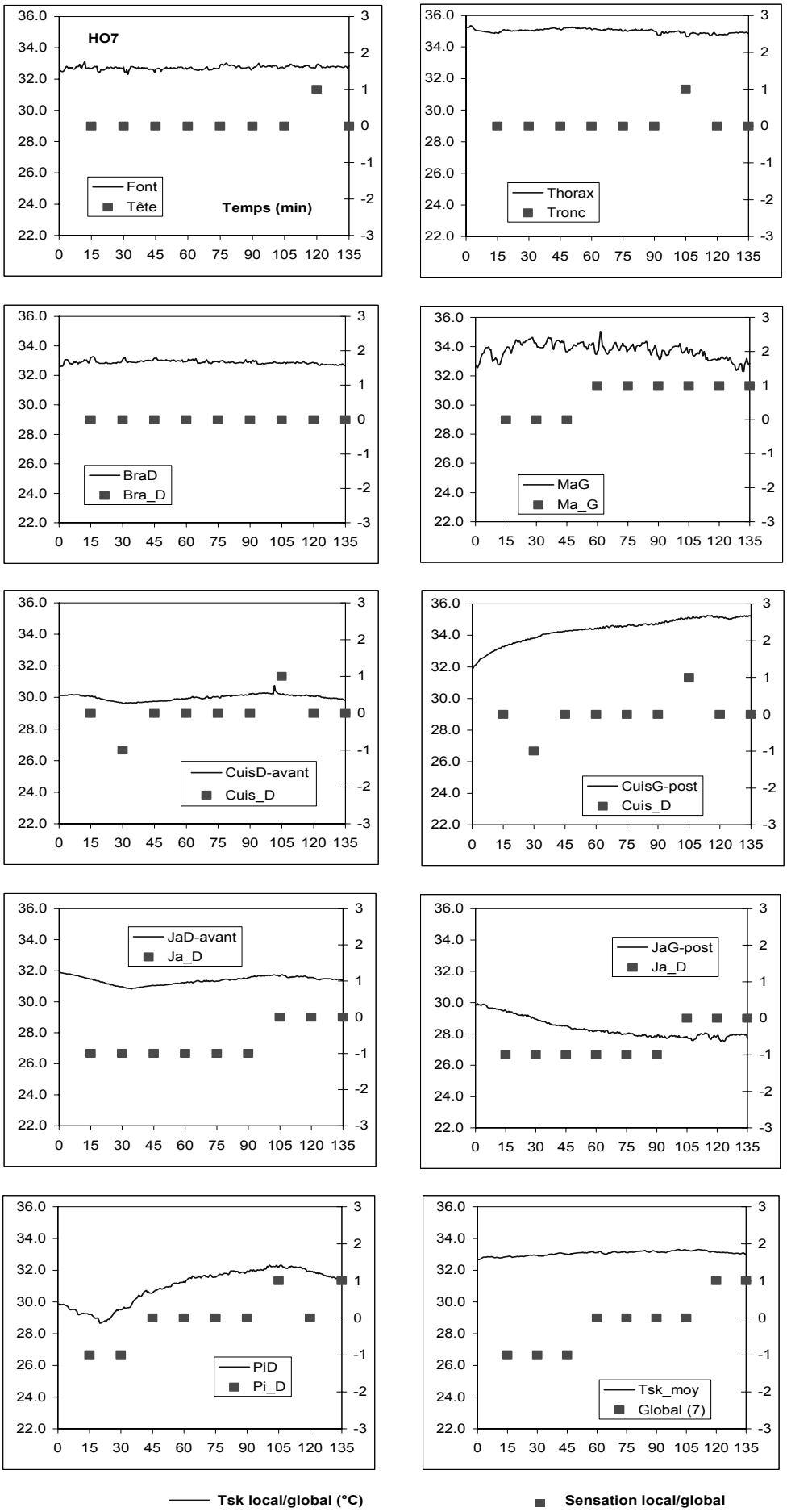
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO4.



