



HAL
open science

**L'homme et son environnement Thermique.
Modélisation**
Françoise Thellier

► **To cite this version:**

Françoise Thellier. L'homme et son environnement Thermique. Modélisation. Thermique [physics.class-ph]. Université toulouse 3 Paul Sabatier, 1999. tel-02155432

HAL Id: tel-02155432

<https://hal.science/tel-02155432>

Submitted on 13 Jun 2019

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

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

Françoise THELLIER

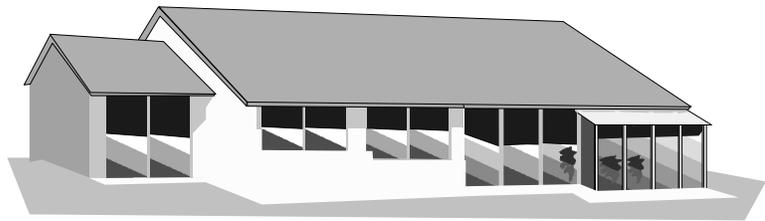
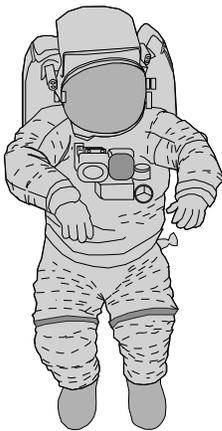
Maître de Conférences à l'U.P.S.

Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches

JUILLET 1999



L'Homme et son Environnement Thermique Modélisation



Laboratoire **E**tudes des **S**ystèmes et
Environnement **T**hermique de l'**H**omme
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne



31062 Toulouse Cedex 04 - France

L'HOMME ET SON ENVIRONNEMENT THERMIQUE Modélisation

Habilitation à Diriger des Recherches
62^{ème} section Energétique physique

Présenté par

Françoise THELLIER
Maître de Conférences à l'U.P.S.

Ce document est extrait du mémoire de l'habilitation à diriger des recherches
soutenue le vendredi 9 juillet 1999

Alain CORDIER	Directeur de Recherche
Gilbert ACHARD	Rapporteur
Patrick DEPECKER	Rapporteur
Jean-Bernard SAULNIER	Rapporteur
Françoise MONCHOUX	Examineur
Bernard COMET	Examineur
Didier DELAUNAY	Examineur
Jean-Pierre MARIE	Examineur

TABLE DES MATIERES

Résumé	3
--------------	---

Synthèse des travaux de recherche

I. INTRODUCTION	7
I.1. Généralités	7
I.2. Point de départ de l'étude	8
II. POSITIONNEMENT DU PROBLEME.....	9
II.1. Rappels de thermo-physiologie	9
a) Le bilan thermique	9
b) Equilibre, Neutralité, Sensation et Confort.....	11
II.2. Les méthodes d'analyse des transferts thermiques.....	13
a) Les divers modes d'investigation	13
b) Evaluation des conditions thermiques	14
II.3. Conclusions	15
III. NOTRE DEMARCHE.....	16
III.1. Généralités	16
III.2. Les modèles de thermo-physiologie	17
a) Critères de choix du modèle	17
b) Le modèle multi-nœuds	18
c) Le modèle à deux nœuds	19
III.3. Les modèles de transferts de chaleur	19
a) Les transferts à travers les vêtements	20
b) Les transferts de chaleur à la surface cutanée ou vestimentaire	22
c) Les transferts vers un milieu solide	23
d) Les modèles "d'interpréteur".....	25
III.4. La métrologie.....	26
a) Mesure des températures de peau	26
b) Mesure de l'environnement thermique proche.....	27
III.5. Les applications	30
a) Environnement peu hétérogène : l'habitat.....	30
b) Environnement très hétérogène : La voiture	33
c) Le scaphandre spatial.....	37
III.6. Conclusions	40
IV. PERSPECTIVES.....	42
IV.1. Utilisation des modèles	42
IV.2. Elargissement du domaine de validité des modèles de physiologie	42
IV.3. Evaluation subjective du confort thermique.....	43
IV.4. Pilotage des mannequins thermiques	43
IV.5. Approche du confort global.....	44
Références bibliographiques.....	46
Liste des abréviations	47
Nomenclature.....	48

Annexes

Structure du L.E.S.E.T.H.	A.2
Curriculum Vitae. Françoise Thellier	A.4
Liste des publications du groupe "Environnement Thermique de l'Homme"	A.9
Publications dans des revues à comité de lecture	A.9
Communication dans des congrès et colloques avec actes.....	A.10
Congrès Internationaux	A.10
Congrès nationaux	A.12
Journées d'études	A.12
Rapports hors contrat.....	A.13
Rapports de contrats	A.13
L'habitat	A.13
L'espace	A.14
La voiture	A.15
Stages, DEA et Thèses d'énergétiques	A.16
Les publications significatives.....	A.17

L'homme et son Environnement Thermique. Modélisation

L'homme demande de plus en plus une bonne qualité d'environnement dans toutes les situations : habitat, transports,... Le travail présenté s'intéresse à l'aspect thermique. Notre but est une meilleure compréhension des interactions homme-environnement.

Ce travail s'est fait par le développement de modèles permettant le calcul fin des transferts de masse et de chaleur locaux au niveau cutané. Pour cela il faut connaître avec précision les conditions climatiques, c'est à dire les différentes variables physiques et leurs variations spatiales et temporelles. Il faut également déterminer les effets de celles-ci sur le corps humain.

Cette analyse passe donc par une modélisation de la thermo-physiologie humaine. Le corps humain est un système thermique non linéaire, complexe et régulé. Deux modèles sont utilisés, l'un simple où le corps est composé de deux compartiments pour l'analyse des situations homogènes, l'autre plus complet de 24 à 45 compartiments selon la complexité des conditions thermiques.

Des modèles sont créés pour calculer séparément chaque type de transfert par convection, rayonnement infra-rouge et solaire, transfert à travers les vêtements ou un milieu solide. Diverses campagnes d'expériences ont été réalisées pour établir et valider ces modèles développés essentiellement au sein du logiciel TRNSYS.

Nous présentons des applications dans l'habitat, la voiture et le scaphandre de sortie spatiale. Pour chaque domaine nous donnons, les particularités des conditions thermiques, les expériences réalisées et les interpréteurs. Afin d'analyser les situations réelles, le nombre des variables doit être limité. Nous avons développés des interpréteurs qui traduisent les variables physiques et/ou physiologiques en données pertinentes pour le domaine étudié. Il s'agit de sensations thermiques locales pour l'habitat ou de rythme cardiaque dans le scaphandre.

Pour un individu soumis à des conditions thermiques complexes, cet outil complet permet d'obtenir toutes les variables physiques, physiologiques et perceptives, locales et globales, ainsi que des variables non mesurables comme les flux de masse ou de chaleur permettant de mieux comprendre les phénomènes de couplages. On peut alors envisager le dimensionnement d'équipements techniques en tenant compte des exigences de "confort" de l'être humain.

Mots-clefs :

Transferts-thermiques	Thermophysologie
Habitat	Habitacle
Modélisation	TRNSYS

Modelling the human body in his complex thermal Environment

Human being ask for more and more quality of his environment in all situations : house, car,... The study presented here is only about thermal environment. Our aim is a better understanding of the interactions between the human body and his environment.

This study has been performed through the development of models, that calculates local heat and mass transfer on skin surface. To perform that, we need do know with a, as good as possible, precision all the specificity of the thermal conditions that is all local physical variables of the human surrounding that can vary along the space and during the time. We also need to determin their effect on the human body.

For that purpose we need a human thermoregulation model as the body is a complex regulate thermal system with non linear behavior. Two models have been used, one quite simple where the body is composed of two nodes, to study homogeneous thermal conditions, the other on is more complete and is composed from 25 to 45 nodes depending on the complexity of the studied non isotherm environment.

Other models have been created too calculate separately each type of heat and mass transfer trough convection, infra-red and solar radiation, transfer trough clothing and solid or porous media. Several experimental campaigns have been performed to establish and validate those models. The software developments are done under TRNSYS a oriented-object simulation system, created for simulation of building in transient conditions. TRNSYS allows us to get all physical data we need, with a good precision.

For each application (car, house, ..) we underline the specificity of the thermal condition, the experiments that have been done and the "interpreter" we developed. To analyze real conditions and their consequences, the number of variables has to be limited. We then develop "interpreter" to translate the great number of physical or/and physiological variables in terms that are easier to understand for a non usual user, that are local thermal sensations in building and local thermo sensorial judgments in cars.

For a human in unsteady complex conditions, this complete tool calculates all local physical, physiological and also perception data on each local body segments. We also get data that cannot be measured during any experiment that are all local heat flux through each mode of transfer separately, that leads to a better comprehension of coupling phenomenon, and also allows us to thing about a better dimensioning of technical equipment or regulation system that will take into account the demand of comfort of the human body.

KeyWords

Thermal transfer

House

Modelling

Thermophysiology

Cars

TRNSYS

SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

I. INTRODUCTION

I.1. Généralités

Le corps humain est un système thermique complexe, il produit de la chaleur et de l'eau qu'il doit évacuer dans son milieu environnant (Figure 1). La contrainte à laquelle il doit faire face est de maintenir sa température interne autour de 37°C, quel que soit le climat. Pour cela il utilise divers processus de *régulation physiologique* involontaires qui lui permettent de s'adapter à une gamme plus ou moins large de situations. C'est un système de thermorégulation performant qui module la production et les transferts de masse et de chaleur, internes et externes.

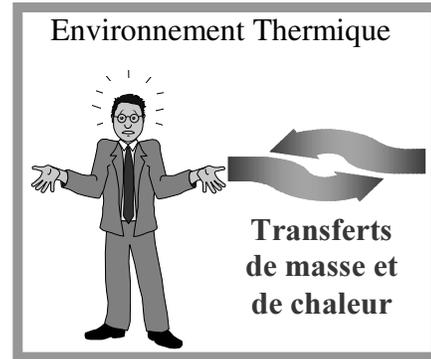


Figure 1 : L'homme et son environnement

Ces réactions ou astreintes physiologiques sont interprétées par le cerveau de façon subjective en faisant intervenir les préférences psycho-socio-affectives individuelles. L'homme les ressent comme des désagréments dont il essaie de limiter l'amplitude en développant des processus de *régulation comportementale*, soit par le vêtement, la posture, etc. pour faire face aux agressions climatiques de façon individuelle, soit par divers types d'enceintes artificielles, pour y faire face de manière collective (habitat et transport, individuel ou collectif, lieu de travail, etc.).

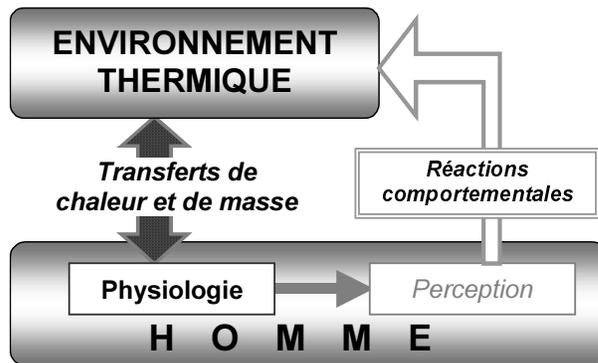


Figure 2 : Les interactions

La Figure 2 montre la boucle d'interaction entre l'Homme et son environnement. Les conditions thermiques optimales sont celles qui minimisent les astreintes physiologiques ressenties comme désagréables, sans qu'il développe des réactions comportementales. Pour procurer à l'Homme ces conditions optimales, il faut comprendre en détail son bilan thermique.

C'est donc le couplage entre ces deux systèmes thermiques, l'Homme et son environnement, qui est le cœur du problème. Tout mon travail de recherche se situe dans ce domaine. La notion de confort thermique comporte plusieurs composantes, le bilan thermique du corps humain, sa perception qui est la composante relativement objective et l'interprétation qui est la composante subjective. Nous nous intéressons essentiellement au bilan thermique du corps et aux composantes quantifiables même si les mots "confort et inconfort" sont utilisés comme termes génériques.

La recherche de conditions thermiques optimales est depuis toujours une importante source de développement scientifique et technique. Les systèmes de chauffage et de climatisation n'ont cessé de se perfectionner au cours des siècles, avec toujours un objectif double : procurer un confort maximal pour un moindre coût, mais les réactions comportementales de l'Homme peuvent contrecarrer les systèmes mis à sa disposition. On voit ici apparaître l'importance du confort dans la conception architecturale mais aussi sur les consommations énergétiques des bâtiments. Dans les années 70-80, l'homme a un peu perdu de vue que l'habitat était conçu pour lui procurer des conditions de confort, et ne s'est plus soucié que des problèmes d'énergie. Les thermiciens ont alors

développé des outils permettant de prévoir le comportement thermique d'une enceinte habitable, mais sans habitant, avec des lois simples leur permettant d'évaluer des situations de confort, à partir de quelques mesures physiques.

En France actuellement très peu de thermiciens travaillent dans le thème du confort thermique en tenant compte de la physiologie humaine [Dittmar 1995, Berger 1989] ⁽¹⁾. Quelques équipes étudient les transferts à travers les vêtements [Sari 1993, Fohr 1999] ou la thermique des nourrissons [Vuillerme 1999]. La thermo-physiologie est historiquement plutôt abordée par les psycho-physiologistes [Candas 1980, Grivel 1989]. D'autres équipes travaillent dans le domaine de la biothermie où il s'agit de liens entre la biologie et la thermique pour des problèmes plus spécifiques tels que : la thérapie, les brûlures, etc. [Balageas 1997].

I.2. Point de départ de l'étude

Le LESETH travaille depuis de nombreuses années sur la thermique de l'habitat (cf. Annexe "structure du Laboratoire) notamment à l'aide du logiciel TRNSYS - TRAnsient simulation SYstem. C'est un logiciel modulaire orienté objet dédié à la simulation du bâtiment [TRNSYS 1997]. Le laboratoire, qui fut l'un des premiers utilisateurs français en 1975, ne cesse d'en enrichir sa bibliothèque de modules en fonction des domaines d'études abordés.

Comme dans beaucoup de simulations de l'habitat, l'objectif était de calculer précisément les températures et les besoins énergétiques d'un bâtiment, selon le type de régulation utilisée, la consigne étant liée à la température d'air. Le besoin est apparu d'utiliser d'autres paramètres de consigne plus aptes à prendre en compte l'habitant.

Lorsque je suis arrivée au laboratoire, en janvier 1986, pour le stage de D.E.A., il m'a été proposé de créer et de tester modèle de "confortstat", c'est à dire une régulation utilisant l'indice PMV comme paramètre de consigne. Le P.M.V. (Vote Moyen Prévisible) et le P.P.D. (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits) sont deux indices de confort thermique liés entre eux. Ils ont été développés dans les années 1970 par Fanger, un physicien qui est arrivé à imposer sa façon de voir les choses. Ils ont été créés à partir d'une grande base de données expérimentales et du calcul d'un bilan thermique simplifié du corps humain en condition proche du confort [Fanger 1970]. Ces indices ont plusieurs atouts : ils peuvent être calculés simplement à partir de quelques données de l'ambiance et de l'individu, ils font partie des normes françaises et internationales et ils ont le mérite d'être le premier pas dans la prise en compte des exigences de l'habitant.

Bien que l'indice PMV soit utile, il a rapidement montré ses limites, qui sont directement liées à la méthode utilisée pour l'établir. En particulier il est inutilisable pour des conditions non isothermes et variables dans le temps ou éloignées de la zone où le confort est possible. Dans les normes il lui est donc adjoint des recommandations sur l'homogénéité de l'ambiance, et d'autres indices sont utilisés pour les ambiances chaudes ou froides, ce qui complique nettement le travail d'un concepteur.