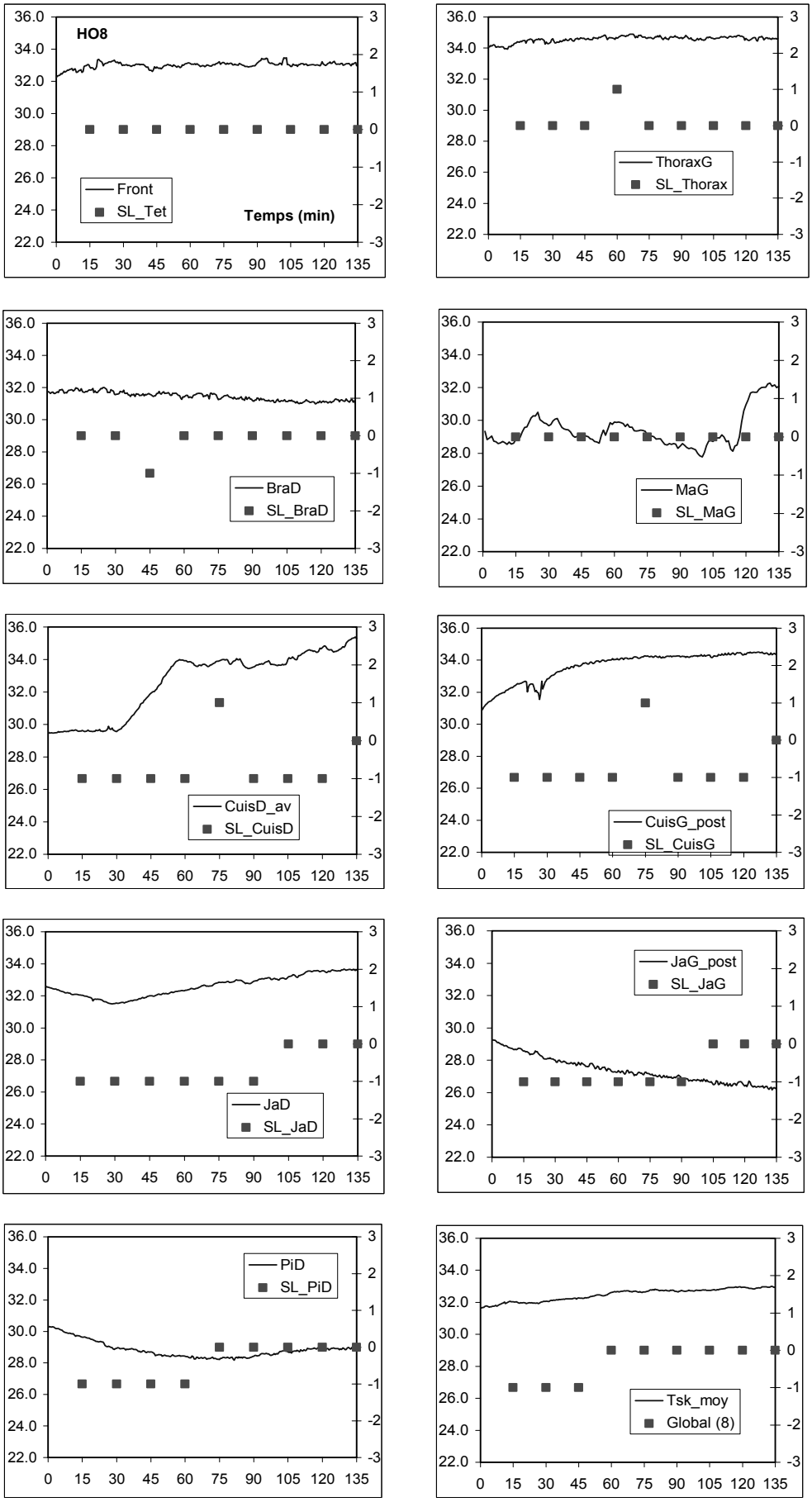
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO5.