Même si la simulation d'un habitat utilisant le "confortstat" semble procurer un meilleur "confort", ce système n'est pas satisfaisant [Thellier 1986]. Il nous est apparu que cette représentation du corps humain était trop simplifiée pour pouvoir analyser correctement les mécanismes thermiques mis en jeu.

Nous sommes partis de ce constat pour développer une approche permettant d'aboutir à une

1 Les références bibliographiques notées :
[.....] sont à la fin de ce texte,
[italiques] correspondent aux publications du LESETH sont dans l'annexe "liste des publications".
[soulignées] publications complètes données dans l'annexe "Publications significatives".

meilleure prise en compte des exigences de confort thermique de l'habitant. Pour pouvoir analyser le confort thermique il faut être capable de prédire l'évolution dans le temps et l'espace d'une ambiance thermique et ses effets sur l'homme. Plusieurs équipes de recherche sont arrivées à la même conclusion, mais le choix des méthodes a différé selon les sensibilités de chacun. En ce qui concerne le LESETH, nous avons toujours abordé cette étude en tant que thermiciens : nous nous sommes tournés vers une représentation plus fine du corps humain permettant le calcul précis de tous les échanges de chaleur locaux entre l'homme et un environnement thermique hétérogène. Ceci a été l'objet de ma thèse [Thellier 1989] et a constitué le point de départ de l'équipe "confort" du laboratoire.

II. POSITIONNEMENT DU PROBLEME

L'étude du confort thermique est interdisciplinaire ; pour avoir une approche complète, il faut travailler en permanence en collaboration entre des physiciens, des physiologistes, des psychologues et des sociologues. Les publications dans ce domaine sont très éparpillées, selon le thème principal de rattachement de chaque équipe, physiologie, ergonomie, médecine, recherche textile, physique, et il est parfois difficile d'avoir une vue d'ensemble. Etant physicienne de formation, il m'a d'abord fallu passer par une phase d'apprentissage du vocabulaire et des phénomènes de thermo-physiologie, ce qui n'est pas toujours aisé car les interlocuteurs sont divers et un même mot ne couvre pas toujours le même concept.

II.1. Rappels de thermo-physiologie

En ce qui concerne notre domaine de travail je définirai la thermo-physiologie comme étant l'ensemble des échanges de chaleur entre l'homme et son environnement thermique et la façon dont les phénomènes de thermorégulation interviennent dans la modulation de ces échanges.

a) Le bilan thermique

Pour rester en vie, l'homme doit maintenir sa température centrale autour de 37°C, pour cela il faut que le bilan thermique du corps reste proche de zéro ; c'est à dire qu'il doit perdre dans l'environnement la quantité de chaleur qu'il produit ou reçoit (Figure 3). Le bilan thermique peut être calculé pour le corps, dans son ensemble ou localement (jambes, mains, etc.).

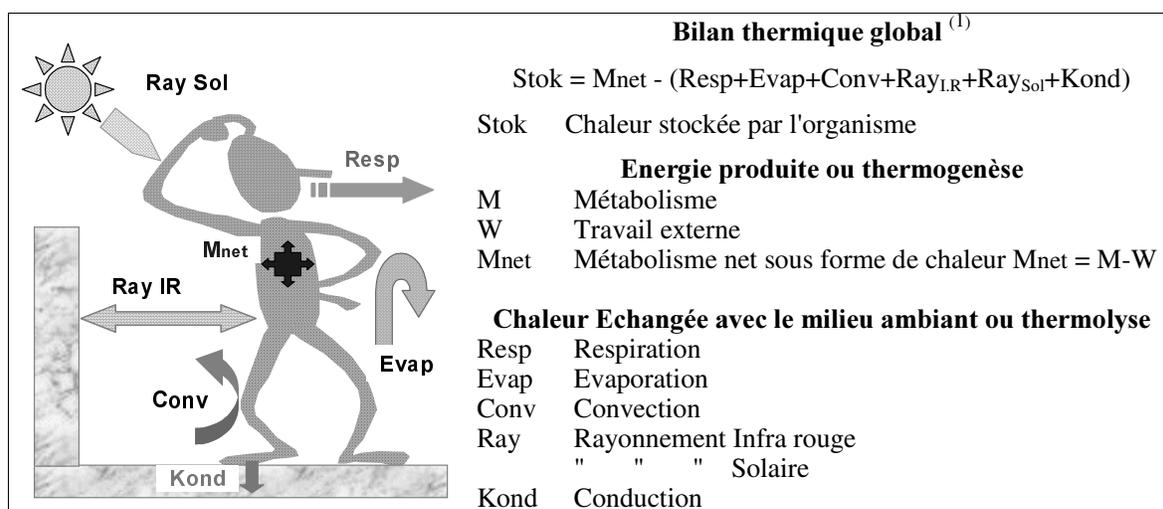


Figure 3 : Bilan thermique du corps humain

¹ Tous les flux sont exprimés en watts, ou en watt par mètre carré de surface cutanée.
L'aire cutanée dépend de la masse et de la taille du corps et varie pour un adulte de 1.5 à 2 m².
Le métabolisme est souvent exprimé en met : 1met = 58 W/m² (puissance produite par un individu assis au repos)

La production d'énergie ou métabolisme dépend surtout de l'activité et varie de 50 à 500 W/m². Une partie de l'énergie, qui est produite, essentiellement au centre du corps et dans les muscles, peut être transformée en travail mécanique, (au maximum 20 %). Le reste, ou métabolisme net, doit être évacué sous forme de chaleur. Les transferts du centre du corps vers la périphérie se font par conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine.

Les échanges de chaleur entre l'homme et son environnement se font par tous les mécanismes classiques de transferts, au niveau cutané et par les voies respiratoires [McIntyre 1980, Parsons 1993, *Theillier1989*].

Je ne décrirai pas en détails tous les modes de transferts. Ils dépendent des conditions thermiques donc des variables thermophysiques de l'ambiance (Tableau 1) : températures d'air (Tair) et des surfaces environnantes (Tsurf), vitesses d'air (Vair), pression de vapeur dans l'air (Pair).

Types d'échanges	Tair	Tsurf	Vair	Pair
Convection	XXX		XXX	
Rayonnement		XXX		
Conduction		XXX		
Evaporation			XXX	XXX
Respiration	XXX			XXX

Tableau 1 : Dépendance entre les transferts de chaleur et les paramètres de l'ambiance¹

Ces échanges dépendent aussi des données physiques de l'individu, essentiellement de surface, c'est à dire température et humidité de la peau. Les transferts cutanés dépendent évidemment de la présence éventuelle de vêtements, qui le plus souvent les diminuent. L'activité de l'homme intervient directement sur les échanges respiratoires. Toutes les données physiques et physiologiques sont variables dans le temps et dans l'espace.

Le bilan thermique peut être modifié par la *thermorégulation physiologique* qui est complexe et pilotée par le système nerveux central. On a l'habitude de représenter son fonctionnement en trois étapes :

- les thermorécepteurs périphériques et centraux envoient au cerveau des informations qui dépendent de l'état thermique du corps,
- ces informations sont comparées à des valeurs de consigne et intégrées,
- le système central détermine la commande générale et envoie des informations aux différents effecteurs. Si l'individu a chaud, le signal est donné à la vasodilatation² et à la transpiration³. Si l'individu a froid, il y a frissons⁴ et vasoconstriction⁵. Des effets locaux supplémentaires peuvent se produire.

Il faut noter que ces réactions sont limitées dans leur efficacité et dans leur durée et que, contrairement aux systèmes de régulation de certains mammifères, la régulation humaine ne fait pas de compromis : le but est de conserver à température constante les organes vitaux (cerveau, cœur, reins,...), ce qui peut se faire au détriment des organes périphériques (mains, pieds,...). L'homme peut décéder de déshydratation avant d'atteindre l'hyperthermie, ou peut avoir les extrémités gelées avant d'être en hypothermie.

Le bilan thermique peut également être modifié dans une beaucoup plus large mesure par la *thermorégulation comportementale* qui modifie, soit le climat, soit directement les échanges :

- 1 Pour un homme au repos (M=1met), nu. Ambiance thermo-neutre : Tair=Tsurf=29°C, HR=50%, Vair=0.1m/s
Convection \cong 34%, Rayonnement \cong 40% , Conduction \cong 0 % , Evaporation \cong 18 % , Respiration \cong 8%
- 2 *Vasodilatation* : augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins, d'où augmentation des échanges de chaleur entre le centre et la périphérie.
- 3 *Transpiration* : production d'eau à la surface cutanée , d'où augmentation des pertes de chaleur par évaporation.
- 4 *Frissons* : augmentation de la production de chaleur surtout dans les muscles.
- 5 *Vasoconstriction* : réduction du diamètre des vaisseaux sanguins, d'où réduction des échanges de chaleur entre le centre et la périphérie.

- régulation individuelle : changement de posture (modification de la surface d'échange), de vêtements (modification de la résistance aux transferts cutanés), d'activité (augmentation de la production de chaleur), ...
- régulation collective ou technique par la création d'enceintes artificielles pour recréer un micro climat plus modéré et propice au développement humain.

Il faut noter que les réactions physiologiques inconscientes ont pour but le maintien de l'homéothermie, et que les réactions comportementales conscientes sont guidés par des choix hédoniques. Ces deux modes de régulation peuvent avoir lieu simultanément mais être antagonistes

b) Equilibre, Neutralité, Sensation et Confort

Selon l'évolution du bilan thermique (Figure 4) on peut définir diverses zones. Les études de thermo-physiologie se rapportent le plus souvent à la zone d'équilibre thermique car en dehors il est plutôt question de survie

- L'équilibre thermique : zone où le bilan thermique est presque nul, grâce aux réactions de thermorégulation dont l'amplitude est d'autant plus forte que l'on s'éloigne d'une situation optimale. Dans des situations extrêmes l'équilibre peut être maintenu seulement pour une courte durée, on se trouve alors loin du domaine où le confort est possible. L'équilibre thermique peut être atteint pour le corps dans son ensemble ou localement.

- L'hypo et l'hyper thermie, sont les zones extrêmes où les réactions physiologiques ne sont plus suffisantes pour maintenir l'équilibre thermique et c'est la mort à plus ou moins court terme.

- La neutralité thermique ou thermo-neutralité est la zone où le bilan thermique peut être équilibré avec des réactions physiologiques minimales. La thermo-neutralité n'a de sens localement que si elle est atteinte pour le corps entier car les réactions physiologiques sont globales.

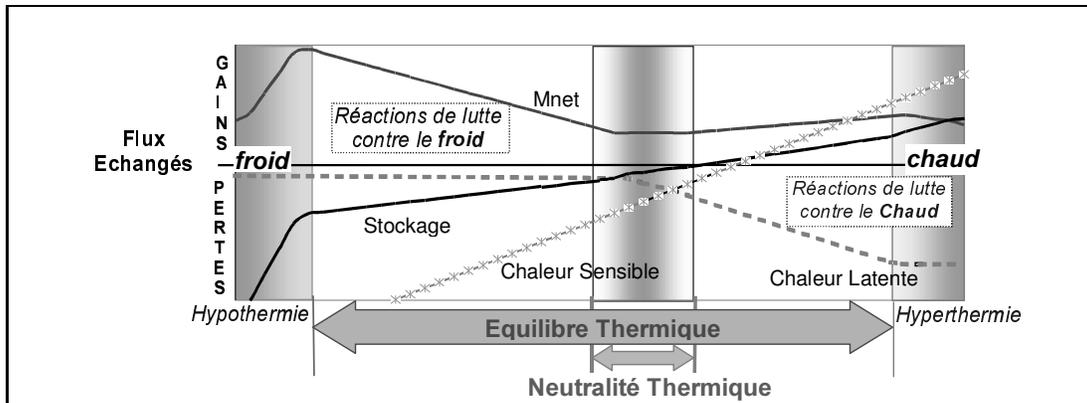


Figure 4 : Evolution du bilan thermique en fonction des contraintes thermiques

- Jugement thermosensoriel, tout jugement porté par un individu sur la perception de son état thermique, il peut être perceptif, évaluatif, préférentiel, [norme ISO] Il s'exprime selon plusieurs échelles, entre lesquelles il n'existe pas de relation directe.

- La sensation thermique, c'est une notion assez objective. Elle est liée à la perception des réactions physiologiques et des informations envoyées par les récepteurs. Elle est le plus souvent exprimée en termes liés aux échanges de chaleur (c'est froid, ... , c'est chaud). La sensation globale neutre (ni chaud ni froid) n'est possible que dans la zone de thermo-neutralité.

- Le confort thermique c'est un jugement évaluatif, qui comporte une composante psychosocio-affective qui est subjective et dépend des préférences de chaque individu. Il s'exprime sur une

échelle centrée sur le *confort* qui représente "l'état d'esprit où l'homme exprime la satisfaction des conditions thermiques".

Entre la sensation et le confort, il existe un lien qu'il est impossible de représenter sous forme d'équation, car ce passage fait appel à des processus encore inconnus et s'écarte de notre domaine de compétence de physiciens. Par la suite nous nous limiterons essentiellement aux notions objectives : sensation thermique.

D'après toutes les études, même si les conditions de thermo-neutralité sont à peu près les mêmes pour tous les individus, les conditions préférées peuvent être très différentes selon les habitudes de chacun. Pour qu'un système de chauffage soit jugé confortable par un individu, il faut qu'il lui procure non pas la thermo-neutralité mais ses conditions thermiques préférées, ce qui est beaucoup plus délicat.

Des conditions moyennes produisant un confort thermique global peuvent induire des problèmes locaux. Peut-on réellement parler de confort local ? Il semble plus adapté de parler d'inconfort local, car le plus souvent c'est en ces termes que l'individu s'exprime "je me sens globalement confortable mais j'ai un peu froid aux pieds".

La Figure 5 représente l'évolution du confort pour des ambiances proches des conditions thermo-neutres. On peut définir diverses zones :

- une zone centrale où le confort global et le confort local sont possibles,
- deux zones extrêmes où l'individu est nettement en situation d'inconfort global froid ou chaud. Il y a apparition de réactions physiologiques,
- entre ces zones, difficiles à délimiter clairement, se situent des zones de confort dégradé, vers le froid ou le chaud. Elles correspondent aux situations où apparaissent le plus souvent des problèmes locaux d'inconfort.

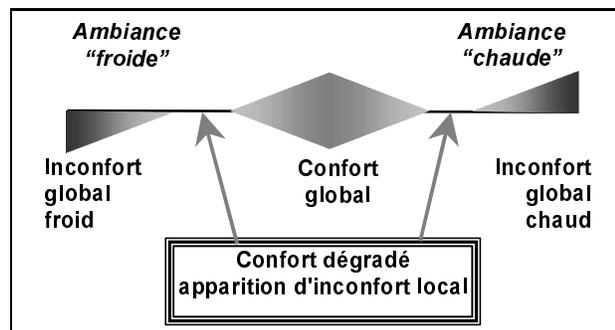


Figure 5 : "Confort ou Inconfort" selon l'ambiance

On ne sait pas actuellement comment passer du confort local au confort global. Peut-on dire que si toutes les parties du corps sont confortables l'individu déclarera un confort global ? Par contre, l'inverse paraît plus clair : si toutes les parties du corps sont inconfortables l'individu déclarera certainement un inconfort global.

L'inconfort local peut avoir diverses origines :

- Soit un environnement thermique local particulier entraînant des flux locaux très différents : courant d'air, soleil,...
- Soit des réactions physiologiques ; par exemple, si l'individu a légèrement froid, sans même qu'il en ait conscience, il peut y avoir un début de vasoconstriction qui diminue le flux sanguin et donc l'apport de chaleur dans les extrémités. Il se plaint d'avoir froid aux pieds ou aux mains, mais la cause principale de ce phénomène peut être ailleurs.

Il arrive bien souvent qu'un inconfort local soit dû aux deux causes simultanément. Un individu qui a chaud ne sent pas un courant d'air local, mais, s'il a frais, il ne supporte plus ce même courant d'air. Les inconforts locaux peuvent engendrer des problèmes qui dépassent une simple gêne, il faut donc avoir des méthodes performantes d'analyse ou de prédiction.

II.2. Les méthodes d'analyse des transferts thermiques

Lorsqu'on travaille avec des équipes interdisciplinaires, après la définition d'un vocabulaire commun, il faut se retrouver autour d'objectifs communs. L'homme étant un système thermique complexe avec des réactions non linéaires et mettant en œuvre une interprétation psychosociologique, peu de démarches permettent d'avoir une vision complète des phénomènes mis en jeu. Chaque équipe a ses préoccupations et il faut faire des compromis car tout ne peut pas être étudié en même temps. Ceci se retrouve nettement dans les méthodes d'études.

a) Les divers modes d'investigation

Le domaine de la thermo-physiologie est plutôt abordé par des physiologistes qui essaient de comprendre les mécanismes biologiques mis en jeu dans le bilan thermique du corps humain : pourquoi et comment l'homme développe-t-il des réactions physiologiques ?

▪ Les expérimentations sur l'être humain

Cette approche fournit un grand nombre de données qu'il est souvent difficile de traiter par la suite. Les différences inter et intra individuelles entre les réponses sont fortes, aussi, pour avoir des résultats significatifs, il faut travailler sur un nombre suffisant d'individus, puis faire un traitement statistique des données. On aboutit alors à des connaissances sur le comportement moyen de l'homme.

Les expériences en chambre climatique sont réalisées par des psycho-physiologistes, qui mesurent les variables physiologiques et utilisent des questionnaires de jugements thermiques. Leur but est de déterminer les mécanismes physiologiques et psychologiques mis en jeu. Ces expériences sont faites avec des sujets "calibrés", de façon à s'affranchir d'une partie des différences individuelles, et dans des climats le plus souvent homogènes et stationnaires. Les chambres climatiques sont des outils indispensables pour instrumenter et contrôler parfaitement l'ambiance, mais on sait pertinemment que ces conditions particulières jouent un rôle sur les déclarations subjectives des sujets.

Les enquêtes sur sites réels sont faites par des psycho-sociologues, ou les ergonomes, qui étudient un large panel de sujets. Le but est de comprendre les implications affectives dans les conditions réelles (bureaux, maison, etc.). Il y a alors très peu de mesures concernant l'être humain et les conditions thermiques. On peut en tirer des conclusions qualitatives mais rarement quantitatives car on manque en général d'informations sur le climat.

▪ Les mannequins thermiques

Pour mesurer les flux de chaleur on utilise des mannequins thermiques secs de forme humanoïde et parfois articulés pour pouvoir reproduire les mouvements (pédalage sur ergocycle, marche, etc.). Ces mannequins sont régulés en densité de flux ou en température de surface et utilisés en chambre climatique ou en site réel.

Lorsque la température de surface est maintenue à une valeur de consigne fixée, la mesure de la puissance de chauffage nécessaire permet de connaître les flux perdus en surface. Même si pour la plupart des mannequins les températures de consigne peuvent être différentes selon les segments corporels, ils sont en général régulés de façon isotherme et constante, ce qui peut induire des différences notables par rapport à la réalité, le corps étant loin d'être isotherme. (Les pieds peuvent avoir des températures de surface qui varient de 25 à 36°C alors que le tronc va de 33 à 36°C).

L'avantage de l'expérimentation sur mannequin par rapport à celle sur l'être humain est la reproductibilité des résultats et la souplesse d'utilisation. Son inconvénient majeur est qu'à l'heure, actuelle les mannequins sont secs et ne donnent donc accès qu'aux flux de chaleur sensible. Il faut faire attention aux conclusions que l'on peut tirer en ambiance chaude, où le corps humain dispose de l'évaporation comme unique moyen pour maintenir son bilan thermique équilibré.

- **La simulation numérique**

Avec le développement des outils informatiques, la simulation numérique est un moyen d'étude de plus en plus utilisé. Les physiologistes et les physiciens ont développé des outils spécifiques à leurs besoins.

- Les outils des physiologistes. Dans les années 1970 de nombreuses équipes, ont développé des modèles de compréhension de la thermorégulation humaine. Il en existe plus d'une centaine où le corps est subdivisé, selon les cas, de 2 à 250 compartiments.

- Les outils des thermiciens. Depuis longtemps les logiciels de thermiques calculent les conditions hygro-thermiques dans les bâtiments en tenant compte de l'être humain comme de tout autre composant du système, c'est à dire comme une simple source constante de chaleur et d'eau.

b) Evaluation des conditions thermiques

Une revue des méthodes les plus utilisées mène aux conclusions suivantes [Thellier 1997]. Peu d'études sont en cours dans le domaine de l'habitat et les principales avancées viennent de l'analyse de conditions fortement hétérogènes, particulièrement les transports (voitures, camions, grues,...), où les problèmes d'inconforts locaux se présentent de façon cruciale. En France peu de laboratoires travaillent dans cette thématique.

Les conditions climatiques sont souvent séparées en plusieurs catégories, homogène ou non-homogène, et stationnaire ou instationnaire. La norme ISO 7726 donne les définitions suivantes :

- "*Une ambiance est considérée comme homogène si les paramètres d'ambiance peuvent être considérés comme uniformes autour du sujet, c'est à dire lorsque les écarts entre chacune des grandeurs et leur valeur moyenne spatiale n'excède pas $\pm 5\%$* ". Trois points de mesure sont imposés à différentes hauteurs par rapport au sol, aucune indication n'est donnée pour la position dans un plan horizontal.

- "*Une ambiance est dite stationnaire si les grandeurs physiques par rapport au sujet sont pratiquement indépendantes du temps ; lorsque les fluctuations de chacune des grandeurs par rapport à leur valeur moyenne temporelle n'excèdent pas $\pm 5\%$* ". Aucune indication n'est donnée sur les temps à prendre en compte or il faut noter que la constante de temps du corps humain est d'environ 20 à 30 minutes.

On constate que des définitions plus rigoureuses sont à envisager car la frontière entre ces diverses catégories n'est pas si simple à définir. Un écart de $\pm 5\%$ sur une température ne signifie rien. Par contre un tel écart est inférieur à la précision de mesure que l'on peut avoir sur l'humidité relative.

- **Les conditions homogènes**

En conditions définies comme homogènes les méthodes d'évaluation du confort sont nombreuses et relativement simples. Il s'agit de méthodes de calcul ramenant à un indice unique les variables caractérisant l'individu et l'ambiance. La valeur de ces indices doit se situer dans une plage déterminée, permettant d'assurer un confort global à une majorité de personnes (PMV, WBGT, Tset, SET*, ...) [ASHRAE 1997]. Cette première approche peut être satisfaisante, mais ces indices ne peuvent être raisonnablement utilisés qu'en conditions thermiques homogènes et stationnaires : ces situations simples et idéales ne sont pas si courantes. Certains utilisent localement ces indices globaux, ce qui peut être très contestable (mesure du PMV des pieds [Lin 1992]).

- **Les conditions hétérogènes**

Dans les environnements plus hétérogènes, on ne peut plus se limiter alors à la notion de confort global et de nombreuses études sont publiées sur les diverses causes de l'inconfort local. Les résultats sont donnés sous forme de courbes ou d'expressions mathématiques reliant une ou plusieurs variables physiques à un jugement thermique. En général, le nombre de personnes

insatisfaites est déterminé grâce à des votes exprimés par des sujets soumis à une cause principale d'inconfort mais dans une ambiance thermo-neutre. Les conclusions qui en sont issues sont des recommandations sur des paramètres physiques afin de limiter les risques d'inconfort. Ce sont des valeurs limites sur des variables, soit mesurables directement (température de sol, ... [norme ISO]), soit issues de calcul (température équivalente locale [Holmer 1995, Maué 1997]). Ces méthodes ne sont pour la plupart utilisables qu'en régime établi.

D'autres méthodes consistent à considérer que l'inconfort est lié aux sensations thermiques locales, ces dernières étant directement reliées aux grandeurs physiologiques locales. Plusieurs relations permettent le calcul de ces sensations [Galéou 1991, Candas 1995, Grivel 1989]. Pour les utiliser, il faut alors disposer des variables thermophysiques locales indiquant l'état thermique du sujet : températures cutanées locales,...

▪ **Les conditions instationnaires**

Très peu d'études portent sur des ambiances instationnaires. Les rares recommandations que l'on peut trouver portent, par exemple, sur des écarts maximums de température entre deux locaux pour un individu qui se déplace. Les expériences sont souvent faites avec des échelons de climat, mais les analyses s'intéressent plutôt aux paliers de part et d'autre. Il semble que le corps humain ait des temps de réaction d'autant plus courts que la contrainte est élevée.

Toutes ces études peuvent permettre de comprendre les causes de l'inconfort mais ne peuvent en aucun cas être utilisées de façon simple. Il arrive bien souvent qu'un inconfort local soit dû simultanément à des causes physiques et physiologiques. Aucune corrélation n'existe pour traiter les cas où diverses causes d'inconfort se conjuguent, ou bien lorsque la personne se trouve déjà en situation de confort dégradé. Comme nous l'avons souligné plus haut le corps est un système complexe et régulé. Tant que l'on reste dans la zone de neutralité thermique, on peut faire abstraction des conséquences de la thermorégulation. Il est difficile de ne pas en tenir compte dès que l'on s'éloigne de cette zone, qui est très étroite. Or, une même astreinte thermo-physiologique peut être causée par infinité de combinaisons des divers paramètres d'ambiance. Il est impensable de toutes les cataloguer ; il faut donc pouvoir calculer simultanément les conditions thermiques locales et leurs effets locaux sur le corps humain.

II.3. Conclusions

Au cours des recherches bibliographiques, il est apparu que les physiologistes font des recherches poussées pour comprendre les phénomènes biologiques mais que dans la quasi-totalité des études, les transferts superficiels sont traités de façon très sommaire. Pour calculer les échanges de chaleur entre le corps et son environnement il faut connaître les conditions aux limites des deux cotés avec une bonne précision. C'est à dire non seulement les variables physiques de l'ambiance, mais aussi celles de surface du sujet. Les problèmes identifiés, dont je donne ici un rapide aperçu, sont les suivants :

- Les flux sensibles sont calculés par l'expression : $\Phi_{\text{sensible}} = h_c \cdot (T_s - T_{\text{air}}) + h_r \cdot (T_s - T_{\text{mrt}})$ ⁽¹⁾ ou dans certains cas $\Phi_{\text{sensible}} = h_o (T_s - T_{\text{op}})$. On voit bien que même si "*le concept de température opérative moyenne permet de simplifier l'étude, il présuppose de l'identité sur l'homme de l'environnement réel généralement hétérogène et de l'environnement virtuel défini comme homogène.*" [norme ISO 7726]. L'utilisation de cette température n'a de sens que pour des climats homogènes. Par exemple dans les chambres climatiques où $T_{\text{air}} = T_{\text{mrt}} = T_{\text{op}}$, cette valeur est mesurée à proximité du sujet et contrôlée par le système de régulation de la chambre. Pour analyser des situations réelles il faut calculer séparément les échanges sensibles.

1 h_c, h_r, h_o coefficients de transfert par convection, par rayonnement et global $h_o = h_c + h_r$
 T_s température de surface du sujet au niveau cutanée ou à la surface des vêtements
 T_{op} température opérative $T_{\text{op}} = (h_c T_{\text{air}} + h_r T_{\text{mrt}}) / (h_c + h_r)$
 T_{mrt} température moyenne de rayonnement qui dépend de celles des surfaces environnantes

- En ce qui concerne les flux radiatifs, le coefficient h_r est presque toujours considéré comme constant, obtenu par linéarisation de l'expression des flux nets radiatifs en conditions thermo-neutre pour un individu nu et debout. Or ce coefficient varie dans une large gamme en fonction de nombreux facteurs : la présence de vêtement, la posture, etc. Aucun calcul ne prévoit le cas où les émissivités des surfaces sont nettement plus faibles (vitre avec un revêtement particulier, couverture de survie, par exemple). Il faut noter qu'à de rares exceptions près [Gouet 1995], les échanges radiatifs sont mal traités alors qu'ils représentent une part importante des échanges de chaleur.

- Pour les transferts convectifs, le coefficient d'échange ne dépend le plus souvent que de la vitesse d'air par une loi non réaliste, car si la vitesse est faible ce coefficient tend vers zéro. Dans certaines expressions on voit apparaître le cas où les échanges sont dus à de la convection naturelle, h_c est alors fonction de T_s et T_{air} . Ce coefficient h_c doit être connu avec une bonne précision car il intervient également dans les échanges par évaporation.

- Les pertes évaporatoires dépendent de la mouillure cutanée et du pouvoir évaporatoire de l'ambiance. La mouillure dépend des réactions de thermorégulation et peut être très hétérogène à la surface de la peau. Le pouvoir évaporatoire est fonction du coefficient d'échange convectif et de l'écart de pression de vapeur entre la peau et l'ambiance proche. Il faut noter que la chaleur de vaporisation de l'eau est forte et, par conséquent, une mauvaise estimation de la mouillure entraîne des erreurs importantes sur le bilan thermique.

- Les apports solaires ne sont jamais abordés.

- Les échanges avec un milieu solide sont rarement pris en compte car les besoins ne se sont pas fait sentir.

- Les échanges à travers les vêtements sont le plus souvent calculés grâce à une valeur globale. Les effets locaux des vêtements sont peu étudiés et leur comportement hydrique est mal connu.

III. NOTRE DEMARCHE

III.1. Généralités

Toutes ces études précédemment citées, nous ont poussé à aborder l'analyse des conditions thermiques par un calcul précis des transferts locaux de masse et de chaleur au niveau cutanée. Il paraît évident qu'une solution adaptée est l'utilisation de la simulation numérique. Un modèle de thermorégulation humaine est alors indispensable pour prédire et analyser les comportements thermiques fortement couplés et non linéaires de l'homme dans des environnements variés et complexes. Nous avons choisi cette direction depuis le début. La majorité des développements a été faite dans le logiciel TRNSYS qui a l'avantage d'avoir une structure modulaire avec une large bibliothèque de modules existants ce qui nous permet de représenter une partie des environnements thermiques.

Dans un premier temps il a fallu choisir le modèle de thermo-physiologie car il n'était pas dans nos compétences d'en développer un. Puis nous avons développé divers outils pour calculer avec précision les transferts locaux de chaleur, ou pour prendre en compte certaines interfaces, telles que les vêtements ou les solides. Au cours du développement des modèles il y a eu une validation permanente de nos résultats par des expériences. Nous avons été confrontés à des problèmes de métrologie, spécifiques au domaine de la thermo-physiologie.