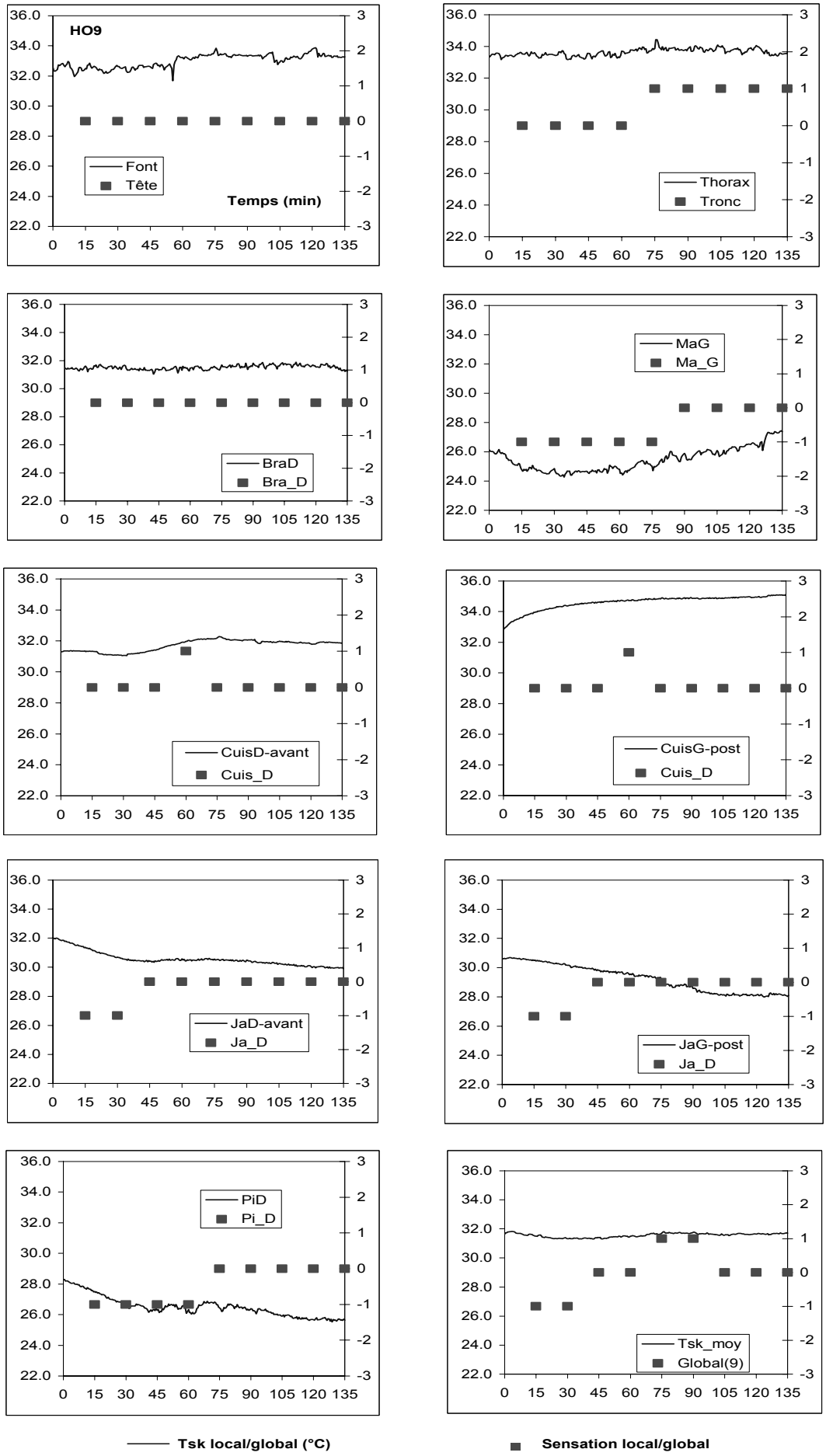
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO6.



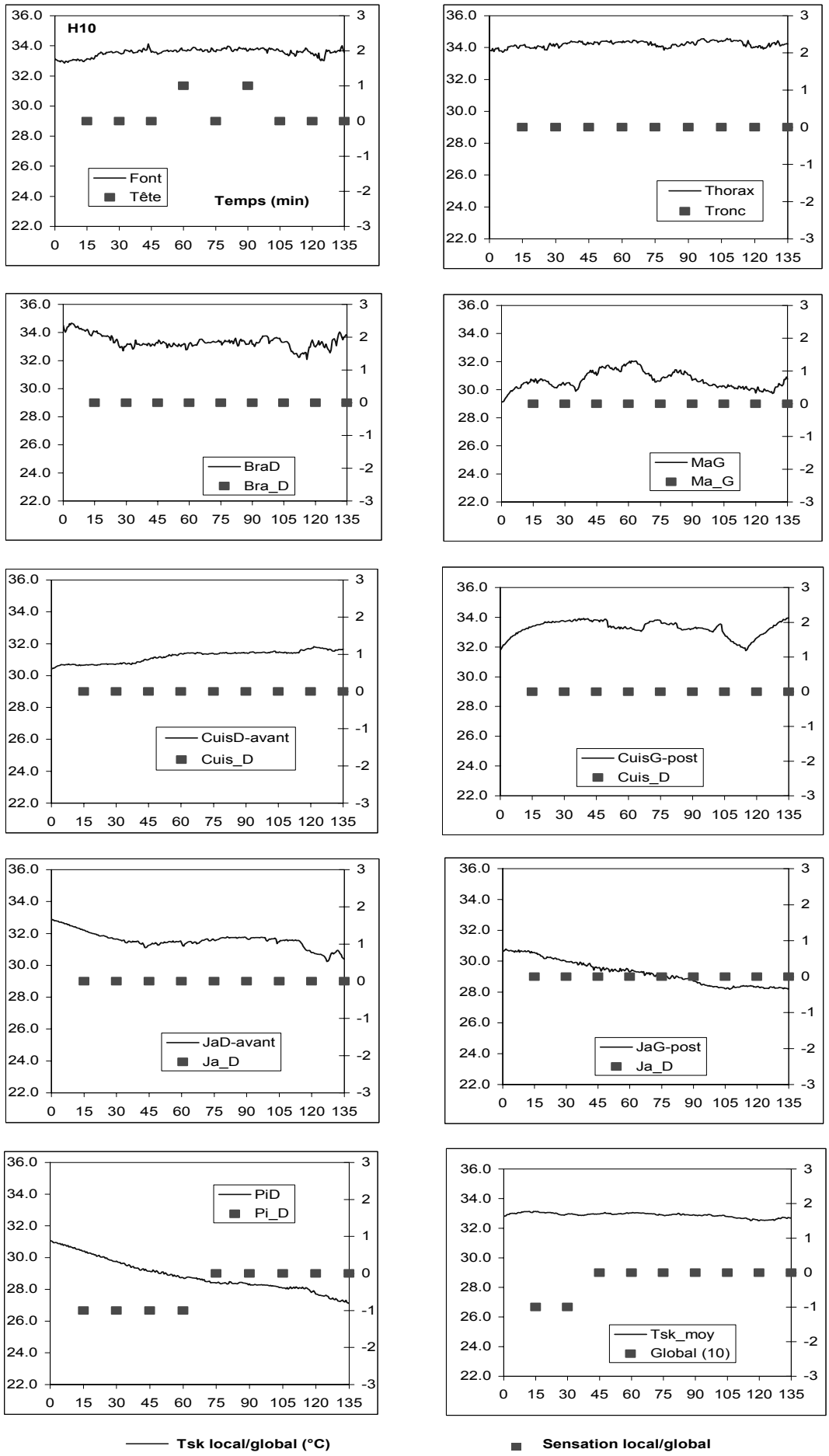
Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO7.



Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO8.



Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas HO9.



Evolutions de la température de peau et la sensation thermique pour cas H10.

ANNEXE 4A : Ecarts de densités de flux pour les hommes.

EXP	Temps (min)	Tête	Tronc	Bras	Mains	Jambes	Pieds	F_global
HO2	45	1.7	2.2	1.1	4.3	21.0	20.1	9.5
	60	3.1	2.3	2.2	6.7	25.7	28.6	12.0
	75	4.0	2.0	2.4	8.7	15.5	27.1	8.4
	90	3.9	1.7	2.4	8.1	12.5	21.8	7.0
	105	5.0	2.3	2.9	8.9	12.4	23.1	7.4
	120	5.0	2.2	2.8	8.7	11.6	22.9	7.0
	135	4.8	1.8	2.5	8.5	11.1	22.0	6.6
HO3	45	0.8	1.1	0.8	4.2	14.4	16.3	6.5
	60	3.4	2.5	2.9	13.2	25.3	29.9	12.4
	75	7.1	4.9	5.5	20.8	34.2	38.5	17.8
	90	8.5	5.4	6.5	22.5	37.6	40.1	19.6
	105	10.3	6.7	8.0	25.3	41.4	40.9	21.9
	120	11.0	7.2	8.6	26.9	43.5	40.3	22.9
	135	12.2	8.2	9.5	26.7	45.2	40.4	24.1
HO4	45	1.4	1.8	0.7	3.7	21.5	20.3	9.5
	60	2.5	2.4	1.7	7.3	30.9	32.9	14.0
	75	4.1	3.5	2.9	10.0	35.4	39.3	16.6
	90	5.2	3.7	3.4	11.8	38.7	37.1	18.1
	105	6.9	3.4	4.1	11.9	27.0	33.6	13.9
	120	6.7	2.6	3.6	10.5	23.9	32.3	12.4
	135	7.4	2.9	4.0	10.3	23.2	36.9	12.5
HO5	45	1.3	2.0	0.9	3.6	21.2	21.2	9.5
	60	1.9	2.3	1.6	6.4	32.2	35.7	14.4
	75	2.8	2.9	2.3	8.3	37.9	44.1	17.3
	90	4.6	4.0	3.6	10.5	41.5	42.6	19.3
	105	5.2	3.8	3.8	10.3	43.6	42.5	20.1
	120	5.5	2.8	4.0	8.6	34.9	36.3	16.4
	135	4.9	1.6	3.4	6.6	29.1	31.8	13.5
HO6	45	1.5	1.7	0.7	3.6	20.3	19.2	9.0
	60	2.4	3.0	1.9	6.9	32.6	31.2	14.7
	75	4.2	3.2	2.8	10.0	27.4	30.8	13.3
	90	5.4	3.4	3.6	10.8	25.2	37.2	13.2
	105	5.6	3.1	3.6	10.3	21.2	31.8	11.4
	120	5.6	2.5	3.1	10.1	18.9	31.4	10.3
	135	5.8	2.5	3.1	9.8	18.7	32.6	10.3
HO7	45	0.5	1.5	0.6	3.1	20.7	22.0	9.1
	60	1.7	2.1	1.8	5.8	30.8	33.8	13.8
	75	3.0	3.1	2.7	8.5	35.7	39.0	16.5
	90	3.6	3.2	3.0	9.9	38.9	39.8	17.8
	105	3.7	2.2	3.0	8.4	33.8	36.1	15.5
	120	4.0	1.4	3.0	6.4	25.1	30.4	11.8
	135	4.2	1.2	3.1	5.5	21.1	26.9	10.2
HO8	45	0.6	1.7	0.6	3.7	24.5	24.4	10.6
	60	1.8	2.0	1.5	7.0	29.7	35.9	13.5
	75	3.2	2.8	2.5	8.9	31.5	40.9	14.9
	90	4.3	3.2	3.1	9.9	31.4	39.3	15.2
	105	3.9	2.4	2.7	9.5	32.8	36.5	15.2
	120	4.7	2.8	3.2	9.8	34.3	37.1	16.1
	135	5.3	2.9	3.5	10.2	34.9	31.7	16.2
HO9	45	1.1	1.4	0.3	3.4	20.7	19.5	9.0
	60	2.5	2.9	1.7	7.4	32.8	33.7	14.9
	75	4.6	3.6	3.1	10.6	30.5	39.2	15.0
	90	4.7	2.8	2.9	10.8	27.2	37.7	13.6
	105	5.6	3.2	3.3	11.1	27.0	37.3	13.7
	120	4.8	2.4	2.8	10.2	25.9	34.8	12.8
	135	5.7	3.1	3.5	11.0	25.5	35.4	13.1
H10	45	1.8	2.4	1.2	4.1	22.5	21.9	10.2
	60	1.2	1.5	1.4	4.8	27.4	30.3	12.1
	75	3.0	2.1	2.0	7.8	24.0	35.8	11.7
	90	3.0	2.1	2.4	8.2	24.4	41.4	12.2
	105	3.0	1.7	2.2	8.2	23.1	28.1	10.9
	120	3.6	1.9	2.5	8.4	22.5	25.6	10.8
	135	4.1	2.0	2.6	8.9	21.8	24.4	10.6