Les environnements étudiés ont été abordés à l'occasion de contrats industriels : l'habitat, puis le scaphandre spatial et enfin l'automobile. Les outils que nous avons développés sont adaptables aux diverses situations. Pour chaque étude la même démarche a été suivie (Figure 6) :

- Analyse des spécificités des conditions thermiques pour mettre en évidence les hétérogénéités et les points à traiter.
- Calcul fin de chaque type d'échange en fonction des hypothèses posées.
- Modifications éventuelles du modèle de thermo-physiologie.
- Développement d'une interface capable de traduire les données physiologiques et/ou physiques en variables utiles dans le domaine traité.
- Confrontation avec des résultats expérimentaux pour établir puis valider les modèles.

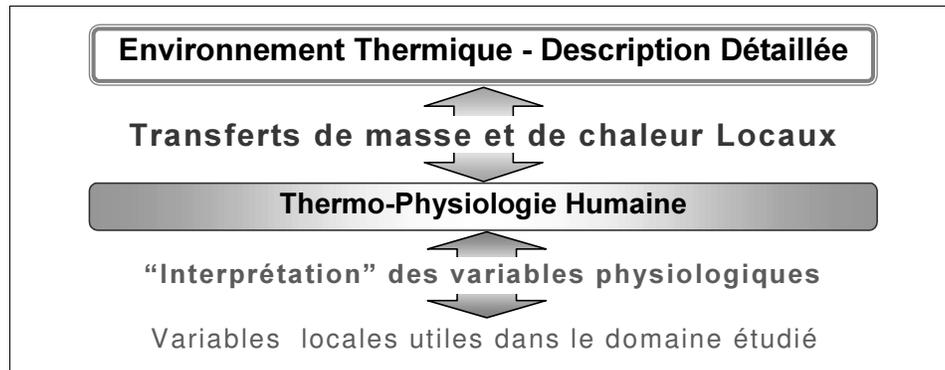


Figure 6 : Schématisation de notre démarche

III.2. Les modèles de thermo-physiologie

a) Critères de choix du modèle

Parmi les nombreux modèles de thermo-physiologie, il a fallu en choisir un qui soit utilisable et adaptable facilement à de nombreuses conditions environnementales. Si la représentation des phénomènes physiologiques est suffisamment robuste pour tenir compte des changements d'environnement, on peut alors affiner la représentation de la partie purement thermique, c'est à dire le mode de calcul des transferts de masse et de chaleur.

Dans un premier temps, j'ai déterminé les quelques critères de sélection suivants :

- La physiologie humaine doit être représentée par un modèle de connaissance prenant en compte les phénomènes prépondérants et utilisant les paramètres susceptibles d'être modifiés par les conditions extérieures. Les modèles de type boîte noire ne sont pas utilisables.
- Le nombre de segment doit être suffisant pour pouvoir aborder les problèmes d'inconforts locaux en situations thermiques hétérogènes. Les grands segments corporels doivent être représentés.
- Le modèle doit être « maniable » par un non physiologiste, ce qui suppose une certaine simplification des phénomènes qui ne sont pas prépondérants dans le domaine d'étude. Les modèles à trop grand nombre de compartiments ne sont pas utilisables.
- Les variables physiologiques calculées doivent être des données mesurables expérimentalement pour pouvoir le valider correctement le modèle.
- Toutes les données du modèle doivent être disponibles dans la bibliographie : paramètres, et conditions de validation. Les modèles peu utilisés ou mal documentés sont à exclure.
- Le modèle doit donner accès à toutes les variables physiologiques représentant à tout instant l'état thermique global et local du corps humain, pour pouvoir lui associer des indicateurs qui permettent d'avoir une approche directe des conséquences de l'astreinte thermique, telle que l'exprimerait l'homme.

b) Le modèle multi-nœuds

Au début de ma thèse j'ai fait une étude bibliographique des modèles existants et mon choix s'est porté sur le modèle de thermorégulation humaine multi-nœuds de Stolwijk et Hardy [1970] qui répondait aux critères que j'avais fixé. C'est un modèle mis au point pour la NASA et qui est reconnu par la communauté des thermo physiologistes [Parsons 1993, Werner 1993]. Lorsque nous avons abordé d'autres environnements, la question s'est de nouveau posée pour le choix éventuel d'un autre modèle. Il s'est avéré que le premier choix était le bon. La quasi-totalité du travail effectué au LESETH dans le domaine de la thermique de l'homme est basé sur ce modèle que nous avons adapté à chaque situation rencontrée.

L'être humain est modélisé par deux sous systèmes (Figure 7) : le *système régulé* et le *système de régulation*. Le corps est divisé en 25 compartiments ou nœuds isothermes. Les 6 segments sont divisés en 4 couches concentriques selon une représentation sphérique pour la tête, ou cylindrique pour les autres segments. Le sang est représenté par le 25^{ème} compartiment, qui est le seul "lien thermique" entre les segments.

Le bilan thermique de chaque compartiment du *système régulé* est effectué en tenant compte de tous les transferts de masse et de chaleur. Les réactions physiologiques en sont déduites par le *système de régulation*, celui ci fonctionne sur le principe cité précédemment. Les températures prises en compte sont celles de la peau et du centre de la tête, correspondant à l'hypothalamus. Les effets qui en découlent sont les frissons, la transpiration et la vasomotricité. Les réactions du *système de régulation* interviennent directement sur la production ou les échanges de chaleur et modifient donc le bilan thermique du *système régulé*.

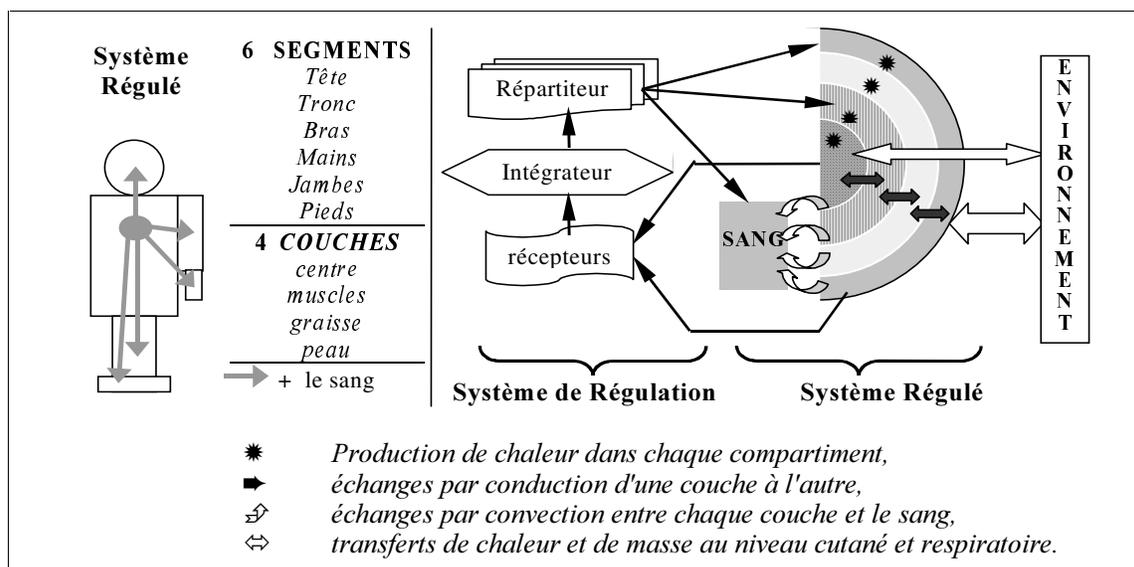


Figure 7 : Composition du corps humain dans le modèle de thermo-physiologie

Au cours du temps j'ai acquis des compétences en thermo-physiologie mais, dès le départ j'ai considéré que les bases de physiologie de ce modèle étaient suffisamment "fiabiles" pour ne pas y toucher. Toutefois, quelques modifications ont dû être faites sur les paramètres internes, toujours en accord avec des physiologistes ou des médecins.

Dans un premier temps j'ai implanté le modèle d'origine dans le logiciel TRNSYS. J'ai tout d'abord dû régler des problèmes de convergence et de compatibilité entre le pas de temps de résolution interne du modèle, qui est faible (de l'ordre de la minute) et celui utilisé pour la simulation du bâtiment (de l'ordre de l'heure). Le pas de temps interne est faible car les réactions de

thermorégulation peuvent être rapides, même si la constante de temps du corps entier est d'environ 20 à 30 minutes.

Le modèle de base qui possède 6 segments a été adapté et en comporte 7, 8 ou 11, suivant les besoins, pour tenir compte des asymétries : droite-gauche et/ou avant-arrière. Quel que soit le nombre de segments les flux de chaleur cutanés locaux doivent être connus pour chaque segment. Dans tous les cas, le modèle détermine, au niveau local, tous les variables thermo-physiologiques de l'individu (températures et mouillures cutanées locales, eau transpirée, ...) en fonction des conditions thermiques auxquelles il est soumis (Figure 8). Ces conditions sont évidemment variables dans le temps.

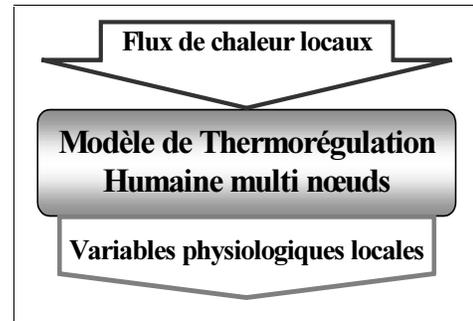


Figure 8 : Entrées - Sorties du modèle de Thermorégulation

Ce modèle a été conçu à l'origine pour comprendre les mécanismes physiologiques ; il a été construit et validé grâce à des expériences en chambre climatique quasiment toujours isothermes en température d'air et de murs et avec des individus nus. Il fallait donc étendre son champ d'application.

Mon travail s'est situé autour d'une meilleure description des transferts de chaleur et de masse entre le corps non isotherme et l'environnement hétérogène. Une étape importante a été de reprendre les calculs des divers types d'échanges et de les modifier. Les problèmes identifiés sur le calcul des transferts sont principalement ceux décrits plus haut, que l'on trouve dans la quasi-totalité des études de thermo-physiologie ; le sujet est nu et l'environnement thermique est décrit par quatre variables identiques sur tous les segments : T_{air} , T_{mrt} , P_{air} et V_{air} . Les échanges conductifs et les apports solaires sont absents.

c) Le modèle à deux nœuds

Si l'ambiance est relativement homogène mais instationnaire et que l'on désire faire une analyse plus globale des conditions thermiques, le modèle multi-nœuds est trop lourd à gérer, car il nécessite un nombre important de données. Nous avons également utilisé et développé le modèle de Gagge [1973], qui est un modèle de thermorégulation humaine à deux nœuds, le noyau et la peau. Son principe de fonctionnement est identique au modèle de Stolwijk, dont il est dérivé.

Dans la littérature la plupart des études, résultats et valeurs de paramètres sont données pour le corps entier, par exemple, pour les vêtements il s'agit d'isolement vestimentaire global. Nous avons donc testé les modèles de transferts de chaleur (voir paragraphes suivants) sur le modèle de Gagge, avant de les implanter sur le modèle multi-nœuds, pour valider nos résultats.

III.3. Les modèles de transferts de chaleur

Pour calculer les transferts au niveau cutané, il faut connaître l'environnement thermique à proximité. Je défini comme environnement thermique tout ce qui se situ au delà de la surface cutanée, celle ci étant caractérisée par sa température et le débit de sueur produit en surface. On a en fait 3 configurations possibles (Figure 9)

- soit la peau est nue, et les échanges se font avec l'environnement thermique dit "lointain"
- soit la peau est vêtue et les échanges cutanés se font aux travers des vêtements, puis de la surface des vêtements à l'environnement "lointain".
- soit enfin la peau est en contact avec un milieu solide et les transferts se font directement avec ce milieu.

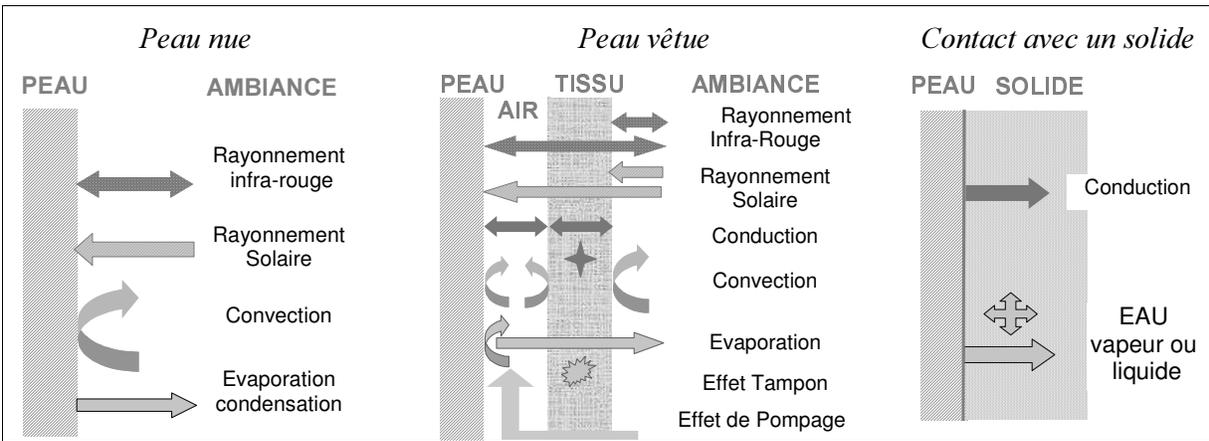


Figure 9 : Configurations à la surface de la peau

Il faut noter que dans la majeure partie des situations, on peut avoir simultanément les trois configurations au niveau du corps, sur divers segments, par exemple un individu vêtu et assis. Il y a alors de fortes hétérogénéités spatiales des conditions thermiques à la surface de la peau.

Le corps modélisé par le Stolwijk était nu, or tous les échanges cutanés sont totalement à modifier s'il y a des vêtements. Il a fallu, dans un premier temps, ajouter les vêtements et également d'autres interfaces particulières que l'on rencontre dans la plupart des environnements thermiques. C'est le cas des contacts avec un milieu solide.

a) Les transferts à travers les vêtements

Le vêtement est un système thermique difficile à modéliser. C'est l'interface de tous les transferts entre la surface cutanée et le milieu extérieur (Figure 10). La complexité des transferts de masse et de chaleur dans les vêtements, provient du fait que les deux phénomènes sont couplés en cas d'absorption, d'adsorption ou de désorption d'eau (effet tampon).

La difficulté augmente lorsqu'on considère que la couche d'air entre la peau et le tissu peut circuler. L'air, qui entre et sort par les ouvertures du vêtement ou à travers les tissus, joue un rôle important dans les transferts (effet de pompage et convection sous-vestimentaire). Il ne suffit pas de connaître les propriétés du tissu, la coupe du vêtement a aussi une influence, de même que la superposition des tissus. Cette géométrie floue et variable avec les mouvements du corps ajoute à la difficulté de chiffrer les flux de chaleur et de masses d'eau évaporées.

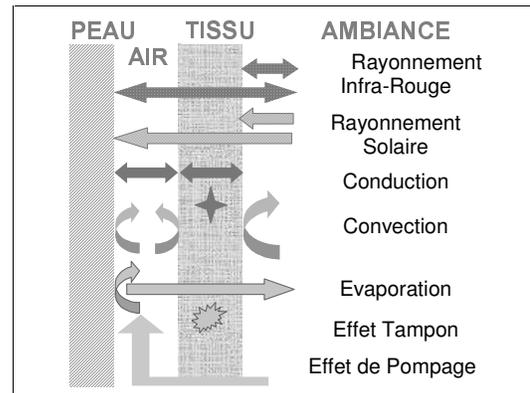


Figure 10 : Transferts dans les vêtements

Les mesures d'isollements vestimentaires sont, le plus souvent, faites sur mannequins secs isothermes et aboutissent à des valeurs de résistances thermiques, exprimées en $\text{Clo}^{(1)}$ pour tout le corps. Pour calculer les échanges locaux, nous avons besoin des caractéristiques hygro-thermiques locales ; par exemple sur le bras, la résistance due à la chemise plus le pull. Ces données sont rares, bien que du travail ait été fait par plusieurs équipes [Lotens 1996, McCullough 1985].

Dans un premier temps j'ai fait un modèle simple de vêtement se composant d'une résistance

1 Clo : unité d'isolement vestimentaire global, qui correspond à une résistance uniformément répartie sur tout le corps. $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ tenue complète d'hiver pour l'intérieur.

aux transferts de masse et de chaleur, les deux modes de transferts étant découplés. Il a tout de même fallu déterminer les valeurs locales de résistances thermiques, les propriétés associées aux transferts de vapeur y étant reliées. Ce modèle simplifié de la tenue vestimentaire peut être suffisant dans des conditions thermiques qui ne varient pas beaucoup, mais il devait être amélioré pour pouvoir prendre en compte de manière détaillée les régimes transitoires.

Le tissu qui compose les vêtements est un milieu fibreux non isotrope. Le sens des fibres favorise un sens de migration de l'eau et de la chaleur ; ces caractéristiques étant mal connues, nous avons considéré ce milieu comme isotrope et homogène. Le vêtement est alors représenté par une couche de tissu et une couche d'air qui peut être mobile. Des représentations de plus en plus complexes sont venues s'ajouter pour tenir compte de l'effet de pompage, de l'effet tampon et du couplage entre transferts de masse et de chaleur au cours de la sorption d'eau dans les tissus. Avant d'être couplé au modèle humain multi-nœuds, le modèle de transferts à travers les vêtements a d'abord validé sur le modèle de Gagge. Ces premiers développements ont fait l'objet d'une thèse [Derbel 1990].

Des études complémentaires ont été faites au laboratoire, au cours de plusieurs stages de D.E.A. : variation de la résistance thermique en fonction de l'humidité [Levezac 1991], transparence du tissu au rayonnement infrarouge et visible, etc. Des travaux expérimentaux ont été réalisés sur la ventilation sous vestimentaire pour visualiser, à l'aide du banc d'interférométrie holographique, les écoulements d'air entre une plaque chaude humide et un tissu tendu à une distance variable [Van de Steene 1995, Lartigue 1997].

Des améliorations au modèle de vêtements ont été faites au fur et à mesure des problèmes rencontrés et des besoins. Actuellement, il est composé d'une couche de tissu perméable et d'une lame d'air. Le modèle prend en compte les phénomènes suivants :

- L'effet tampon, stockage d'eau dans le tissu, sous forme liquide ou vapeur.
- Le couplage entre les transferts de masse et de chaleur, lié à la chaleur de sorption et en fonction du taux de reprise des divers tissus.
- L'effet de pompage, l'air entrant à température et humidité de l'extérieur. Un problème se pose pour la détermination des débits sous-vestimentaires locaux, qui dépendent des mouvements et de la porosité du tissu. Peu de données existent dans la littérature selon les situations nous avons dû les estimer. Ils dépendent donc de l'activité ou de la vitesse d'air en surface.
- La transparence au rayonnement visible et infrarouge.

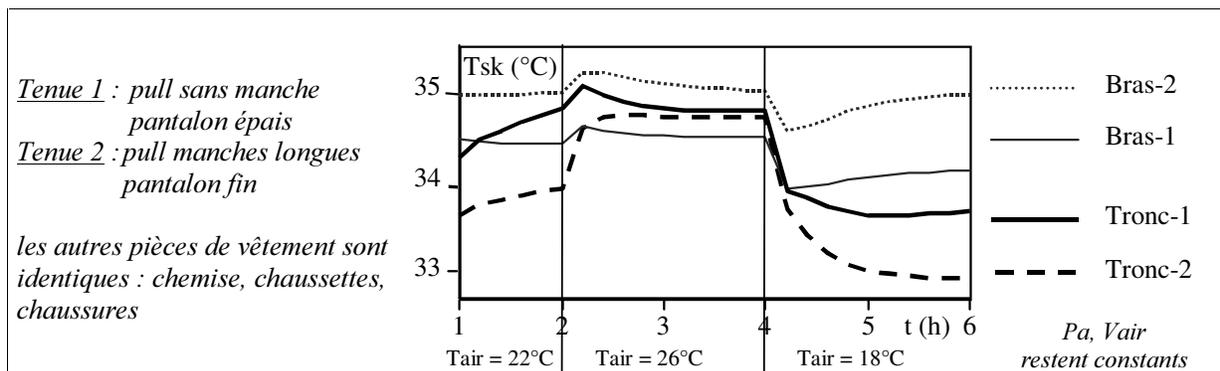


Figure 11 : Températures cutanées locales avec deux répartitions différentes de vêtements

La prise en compte des effets locaux des vêtements est indispensable pour le calcul des bilans thermiques locaux, comme le montrent les résultats des modèles sur la Figure 11. Un sujet est soumis deux fois au même climat, variable en créneau, avec deux tenues vestimentaires ayant le même isolement global de 1 Clo, mais des répartitions locales différentes. Ceci entraîne des

températures cutanées locales différentes, même si la température cutanée moyenne reste environ identique.

b) Les transferts de chaleur à la surface cutanée ou vestimentaire

Les transferts de chaleur entre l'homme et son environnement dit "lointain", se font soit directement au niveau cutané en l'absence de vêtements, soit à la surface de ceux-ci. S'il y a des vêtements les flux locaux cutanés sont calculés par le modèle de vêtements.

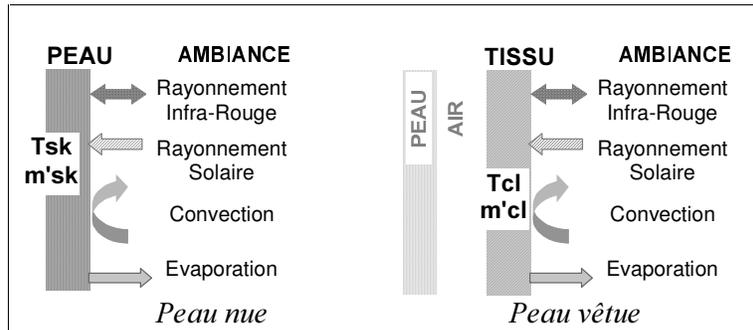


Figure 12 : Transferts de chaleur avec l'environnement "lointain"

Dans le modèle d'origine les flux de chaleur sensible sur chaque segment nu, à température T_{sk} étaient calculés par l'expression : $\Phi_{sensible} = h_c(T_{sk} - T_{air}) + h_r(T_{sk} - T_{mrt})$. Les coefficients de transfert étant différents pour chaque segment. Les h_r sont des constantes, les h_c ne dépendent que de la vitesse d'air, les températures d'air (T_{air}) et de rayonnement (T_{mrt}) étant les mêmes sur tous les segments. Si on veut analyser des situations hétérogènes il faut être capable de calculer plus finement les échanges sensibles locaux.

- **Les échanges radiatifs infrarouges**

Les échanges radiatifs jouent un rôle important dans le bilan thermique du corps mais sont souvent peu traités car un grand nombre de paramètres interviennent. Evidemment les températures de surface du corps humain et de l'environnement, mais également toutes les composantes géométriques : la posture en particulier. Dans le cas où l'individu est assis, une partie des échanges sont faibles, car ils ont lieu d'un segment corporel à un autre ayant une température proche. Ce phénomène est pris en compte dans les calculs globaux par le coefficient de surface effective rayonnante vers l'extérieur. Pour faire une analyse des flux locaux, ce procédé n'est pas envisageable.

Beaucoup de précautions ont été prises pour calculer les échanges radiatifs qui peuvent être très hétérogènes et sont par conséquent souvent à l'origine des problèmes d'inconfort locaux. Les flux radiatifs entre chaque segment du corps et les surfaces environnantes sont calculées par la méthode des radiosités. Il faut au préalable définir les surfaces, ou groupes de surfaces, que l'on peut considérer comme isothermes. En ce qui concerne le corps se sont les segments corporels définis dans le modèle de thermo-physiologie. Pour l'environnement, seule une analyse détaillée de chaque situation thermique permet ce découpage.

Pour calculer les flux nets échangés, il faut connaître les facteurs de forme entre les différents groupes de surfaces isothermes. Selon les applications diverses méthodes ont été utilisées. Celle développée au LESETH est basée sur la méthode de Monte-Carlo. Pour cela je suis partie d'un module existant qui calculait les échanges dans une pièce vide, j'ai ajouté les effets de masques et inclus la représentation du corps, qui se décompose en 18 surfaces planes. L'individu peut se déplacer dans le local. Deux descriptions du corps sont possibles : debout ou assis.

Une analyse des hétérogénéités et des asymétries des flux rayonnés dans une pièce d'habitation, a été faite plus en détail au cours d'un D.E.A. [Zely 1989]. Nous avons démontré qu'en situation très hétérogène ce calcul fin est indispensable [Thellier 1994].

- ***Les échanges convectifs***

Les coefficients de convection étaient uniquement fonction de la vitesse d'air moyenne et tendaient vers zéro pour des vitesses d'air faibles, ce qui ne semble pas réaliste car, très souvent l'écoulement de l'air est dû à la convection naturelle dont il faut pouvoir tenir compte. Deux situations ont été étudiées :

– Dans le cas d'un local peu ventilé, où l'ensemble de l'écoulement sur le corps est dû à la convection naturelle ; les coefficients d'échange dépendent de la posture et également du type d'activité du sujet, car, dans ce cas, les vitesses d'air relatives dépendent des mouvements. Les expressions utilisées sont celles de la littérature.

– Dans le cas d'écoulement forcé ; les coefficients d'échange dépendent des vitesses d'air locales sur chaque segment, qu'il faut alors connaître. Si les vitesses sont très hétérogènes et si, sur un des segments la vitesse est faible, ce coefficient est alors borné par une limite inférieure qui dépend de la localisation.

- ***Les pertes par évaporation***

Les pertes de chaleur par évaporation dépendent de la mouillure cutanée ou de la quantité d'eau présente dans le tissu et du pouvoir évaporatoire de l'ambiance.

- La mouillure cutanée est un indicateur de la quantité d'eau se trouvant sur la peau, elle dépend de l'eau transpirée à un instant donné et de l'eau résiduelle, qui n'a pas encore été évaporée. L'eau produite dépend totalement des réactions physiologiques et peut être très hétérogène à la surface de la peau. Les mouillures cutanées locales sont données par le modèle de thermorégulation.

- La quantité d'eau dans le tissu est déterminée par le modèle de transferts dans les vêtements.

- Le pouvoir évaporatoire de l'ambiance est fonction du coefficient d'échange convectif et de l'écart de pression de vapeur entre la surface, peau ou tissu, et l'ambiance proche. La pression de vapeur en surface correspond à la pression de vapeur saturante à la température de la surface du segment considéré. En ce qui concerne la pression dans l'air, nous avons toujours considéré que l'air est suffisamment brassé et les méthodes de mesure ou de calcul pas assez précises pour prendre des valeurs différentes sur chaque segment. Cette hypothèse est suffisante pour les climats tempérés où le pouvoir évaporatoire est grand et limite rarement l'évaporation, mais elle peut poser des problèmes en climats chauds, lorsque l'écart de pression peau-ambiance devient faible.

- ***Les apports solaires***

Ces apports sont très rarement pris en compte. Or, dans la réalité, ils sont souvent mis en causes dans des problèmes d'inconfort locaux, car les flux peuvent être importants. Il ne s'agit là que de flux reçus qui dépendent du climat. Dans le cas réel, il faut calculer divers facteurs tels que la course du soleil (module existant dans TRNSYS), la position de la tache solaire entrant dans un local et intercepté par le corps [Belmasjor 1996]. Le calcul des flux incidents nécessite également des données purement géométriques, telles que la représentation du corps, qui est la même que celle des échanges infrarouges. Les flux incidents, sont répartis sur toute la surface du segment. L'absorption dépend de la surface du corps : couleur de la peau ou des vêtements [Derbel 1990].

c) Les transferts vers un milieu solide

Les transferts entre le corps humain et un milieu solide est un des phénomènes les moins étudiés. Ils sont rarement pris en compte car les besoins ne se sont pas fait sentir. Au cours des expériences, les sujets sont le plus souvent assis sur des chaises en grillage ou allongés dans des hamacs en filets qui modifient peu les échanges convectifs et radiatifs. Lorsqu'ils sont pris en compte, les solides (exemple un fauteuil) sont comptés comme un vêtement très épais. Les rares études qui portent sur le contact avec un milieu solide ont plutôt pour but de déterminer des corrélations entre le type de matériau, sa température et le temps au-delà duquel il y a apparition de douleur ou de brûlure [Parsons 1993].

Dans les calculs de bilan thermique, on considère souvent que les surfaces en contact (pieds, mains) sont suffisamment faibles pour ne pas modifier ce bilan de façon notable. Ceci peut être vrai pour le bilan global, mais ne l'est plus pour un bilan local.

Les transferts peuvent varier dans une large gamme en fonction des propriétés thermiques et hydriques du matériau, de sa température, etc. Comme pour les transferts dans les vêtements il peut y avoir un couplage entre les transferts de masse et de chaleur (Figure 13).

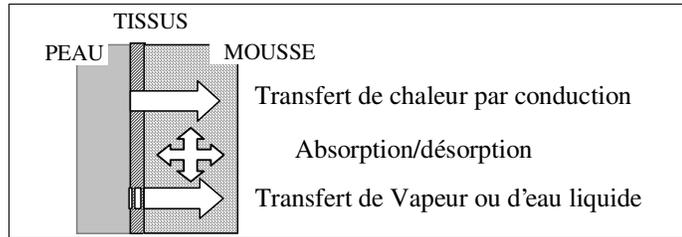


Figure 13 : Transferts en milieu poreux

Dans un premier temps, pour un individu debout, j'ai pris en compte la conduction au niveau des pieds à travers les semelles de chaussures. Lorsque nous avons abordé l'étude du confort dans la voiture, il est apparu évident que la surface de contact étant importante, on ne pouvait plus négliger les échanges avec le solide (dos et jambes en contact avec le siège, mains sur le volant).

La première étape a été de considérer que le siège ne limite pas l'évaporation et que le flux conductif échangé par le dos est nul, ce qui a été vérifié expérimentalement (un fluxmètre placé contre le dos du sujet indique que le flux est important pendant les premières minutes puis tend vers zéro). Ces hypothèses ne sont pas satisfaisantes dans des régimes transitoires, dans le cas de climat chaud où l'individu transpire ou si on veut développer des systèmes de chauffage par contact. Nous avons fait une étude plus approfondie.

La thèse de F. Althabégoity, avait commencé par l'étude des conditions dans la voiture en hiver (contrat PSA/Valéo) et a été complétée par une partie plus fondamentale, hors contrat, sur l'analyse des transferts de masse et de chaleur dans les milieux poreux [1996].

Cette étude, destinée à affiner les hypothèses ci-dessus, s'est faite en plusieurs étapes :

- Un modèle simple de transfert de masse et de chaleur en milieu poreux a été développé. Nous avons dû faire l'hypothèse d'un milieu poreux homogène, isotrope et continu. Ces hypothèses se justifient car le tissu de surface est assez fin et le reste du siège est composé de diverses mousses qui sont effectivement des milieux poreux que l'on peut considérer comme homogène et isotrope.
- Une série d'expériences a été réalisée au laboratoire avec deux sièges différents donnés par P.S.A. Les deux sièges ont été instrumentés de thermocouples et de sondes d'humidité. Plusieurs conditions ambiantes ont été appliquées afin de connaître le profil de température et d'humidité dans la mousse (Figure 14). Ceci nous a permis de valider le modèle de transfert en milieu poreux.