NB: Chaque valeur (en W m^{-2}) calculée à partir de t=30 min dans la manière suivante: $\Delta\varphi R_{(t)} = \varphi R_{(t)} - \varphi R_{(t=30)}$

Nous avons choisi t=30 min car c'est le début de la mise en marche des panneaux.

ANNEXE 4B : Récapitulatif de l'analyse des expériences

Au cours du chapitre 3 et 4 nous avons analysé les expériences faites dans un bureau sur des personnes réelles, afin de déterminer une éventuelle relation entre les sensations thermiques et des données caractéristiques du LHS. Nous avons regroupé toutes les informations dans un seul tableau ce qui nous permet d'avoir les paramètres importants notés dans le chapitre 3 (température de peau) et chapitre 4 (flux radiatifs local). Nous avons décidé de ne travailler que sur les hommes, pour nous affranchir des différences inter-individuelles, car comme nous l'avons constaté les femmes ne réagissent pas tout à fait de la même façon, de plus notre modèle de thermo-physiologie correspond à un homme.

Méthode pour établir le Tableau

Ce que nous cherchons à établir dans ce Tableau, c'est un synthèse de l'influence de la vitesse à laquelle la température de la peau (dT_{sk}/dt) ou flux échangé ($d\varphi/dt$) sur la changement de la sensation thermique et/ou le comportement des sujets hommes.

Dans un premier temps, toutes les courbes comme celles présentées pour le cas HO3 et HO8 ont été tracées (cf. Annexe 3C). Ces courbes ont été juxtaposées pour visualiser l'ensemble. Quelques observations générales :

- Les $T_{sk,i}$ des segments supérieurs du corps montrent des variations très faibles (sauf pour les mains) et les sensations pour ces segments restent neutres (S=0) presque tout au long de l'expérience, donc nous n'avons pas fait d'analyse plus détaillée sur ces segments.
- Les segments inférieurs du corps notamment la cuisse_avant, le mollet_avant et les pieds qui sont directement exposés aux panneaux chauffants ont des températures qui évoluent différemment par rapport aux segments supérieurs du corps. Par exemple, pour tous les participants l'évolution de température de la cuisse_avant montre une forte relation avec le changement de sensation (souvent 1 point) et ceci semble provoquer une réaction sur les panneaux.

On a décidé de faire un récapitulatif de nos observations pour les trois segments principaux – **cuisse_avant**, **mollet_avant** et **pieds**. Les zones postérieures (cuisses et mollets) ne sont pas considérées, car ces zones sont en contact avec la chaise. Il faut notée que nous avons considéré les changements de sensations (ΔS) *à partir de t=30 min* au moment où les panneaux sont allumés. Ainsi, le Tableau donne les informations suivantes pour chaque segment:

∗ (ΔS) variation de sensation locale est de 0 ou +1.
Noté que pour le cas HO8 un changement de +2 n'est pas discuté dans ce Tableau.