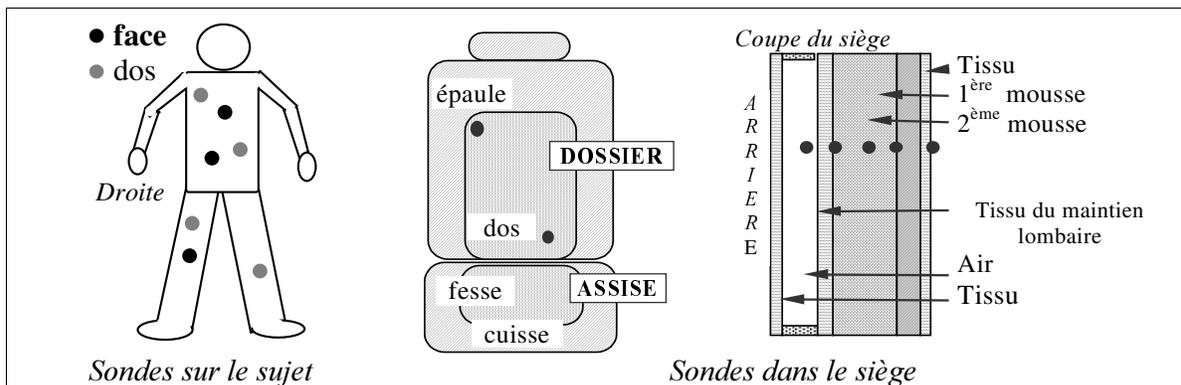


Figure 14 : Instrumentation du siège et du sujet

– Le modèle de transfert en milieu poreux a tout d'abord été couplé au modèle de Gagge, pour obtenir des conditions aux limites variables et réalistes : température et humidité à la surface de la peau. Puis il a été couplé au modèle multi-nœuds.

– Des modifications ont été faites sur le modèle de thermo-physiologie, pour tenir compte des différences avant-arrière dues au siège. Les transferts sur les deux cotés du tronc (dos et ventre) étant différents, on ne pouvait plus le considérer comme un seul segment isotherme et nous avons divisé le tronc en deux parties distinctes. Nous n'avons pas effectué ces modifications sur les jambes, qui sont pourtant elles aussi en contact avec le siège. Pour cela il aurait fallu diviser les jambes en un plus grand nombre de compartiments car uniquement les cuisses sont en contact avec le siège et nous aurions dû traiter le bas des jambes séparément. Nous ne souhaitons pas aboutir à un modèle trop complexe, sinon d'autres phénomènes purement physiologiques auraient dû être pris en compte : sang passant des cuisses aux bas des jambes, etc.

Le modèle de physiologie couplé au modèle de transferts en milieu poreux donne des résultats satisfaisants (Figure 15).

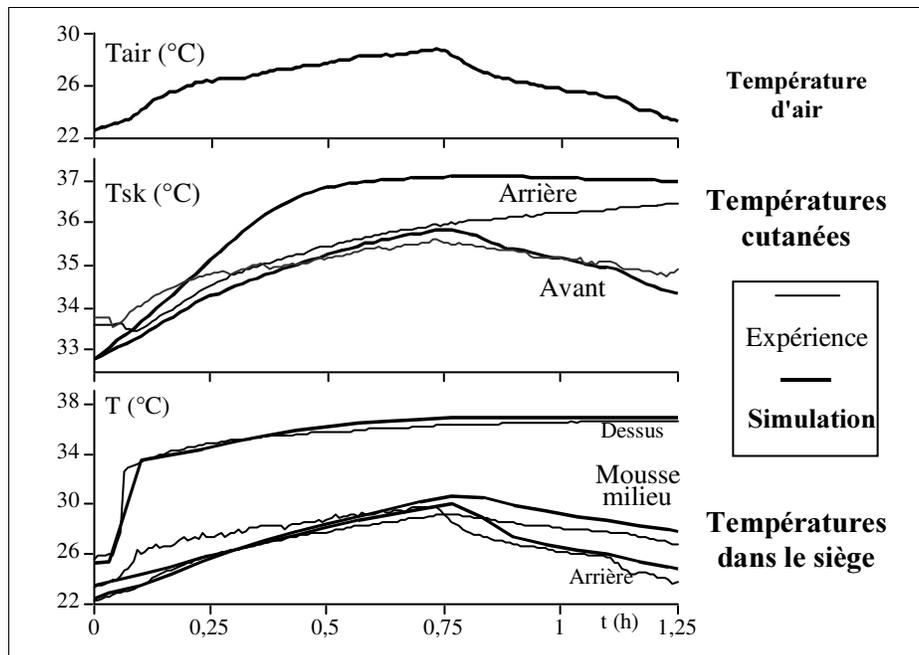


Figure 15 : Températures au niveau du tronc lors du contact avec un milieu poreux

Les développements qui ont été faits peuvent s'appliquer dans tous les cas où il y a une surface importante du corps en contact avec un milieu poreux : lit, fauteuil, ... Dans les ambiances relativement homogènes l'utilisation du modèle de Gagge couplé au modèle de transferts en milieu poreux est amplement suffisant (milieu hospitalier, ...).

Les transferts par contact sont apparus importants dans une étude où un volant chauffant était envisagé. Il a fallu séparer en quatre les mains, qui ne faisaient qu'un segment, pour pouvoir tenir compte de la différence entre la paume de la main et le dos. Les transferts sont nettement plus simples car il s'agit d'un matériau imperméable, seul les transferts conductifs sont présents. Une thèse actuellement en cours porte partiellement sur ce sujet, des expériences sont faites au laboratoire pour valider les modifications.

d) Les modèles "d'interpréteur"

Pour un utilisateur qui veut étudier des conditions réelles, l'analyse des très nombreuses variables physiques et physiologiques n'est pas facile, il faut pouvoir les interpréter pour prévoir la

façon dont l'homme perçoit son environnement thermique. Ces interprétations dépendent évidemment des variables pertinentes pour la situation envisagée. Les interpréteurs que nous avons développés sont totalement liés aux types d'applications ; nous avons toujours tenté de garder comme indicateurs des variables objectives.

Les relations que nous avons obtenues dans chaque cas sont empiriques. Elles ont été fondées sur des données de la littérature et sur une exploitation des données expérimentales disponibles dans chaque domaine. Le principe reste tout de même identique. La perception globale dépend essentiellement des variables globales, la perception locale dépend surtout des variables locales (Figure 16).

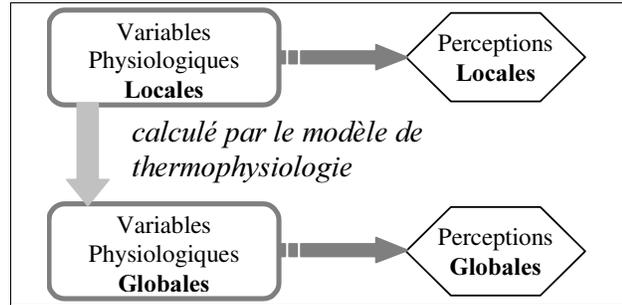


Figure 16 : Schématisation du calcul de la perception

III.4. La métrologie

La mise au point et le développement de modèles, puis leur validation, demande d'effectuer des expériences. Pour la prise en compte des phénomènes physiologiques, nous avons toujours collaborés avec d'autres équipes ayant des compétences complémentaires des nôtres. Les campagnes expérimentales de validation faisant intervenir l'être humain ont été faites hors de notre laboratoire car nous ne disposons pas du matériel ou des personnels nécessaires, pour les raisons principales suivantes :

- Les chambres climatiques sont des structures lourdes ; il en existe très peu en France.
- L'expérimentation faisant intervenir l'homme doit être faite en présence d'un médecin.
- Les essais comportent en général des questionnaires psycho-sociologiques qui ne sont pas de notre domaine de compétence, mais sont indispensables.

Plusieurs campagnes d'expériences ont été faites avec d'autres équipes, nous avons toujours participé à l'élaboration du protocole des expériences qui ont été réalisées : définition des objectifs, planning, plages de variations, durées, variables à enregistrer, etc. Les problèmes particuliers à chaque domaine d'applications sont donnés plus loin. Le plus souvent les équipes avaient leurs matériels d'acquisition et leurs méthodes de travail. Pour des raisons évidentes de compatibilité avec l'ensemble de leurs résultats obtenus précédemment, il a été décidé de changer le moins possible leurs méthodes.

Pendant l'acquisition de variables de thermo-physiologie, l'homme doit pouvoir bouger, il faut utiliser des moyens de mesure suffisamment souples pour pouvoir suivre ses mouvements, donc très souvent fixés au corps, ce qui n'est pas sans poser quelques problèmes. Les seules variables physiologiques mesurables qui nous intéressent, pour le calage du modèle, sont les températures cutanées. La mouillure est une représentation de l'humidité de la peau et elle n'est pas mesurable. Nous avons toujours travaillé dans des conditions relativement proches du confort, les quantités d'eau perdues ne sont alors pas suffisamment importantes pour être mesurées par pesée.

a) **Mesure des températures de peau**

Pour les mesures de températures cutanées qui permettent de suivre l'état thermique du sujet et sont indispensables au calage du modèle de thermo-physiologie, plusieurs problèmes se posent.

- La mesure : dans tous les essais on utilise des thermocouples fixés sur la peau avec du sparadrap. Les erreurs de mesures sont alors celles classiquement rencontrées pour la mesure de température de surface où le capteur modifie localement les transferts. Le problème dans notre cas est d'autant plus complexe que la peau est une surface humide, réactive et non isotherme. Bien que

les thermomètres infrarouges présentent l'avantage d'être une méthode de mesure non intrusive, elle est peu utilisée car la présence de vêtements la rend inopérante.

- La localisation : la surface corporelle n'est pas isotherme, il faut faire attention au point de mesure. Si on place un thermocouple juste sur une veine, la température peut être très différente de celle enregistrée un centimètre plus loin. De nombreuses études ont eut pour sujet le nombre de capteurs nécessaires à la détermination de la température moyenne cutanée. En ce qui nous concerne nous avons besoin de la température moyenne de chaque segment. Nous avons obtenu la température d'un segment par une moyenne pondérée des différentes valeurs mesurées.

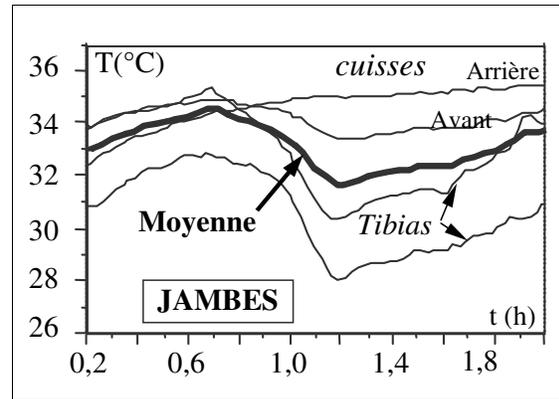


Figure 17 : Températures ponctuelles et moyennes

Les coefficients de pondération étant ceux de la littérature pour le calcul de la température cutanée moyenne corporelle. Il faut être conscient qu'il y a alors une perte notable d'information (Figure 17).

- La reproductibilité : un autre problème déroutant dans les expériences sur l'être humain, est la non-reproductibilité des résultats. Il y a des différences inter mais aussi intra-individuelles.

Une même personne soumise plusieurs fois à des conditions thermiques identiques n'a pas les mêmes réponses. Cela est vrai, bien sûr, pour le jugement subjectif de confort, mais l'est aussi pour les paramètres physiologiques, par exemple la température de peau, comme le montre la Figure 18. Tout résultat numérique est alors confronté au résultat expérimental avec un intervalle de confiance difficile à définir. Le nombre de sujets étant faible il n'est pas raisonnable de travailler sur des moyennes statistiques, comme cela est souvent fait.

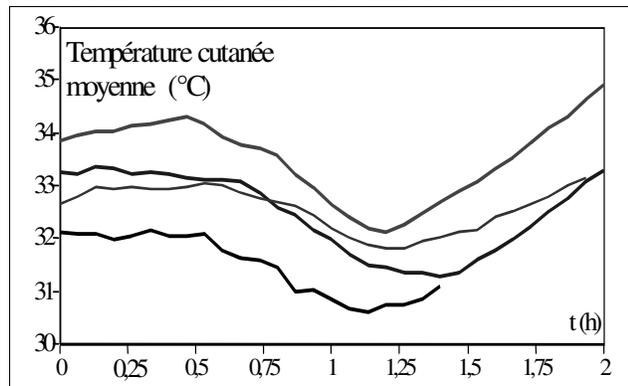


Figure 18 : Variabilité Intra-individuelle (Résultats obtenus dans des conditions très proches)

b) Mesure de l'environnement thermique proche

Pour calculer les flux échangés par le corps humain, il faut connaître les paramètres physiques de son environnement proche. Pour les températures de surface il n'y a pas de problème majeur, si ce n'est ceux rencontrés dans ces configurations. Pour la pression de vapeur nous avons toujours considéré qu'elle était homogène et elle n'a été mesurée qu'en un point loin du sujet.

Le problème se pose pour la mesure des températures et des vitesses d'air à proximité de la peau ou des vêtements. L'homme devant être libre de ses mouvements, si nous voulons mesurer l'évolution des variables de son environnement immédiat, il n'y a pas d'autre solution que d'avoir un système de mesure qui lui soit fixé dessus.

Pour la mesure de vitesse d'air dans les configurations que nous avons rencontrées, les vitesses étaient peu variables dans le temps et les anémomètres étant du matériel lourd et coûteux il n'était pas possible de les coller sur le sujet. Les cartographies de vitesses autour du corps ont été faites une fois pour toutes pour chaque configuration.

Pour mesurer les températures d'air à proximité du corps dans des conditions très hétérogènes nous avons utilisé des sondes composées d'un thermocouple protégé du rayonnement

par un écran cylindrique peu émissif, comme le préconisent les normes. Il s'est avéré que cette méthode introduit des erreurs importantes.

Nous nous sommes aperçus qu'en climat froid, les températures enregistrées étaient largement surestimées. Pour que la mesure soit toujours faite à la même distance du sujet, l'écran est fixé à même la peau ou le vêtement (Figure 19). Une étude est faite sur l'analyse détaillée de ce type de sonde. Elle complète la thèse de S. Piniec qui a débuté sur les conditions d'été dans un véhicule.

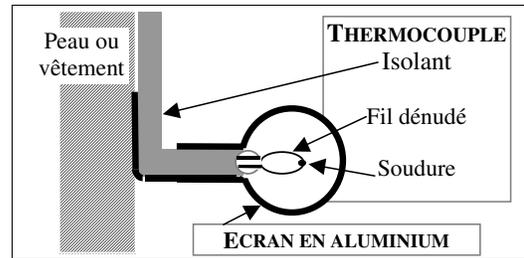


Figure 19 : Système de mesure utilisé

Les expériences nécessaires à cette étude ont été faites au LESETH. Elles ont pour objectif d'analyser l'influence de la protection en aluminium sur la mesure des températures d'air.

Le dispositif expérimental, placé dans une pièce climatisée, se compose des éléments suivants :

- une paroi active constituée d'un échangeur plan régulé représentant la peau,
- un système de régulation de température de la plaque, à l'aide d'un bain thermostaté,
- divers types de sondes (Tableau 2) fixées sur la paroi ou sur une canne en Plexiglas. Toutes ces sondes sont à la même distance de la paroi.

Pour l'ensemble des expériences la température de l'air $T_{\infty}=20^{\circ}\text{C}$. La température de la paroi active varie pour obtenir des $\Delta T = T_{\text{paroi}} - T_{\infty}$ positifs ou négatifs. Une vingtaine de configurations a été réalisée.

Paroi active	N°	Taille	Support	Mesure de T°	Particularités
	1-6	épais	Int paroi	intérieure paroi	sous la surface
	7	fin		référence	1 m de la maquette
	7'	fin		"	"
	8	"	Paroi	air ambiant	cylindre vertical
	9	"	Paroi	"	cylindre horizontal
	9'	épais	"	"	"
	10	fin	Paroi	"	pas d'écran
	10'	épais	"	"	"
	11	fin	Paroi	surface de la paroi	pas écran sur paroi
	12	"	Plexiglas	air ambiant	cylindre horizontal
	13	"	"	"	pas écran

Tableau 2 : Récapitulatif des types de sondes utilisées

Nous avons d'abord vérifié, grâce à l'interférométrie holographique que les soudures des thermocouples sont en dehors de la couche limite de la paroi. La Figure 20 donne une partie des résultats d'une des expériences, dont les conditions fixées sont représentées (Figure 20 a).

Les résultats enregistrés par les diverses sondes sont surprenants (Figure 20 b) : nous obtenons des écarts, entre les températures mesurées et réelles, et également des oscillations qui varient en fonction de ΔT , mais dépendent beaucoup du type de sonde.

La première analyse nous permet d'affirmer qu'il ne s'agit pas d'un problème électronique. L'écoulement aéralucique général dans le local joue rôle important. On constate une amplification des variations de la température de la pièce qui varie de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ autour de la valeur de consigne avec une période d'environ 12 minutes.

Pour tenter de séparer les deux phénomènes nous avons travaillé sur des courbes lissées

(Figure 20 c), on voit alors plus nettement apparaître les écarts. Dans tous les cas il y a un problème de thermique et également d'aéraulique, les écrans perturbent très nettement l'écoulement de l'air autour de la soudure du thermocouple.

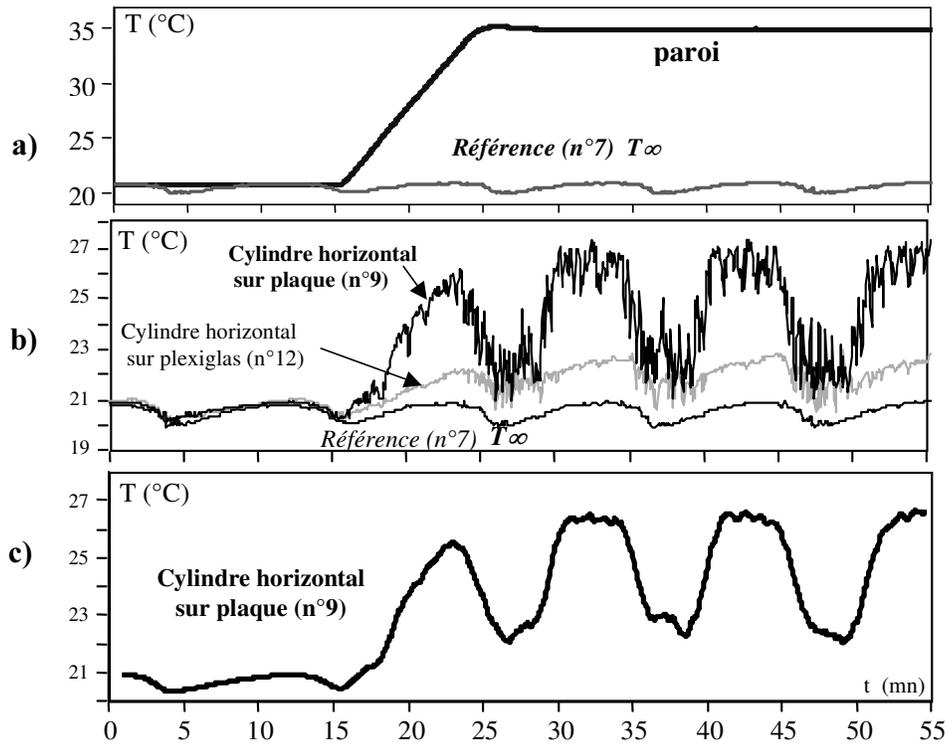


Figure 20 : Exemple de résultats obtenus sur maquette

En parallèle aux expériences des modèles sont développés sous TRNSYS et E.E.S, pour obtenir les ordres de grandeur des échanges radiatifs, convectifs, et conductifs sur la soudure et sur l'écran de "protection" dans les diverses configurations de sondes. Il s'avère que l'écran étant très conducteur il est à une température moyenne proche de celle de la paroi, et bien que les émissivités de la soudure et de l'écran soient faibles, les échanges radiatifs sont importants. Nous espérons grâce aux résultats de simulation comprendre d'où proviennent les écarts entre les températures enregistrées et réelles. Un gros problème se pose pour la détermination des coefficients d'échange convectif sur la soudure, à l'intérieur et à l'extérieur de l'écran, car il dépend du régime d'écoulement que nous avons du mal à identifier.

Le problème initial étant la mesure des températures d'air locales autour du corps nécessaire au calcul des échanges convectifs, il est souhaitable de disposer de valeurs les plus exactes possibles à partir des valeurs enregistrées. Nous avons décidé de tirer une loi de correction empirique à partir des résultats obtenus sur maquette.

Pour obtenir la température réelle T_{∞} il faut apporter à la valeur mesurée T_{mes} la correction montrée sur la Figure 21.

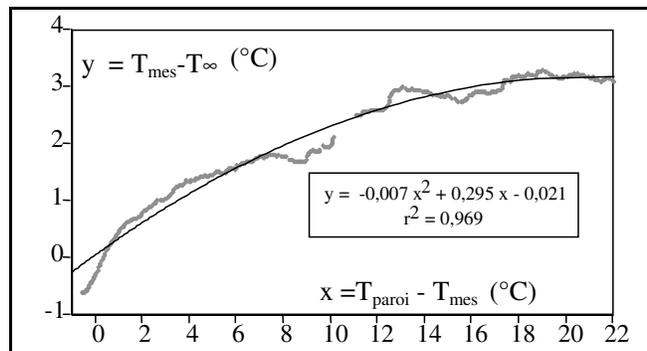


Figure 21 : Loi de correction des mesures

A l'aide de cette expression, les températures d'air mesurées ont été modifiées dans les tableaux de résultats expérimentaux qui servent à alimenter le modèle.

III.5. Les applications

a) **Environnement peu hétérogène : l'habitat**

L'étude de l'environnement thermique de l'homme a démarré avec mon stage de DEA dans le cadre de la thermique l'habitat. Le domaine d'utilisation du PMV a été cerné et ses limites connues mais, son atout majeur est qu'il fait partie des normes françaises. A ce titre nous continuons à nous en servir pour répondre à des demandes précises de certains industriels qui veulent évaluer des conditions thermiques avec une base reconnue par tous. Ce fut le cas, par exemple, pour l'étude comparée de bâtiments l'un construit en briques monomur, l'autre de compositions plus classiques (parpaing isolé intérieur ou extérieur, ..), lors de plusieurs contrats de courte durée en 1997 et 98 avec le C.T.T.B (Centre Technique des Tuiles et Briques).

Dans l'habitat, les études prennent le plus souvent en compte des paramètres mesurés ou calculés au centre du local, et les conditions thermiques ne semblent pas être très hétérogènes, mais l'individu peut se déplacer dans la zone d'occupation et la proximité d'un émetteur de chaleur à ou d'une vitre froide peuvent entraîner des disparités importantes dans les flux locaux échangés. Au laboratoire les hétérogénéités thermiques dans le bâtiment sont bien connues et le logiciel TRNSYS permet un calcul avec la précision requise pour ce type d'étude. Pour aller plus loin dans l'analyse des ambiances thermiques, l'utilisation d'un modèle de thermo-physiologie multi-nœuds, dans une simulation complète du bâtiment, offre de nombreux avantages.

J'ai participé à la totalité de cette étude sur "le confort thermique dans l'habitat". Au cours de ma première année de thèse, 1986-87, j'ai eu un complément de bourse de l'AFME-IRbât qui désirait suivre l'avancement du travail. Par la suite un contrat a été signé avec le Ministère du Logement (PCA Mellat) et EdF-GdF de 1987 à 89, pour le développement de MARCL (Modèle d'Analyse et de Recherche sur le Confort Local). Mon mémoire de thèse a constitué le rapport de fin de contrat [*Thellier 1989*]. Ce contrat a été renouvelé de 1989 à 91 par EdF-GdF et l'AFME, pour le développement de l'interpréteur TRIM (TRI des variables de MARCL) qui a fait l'objet de la thèse de Maria Galéou. Son mémoire a constitué le rapport final [Galéou 1991].

Au cours de ces quatre années de contrat, l'étude a été menée en collaboration étroite avec le L.P.P.E. où se sont déroulées toutes les expériences de physiologie et psychologie permettant la construction et la validation des modèles. M. Galéou ; qui avait débuté sa thèse au L.P.P.E. pour la partie bibliographique, est venue la terminer au LESETH pour la création du modèle TRIM.

- ***Les expériences***

La campagne expérimentale a été menée dans la chambre climatique du L.P.P.E. en collaboration avec des psycho-physiologistes. Le but des ces essais était :

- validation du modèle de thermo-physiologie vêtu, en conditions hétérogènes et variables,
- établissement des corrélations entre variables physiologiques et sensations thermiques.

Pour cette étude, la chambre climatique dût être modifiée pour produire les conditions thermiques désirées : soit des climats homogènes et variables, soit des conditions stables mais hétérogènes où la température d'air et des murs varient indépendamment, pour avoir un mode d'échange prépondérant. Les variables physiques de la chambre, et celles psycho-physiologiques des sujets, ont été enregistrées au cours du temps. Nous avons été confrontés aux problèmes de traitement des données dans ce domaine.

- ***Les modèles***

Cette étude a constitué la première phase de développement du modèle de l'homme dans son environnement thermique. Le modèle de Stolwijk, a été choisi puis implanté dans TRNSYS. Les premières versions des divers modèles environnants ont été développées.

Les facteurs de formes nécessaires au calcul du rayonnement infra rouge sont déterminés par la méthode de Monte-Carlo. Les vitesses d'air sont différentes sur chaque segment en fonction de l'activité de l'individu. Les températures dépendent de la posture (assis et debout) et de la stratification de l'air lié au système de chauffage, suivant les données de la littérature.

Le logiciel complet ainsi obtenu a été dénommé : MARCL. Il a été validé par confrontation avec de nombreux résultats expérimentaux : d'abord avec des mesures globales données de la littérature, puis avec les résultats des expériences réalisées au L.P.P.E. [Thellier 1989, 1994]

La deuxième étape de cette étude, [Galéou 1991], a été de passer des variables physiologiques à la détermination des sensations thermiques exprimées sur une échelle centrée en 7 points (Tableau 3).

3 = légèrement froid	4 = neutre	5 = légèrement chaud
2 = froid		6 = chaud
1 = très froid		7 = très chaud

Tableau 3 : Echelle de sensation thermique utilisée dans l'habitat

Après une bibliographie très importante (environ 300 références) et le dépouillement de toutes les données d'expériences réalisées au cours de l'étude, nous avons obtenu une série d'expressions non linéaires qui permettent de calculer les sensations thermiques. Ceci constitue le cœur du modèle TRIM (Figure 22).

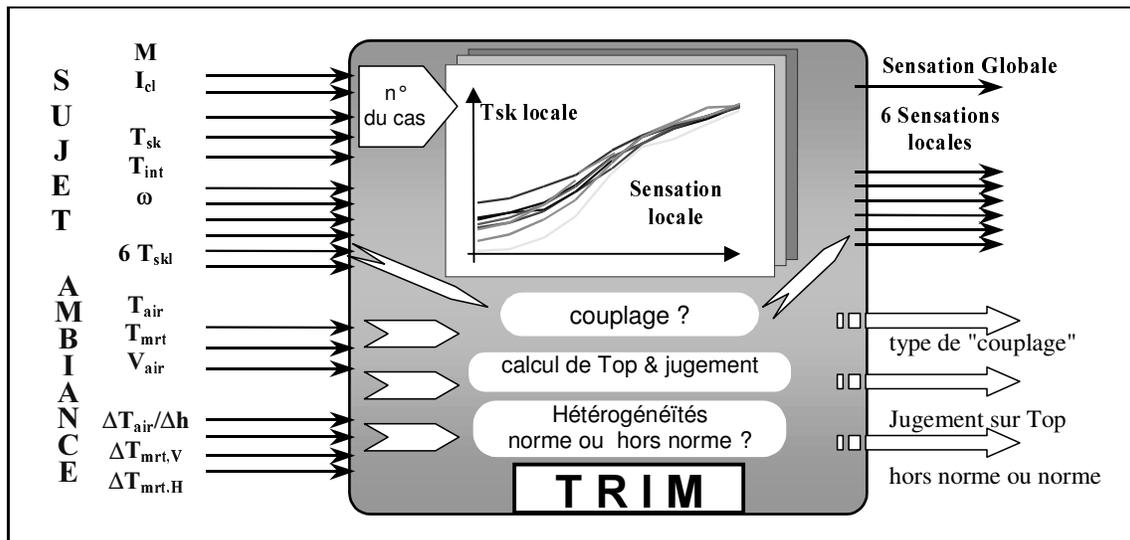


Figure 22 : Mode de fonctionnement de TRIM

Les sensations locales sur les 6 segments corporels sont calculées en fonction des températures ou des mouillures cutanées locales. Il en est de même pour la sensation globale. Quatre tableaux de valeurs sont nécessaires selon les niveaux d'activité et d'isolement vestimentaire. Des couplages entre variables interviennent : par exemple un air trop froid ou trop chaud modifie les sensations locales de la tête, des mains et des pieds. TRIM donne également des informations sur les hétérogénéités d'ambiance, telles qu'elles sont définies dans les normes, et un jugement global sur l'ambiance. Ce modèle est autonome, il est prévu pour fonctionner avec les résultats de MARCL mais peut également être utilisé avec des valeurs expérimentales.

Nous disposons de divers outils pour analyser les conditions thermiques dans l'habitat à l'aide de TRNSYS [Monchoux 1992]:

- Le PMV/PPD pour des situations homogènes et stationnaires et des analyses rapides.
- Le modèle de Gage vêtu pour des ambiances homogènes et instationnaires.

– MARCL pour des conditions thermiques non homogènes et instationnaires. L'ensemble des modèles, dans la structure de TRNSYS (Figure 23), permet la représentation d'un individu dans un habitat soumis à une météorologie réelle.