∗ en se basant sur l'observation de la courbe de T_{sk} et on détermine si la pente (dT_{sk}/dt) est faible (+), moyenne (++) ou forte (+++). Lorsque la ΔS = 1, on essaie de voir si elle est une fonction de la pente (dT_{sk}/dt)

∗ $[t_1 - t_2]$ temps de référence pour les changements de sensation, en général t_1 =30 min. et correspond à la fin de la période "neutre"

∗ $[Tsk_1 – Tsk_2]$ températures de peau aux temps t_1 et t_2

∗ $[\varphi_1 \rightarrow \varphi_2]$ densité de flux radiatif instantané aux temps t_1 et t_2

Exemple,
HO3 pour la cuisse :

à t_1=30 min, Tsk,cuis,1= 29.3 °C et S=0 à t_2=45 min, Tsk,cuis,2= 30.0 °C et S=1
Donc, ΔS=1 $[t_1 - t_2]$ =30-45 $[Tsk_1 – Tsk_2]$ =(29.3-30.0) °C $[\varphi_1 \rightarrow \varphi_2]$ = -32.5 → -12.5 $W.m^{-2}$.

HO6, mollet_avant change *deux fois* la sensation de +1:

$[t_1 - t_2]$ =30 - 45 min $[Tsk_1 – Tsk_2]$ =(30.6-30.5)°C $[\varphi_1 \rightarrow \varphi_2]$ =(- 40.1→ -32.3) $W.m^{-2}$.
$[t_3 – t_4]$ =75 - 90 min. $[Tsk_3 – Tsk_3]$ =(30.6-31.1) °C $[\varphi_3 \rightarrow \varphi_4]$ = (-31.5→-22.2) $W.m^{-2}$.

Pour le premier ΔS = 1, on constate que la Tsk diminue peu, on peut dire que la contribution de dT_{sk}/dt est faible. Par contre, $[\varphi_1 \rightarrow \varphi_2]$ montre une nette baisse des échanges de chaleur on peut supposer qu'il est la 'cause' importants de l'augmentation de la sensation et/ou changement de puissance panneau.

Après ces observations, on essai de conclure si ΔS est un fonction de dT_{sk}/dt et/ou $d\varphi/dt$.

Lorsque ΔS = 0, il devient difficile à déterminer si la changement de sensation et/ou comportement est à cause de dTsk/dt et/ou $d\varphi/dt$. *Il est important de souligner que chaque ΔS contient en partie 'le contribution psychologique' que l'on ne connaît pas.*

Tableau récapitulatif des observations faites pour les hommes

	Exp.	HO2	HO3	HO4	HO5	HO6	HO7	HO8	HO9	H10
Seg.	**Variable**									
Cuisse avant	**ΔS**	1	1	0	0	1	1	1	1	0
	dTsk/dt	++	+++	++	++	+	+	++	++	+
Observations	t_1-t_2	30-45	30-45			45-60 90-105	45-60 90-105	120-135	45-60	
	$Tsk_1 – Tsk_2$	31.5-31.7	29.3-30			28.4-28.9 Reste à 29.1	29.6-29.8 Reste à 30.2	34.7-35.3	31.4-32	
	$\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$	-34.5→ -1.2	-32.5→ -12.5			-6.9→ 11.9 (-5.3→ -12.3)	-4.9→ 9.2 (22.2→ 13.3)	14.8→ 16.3	-5.9→ 11.9	
Con clus.	**ΔS=f()**	**dTsk/dt***	**dTsk/dt**			**dTsk/dt**	**dTsk/dt ***	**dTsk/dt**	**dTsk/dt**	
		dφ/dt	**dφ/dt**			**dφ/dt**	**dφ/dt**	**dφ/dt**	**dφ/dt**	
Mollet_ avant	**ΔS**	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	dTsk/dt	++	++	+	+	+	+	++	+	++
Observations	t_1-t_2	45-60	60-75	30-45		30-45 75-90	90-105	90-105	30-45	
	$Tsk_1 – Tsk_2$	31.3-31.6	29.9-30.1	29.2-29.3		(30.6 – 30.5) 30.6 - 31.1	31.6-31.7	32.9-33.2	(30.7-30.4)	
	$\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$	-37.1→ -36.3	-27→ -20.6	-40.1→ -31.1		-40.1→ -32.3 -31.5→ -22.2	-24.3→ -23.6	(-21.5→ -22.6)	-40.7→ -33.2	
Con clus.	**ΔS=f()**	**dTsk/dt**				**dTsk/dt ***	**dTsk/dt ***	**dTsk/dt**		
		dφ/dt	**dφ/dt**	**dφ/dt**		**dφ/dt**	**dφ/dt***	**dφ/dt**	**dφ/dt**	
PiedD	**ΔS**	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	dTsk/dt	+++	+++	++	+	+	+++	+	++	+
Observations	t_1-t_2	45-60	60-75	45-60		75-90	30-45 90-105 120-135	60-75	60-75	60-75
	$Tsk_1 – Tsk_2$	32.5-33.2	27.1-27.9	(26.8-26.6)		(29.6-29.5)	29.5-30.6 32-32.2 (31.9-31.4)	(28.4-28.2)	26.3-26.4	(28.7-28.4)
	$\varphi_1 \rightarrow \varphi_2$	-13.8→ -5.3	-2.9→ 5.8	-14.2→ -1.7		-3.6→ 2.8	-32.4→ -10.4 (7.4→ 3.4) (-2.1→ -5.5)	3.5→8.6	-1.0→4.5	-2.8→ 2.7
Con clus.	**ΔS=f()**	**dTsk/dt**	**dTsk/dt**				**dTsk/dt ***		**dTsk/dt**	
		dφ/dt	**dφ/dt**	**dφ/dt**		**dφ/dt**	**dφ/dt***	**dφ/dt**	**dφ/dt**	**dφ/dt**

Tableau 4B.1: Synthèse de la contribution de la vitesse de variation de température et flux pour les cas des hommes.

Note: Les symboles employé dans le tableau ont des définitions suivantes.

- ΔS – variation de sensation local
- dTsk/dt – vitesse de variation de la température cutanée lors d'essai - + faible ++ moyen +++ fort
- Les valeurs entre parenthèses () montrent une baisse de Tsk ou une augmentation de perte de flux φ
- * indique une contribution faible des variables dTsk/dt ou dφ/dt

ANNEXE 5A : Description du Module LHS

Afin d'intégrer le comportement thermique des panneaux du LHS dans nos simulations, nous avons crée un "module LHS" dans l'environnement TRNSYS (Fig. 5A.1). Ce module permet d'avoir les températures de surface des divers éléments en fonction de la puissance électrique d'alimentation de chaque élément chauffant.

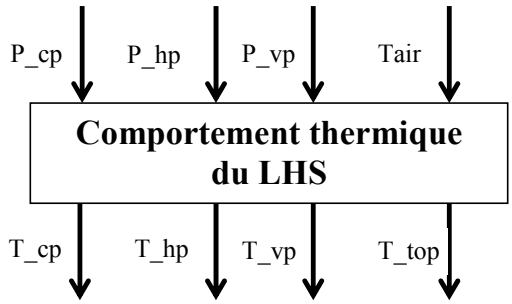
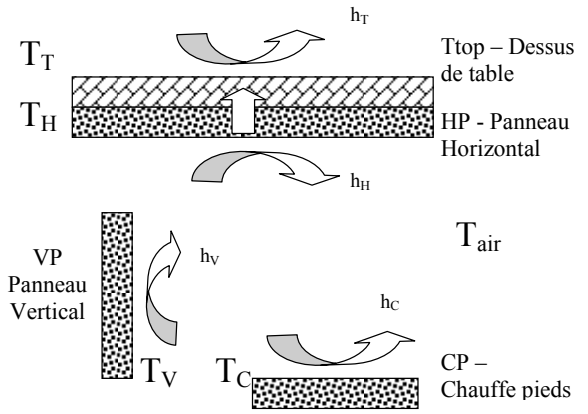


Figure 5A.1 : Schéma des entrées et sorties du module LHS.

Notre objectif est de prendre en compte l'inertie thermique importante des panneaux, pas de développer un modèle précis étant donné que nous n'avons pas les données exactes concernant les panneaux chauffants nous avons fait un certain nombre d'hypothèses.

Hypothèses

- Chaque élément est à température uniforme.
- Les transferts sont mono dimensionnel.
- Nous ne considérons que la partie de la table en contact avec le panneau horizontal. Il n'y a pas de transferts dans la table par conduction horizontale. La température de la table calculée ne représente que la zone dont la température a évolué nettement au cours des essais.
- Les panneaux sont parfaitement isolés à l'arrière, sauf le panneau horizontal qui échange de la chaleur avec la table.
- La température de l'air est identique en tout point.
- Les surfaces de chaque panneau sont les surface réelles: S_C = 0.155 m², S_H= 0.163 m², et S_V= 0.293 m².



Notations

T	température
P	puissance d'alimentation (W)
C	capacité thermique totale (J/°C)
h	coefficient d'échange surfacique (W/m² °C)
S	surface de l'élément
K	coefficient de transfert entre le panneau et la table (W/m² °C)

Indice

CP	Chauffe pieds
HP	panneau Horizontal
VP	Panneau Vertical

Figure 5A.2: Schématisation des transferts de chaleur.

Les hypothèses nous amène à un modèle simple de LHS, nous obtenons les expressions suivantes:

Table Top
$$C_T.\frac{dT_T}{dt} = K.S_H.(T_H - T_T) - h_T.S_H.(T_T - T_{air})$$

Panneau Horizontal
$$C_H.\frac{dT_H}{dt} = P_H - K.S_H.(T_H - T_T) - h_H.S_H.(T_H - T_{air})$$

Panneau Vertical
$$C_V.\frac{dT_V}{dt} = P_V - h_V.S_V.(T_V - T_{air})$$

Chauffe pieds
$$C_C.\frac{dT_C}{dt} = P_C - h_C.S_C.(T_C - T_{air})$$

Sous forme discrétisée où T^i est la température au $i^{ème}$ pas de temps Δt, on obtient par exemple pour le panneau horizontal:

$$T_H^{i+1} = T_H^i + \frac{\Delta t}{C_H}\left[P_H^{i+1} - K.S_H.(T_H^i - T_T^i) - h_H.S_H.(T_H^i - T_{air}^i)\right]$$

Nous ne disposons pas de toutes les données thermo-physiques nécessaires, en particulier; K, h et C, par conséquent à partir de données physiquement possibles nous avons procédé par identification de paramètre en comparant les résultats du modèle aux valeurs expérimentales.

Au cours de l'essai HO8 les valeurs mesurées sont comme le montre la Figure 5A.3. Les résultats calculés par le modèle sont présentés par la Figure 5A.4. Compte tenu de la simplicité du modèle nous considérons que les résultats sont satisfaisants.

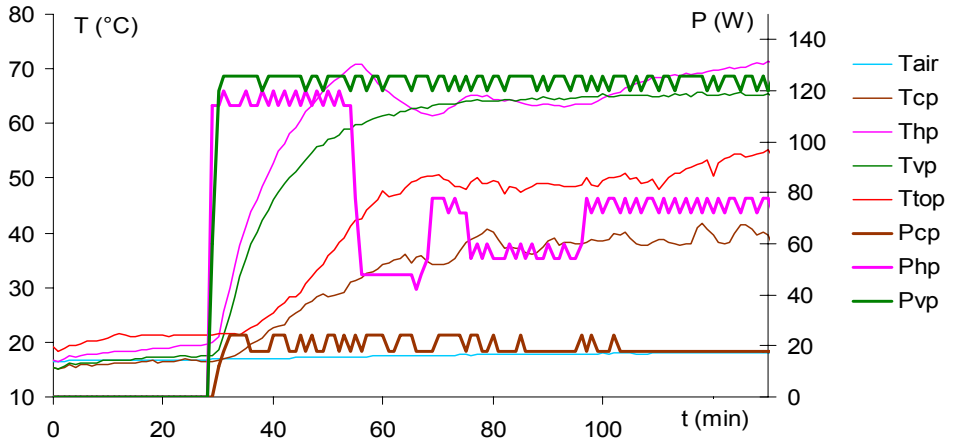


Figure 5A.3: Températures et puissances des panneaux mesurés lors d'essai HO8.

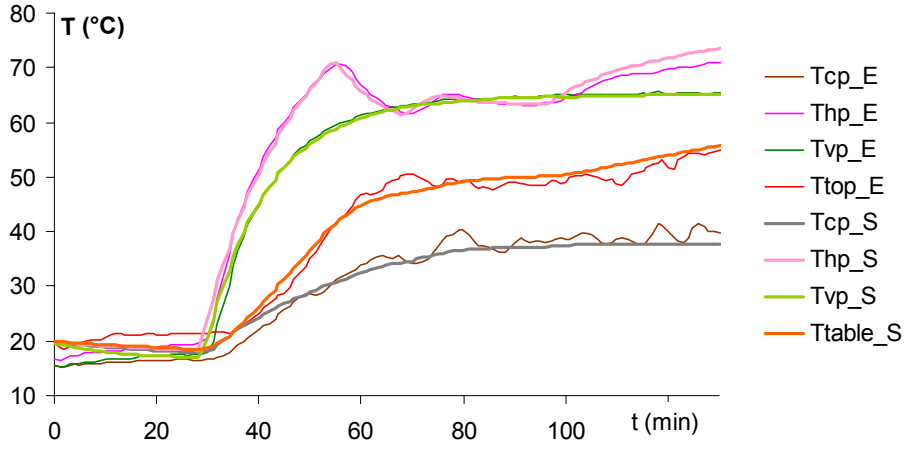


Figure 5A.4: Comparaison des températures mesurées (E) et simulées (S).