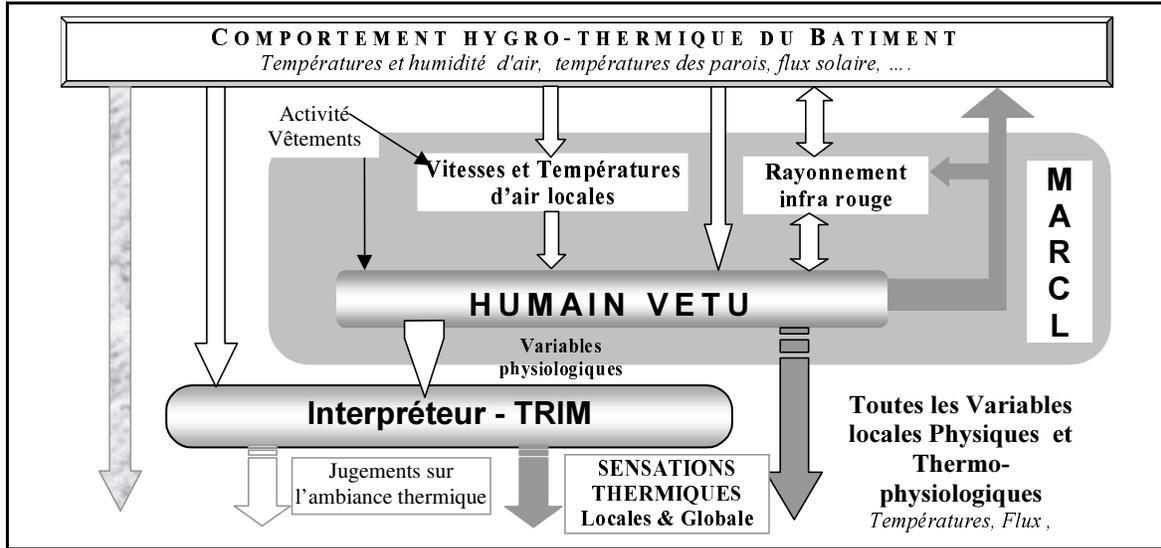


Figure 23 : Couplage entre MARCL, TRIM et les divers modèles

Les paramètres physiques et physiologiques calculés permettent d'obtenir les sensations thermiques locales de l'habitant au cours du temps en fonction de toutes les données du bâtiment. La Figure 24 montre un exemple de résultat.

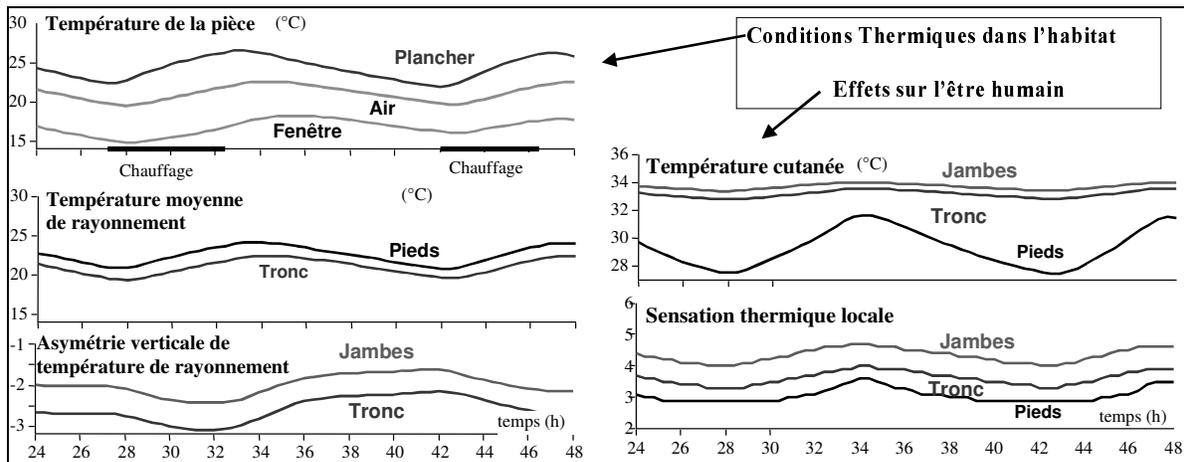


Figure 24 : Exemple de résultats dans l'habitat

Une version simplifiée des expressions de calcul des sensations du modèle TRIM a été directement implantée dans MARCL. Cette version permet des études plus rapides. Elle a été utilisée pour déterminer une hiérarchie des paramètres de l'environnement en fonction de leurs effets sur les sensations locales. Une pré-étude "météologie du confort", financée par le Ministère du Logement, avait pour objectif de développer un modèle de régulation de l'habitat. J'ai pu suivre ce travail si ce n'est par des réunions informelles et des conseils pour l'utilisation de MARCL et pour le dépouillement des résultats.

Une autre étape dans le développement et l'utilisation de MARCL dans l'habitat a été la prise en compte de l'effet de l'ensoleillement sur le corps. En général on considère que le soleil entrant dans les maisons n'atteint pas directement l'habitant, or on s'aperçoit que de nombreuses plaintes

proviennent d'un ensoleillement direct. Le calcul de la tache solaire entrant dans le bâtiment et de son effet sur la thermique du corps humain a fait l'objet d'une thèse [Belmasjor 1996].

b) Environnement très hétérogène : La voiture

Une étude a débuté en collaboration avec Valéo Thermique Habitacle et P.S.A. PEUGEOT-CITROËN (DETA Direction de Etudes et Techniques Avancées). L'objectif était de remplacer les essayeurs habituels, qui testent les systèmes de chauffage et de climatisation des véhicules, par un modèle donnant les mêmes informations.

Pour cette étude P.S.A. nous a demandé d'utiliser son échelle de cotation thermo-sensorielle (Tableau 4) qui comporte une part de subjectivité.

5 = confort	
4 = confortablement frais	6 = confortablement chaud
3 = frais	7 = chaud
2 = froid	8 = très chaud
1 = très froid	9 = suffoquant

Tableau 4 : Echelle de jugements thermo-sensoriels

Les conditions thermiques dans une voiture sont très hétérogènes et varient rapidement au cours du temps et ce dans une large plage. Dans une voiture stationnée à l'extérieur, les températures peuvent être extrêmes. Les systèmes de chauffage et de climatisation sont conçus pour ramener l'ambiance à des conditions thermiques où le confort est possible, mais ils engendrent souvent des problèmes locaux.

Un inconfort local marqué peut pousser le conducteur à avoir des réactions comportementales dangereuses ou une baisse de vigilance, qui peuvent entraîner de graves conséquences. Le conducteur n'en a pas forcément conscience des déséquilibres thermiques, c'est ce qu'il éprouve qui l'amène à agir sur le seul moyen dont il dispose : le système de régulation de la ventilation. Il peut donc apparaître des différences importantes entre les flux convectifs et radiatifs ou une très forte non-homogénéité de ces flux entre les segments corporels, selon qu'ils sont plus ou moins proches des bouches de soufflage, des vitres, etc. Dans l'analyse des situations il faut tenir compte qu'en conduisant l'homme ne peut modifier ni son activité, ni sa posture, ni sa tenue vestimentaire.

Après de nombreuses discussions, il a été décidé en 1992 une première phase d'étude d'une durée de 24 mois sur des conditions hivernales (température extérieure basse, système de chauffage en marche, vêtements épais). Puis une deuxième phase a fait suite (26 mois) sur les conditions d'été (température extérieure élevée, climatisation en marche, vêtements légers). Deux thèses, F. Althabégoïty et S. Piniec, ont été financées par ces contrats.

• Les expériences

Au cours de cette étude, une importante campagne expérimentale a été menée en soufflerie, comportant une centaine d'essais de 2 à 3 heures chacun.

Tous les essais ont été faits avec le même véhicule (Citroën ZX). Les deux essayeurs (un pour l'hiver et un pour l'été) étaient habillés avec deux tenues vestimentaires différentes selon la saison. Des mesures ont été faites sur le véhicule et sur les sujets. Pour enregistrer les jugements thermiques en continu une "boîte à sensation" reliée à la chaîne d'acquisition (Figure 25) a été conçue et fabriquée au LESETH.

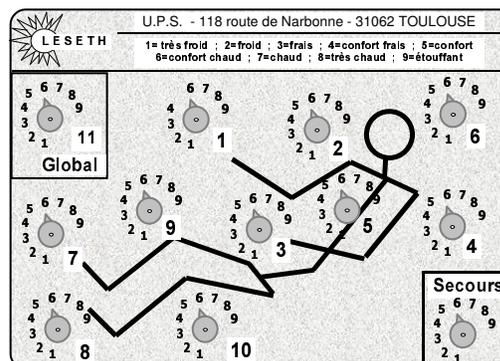


Figure 25 : La "Boîte à sensation"

Le but de ces essais était :

- D'obtenir des conditions climatiques complètes pour pouvoir calculer les transferts entre le conducteur et la voiture, c'est à dire la cartographie des températures de surface, ainsi que les températures, les humidités et les vitesses d'air locales proches du corps.
- D'obtenir des variables physiologiques pour valider le modèle dans l'environnement thermique d'un véhicule.
- De disposer de variables physiologiques locales et de jugements thermo-sensoriels, locaux et globaux, associés pour établir un modèle de calcul de ces jugements.

De tels essais sont extrêmement lourds à gérer, leur nombre a été limité, aussi pour des raisons de coût. Ils ont été faits en soufflerie chez Valéo, soit en région parisienne, soit en Suède. Pour créer les variations climatiques intérieures désirées, nous disposons des conditions dans la soufflerie (soleil, température et vitesse dans la veine) et du système de régulation du véhicule. Nous avons dû modifier ce dernier car il n'était pas assez puissant pour fournir la demande. D'autre part, il devait être accessible de la salle de contrôle pour que le conducteur ne connaisse les conditions auxquelles il était soumis.

Il a d'abord fallu déterminer les effets des conditions thermiques de la soufflerie sur le véhicule, pour mieux les maîtriser, ces deux systèmes étant fortement couplés. Par exemple, pour faire varier les échanges radiatifs nous agissions sur les conditions dans la veine qui modifiaient les températures de surfaces internes de l'habitacle, mais pour ne pas avoir des conditions trop contraignantes, pour le conducteur, nous devons alors modifier les conditions de soufflage.

Le véhicule était instrumenté d'une cinquantaine de thermocouples : températures de surface, d'air en sortie d'aérateurs,... Le sujet était équipé de 20 sondes cutanées, plus des sondes pour mesurer la température d'air à proximité du corps (cf. § *Mesure de l'environnement thermique proche*) et devait exprimer sa perception à l'aide de la "boîte à sensation". Au total plus d'une centaine de variables était enregistrées toutes les 30 secondes. Des campagnes de mesures annexes ont été faites sans le conducteur afin d'obtenir les vitesses d'air locales et les flux solaires.

La mise en place et la réalisation de ces essais a demandé une collaboration étroite avec les équipes techniques de PSA et Valéo, qui n'avaient jamais été confrontés à une telle quantité d'acquisition et de transfert de données. Avant chaque campagne (9 campagnes de 8 à 10 essais), il fallait définir au préalable avec précision les variations de chaque paramètre contrôlable, en tenant compte des phénomènes à mettre en évidence, des impératifs techniques de la soufflerie, et de l'être humain. Avant chaque essai le sujet devait être placé en conditions thermo-neutres durant une demi-heure pour s'affranchir de son "passé thermique". Les essais devaient s'enchaîner correctement pour éviter des pertes de temps. Compte tenu de ces impératifs, plusieurs discussions étaient nécessaires entre les équipes techniques et nous avant d'établir le planning complet.

• *Les conditions thermiques*

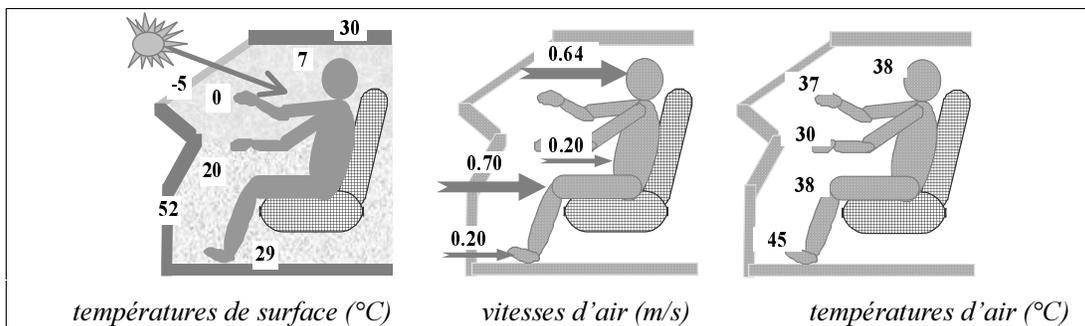


Figure 26 : Exemple de conditions thermiques dans une voiture en hiver

L'environnement thermique d'un habitacle est particulier pour plusieurs raisons (Figure 26) :

- Les surfaces qui sont très proches du corps ont des températures très variées.
- La ventilation est forte, pouvant entraîner des vitesses d'air locales allant jusqu'à 2 m/s, alors que sur certains segments l'écoulement d'air est dû à la convection naturelle.
- Les températures d'air varient très vite d'un segment à l'autre.
- Une partie du corps non négligeable, (environ 20%) est en contact avec le siège.
- La présence du soleil accroît les hétérogénéités, car seules quelques zones sont éclairées.

- **Les modèles**

Le modèle de thermorégulation de base a été modifié. MATHER, modèle de MANnequin THERmique dans un véhicule [*Piniec 1997*], comporte 8 segments : les deux bras sont traités séparément, pour tenir compte des fortes asymétries droite-gauche et le tronc est séparé pour tenir compte du contact avec le siège (*cf § c) Les transferts vers un milieu solide*). Evidemment, le sujet est vêtu ; les deux tenues ont été étudiées avec précision.

Les calculs des transferts thermiques entre le corps humain vêtu et le véhicule ont été affinés pour tenir compte des spécificités décrites ci-dessus. Pour calculer les échanges radiatifs infrarouges, il a fallu au préalable faire des essais sur le véhicule seul et les analyser en détail, pour déterminer les surfaces que l'on pouvait considérer comme isothermes. Les surfaces proches du conducteur sont découpées en un plus grand nombre d'éléments (par exemple la vitre gauche est divisée en quatre parties, alors que droite ne constitue qu'une surface). A partir de cette analyse et du fichier du DAO du véhicule réel, nous avons construit une représentation géométrique simplifiée. Nous avons ensuite calculé les facteurs de forme grâce à un programme appartenant à Valéo.

Les flux solaires reçus sont pris en compte, car une partie des essais a été réalisée avec un "soleil" simulé par des rampes de lampes solaires, situées au plafond et sur un mur de la veine. Des campagnes de mesure ont été faites juste pour enregistrer, à l'aide d'un pyranomètre, les flux entrants dans la voiture en fonction de la puissance des lampes qui peut être variable dans le temps et diffère selon les souffleries. Un modèle totalement empirique en a été tiré. Il calcule les flux "solaires" locaux reçus sur chaque segment du conducteur. Il est clair que ce module n'est valable que pour les souffleries utilisées. Une proposition de recherche plus poussée prenant en compte l'effet du type de vitrage sur le calcul de l'ensoleillement en condition réelle a été faite, en collaboration avec l'I.N.S.A. de Toulouse ; après de nombreuses discussions ce projet n'a pas abouti.

Les expressions des transferts convectifs ont été modifiées. Sur une partie du corps l'écoulement de l'air est essentiellement dû à la convection naturelle, dont il fallait tenir compte. Sur certains segments les vitesses peuvent être très élevées, elles dépendent de la proximité et de la position des aérateurs et du mode de soufflage. Deux campagnes de mesures de vitesses d'air locales ont été faites pour obtenir la cartographie complète dans les 28 configurations de soufflage les plus utilisées. Après une analyse de toutes les valeurs locales, avec plusieurs points de mesure par segment, nous avons regroupé dans un fichier toutes les vitesses moyennes par segment et par mode de soufflage.

Pour développer l'interpréteur, nous avons établi une loi empirique qui calcule les jugements thermo-sensoriels locaux à partir des données physiques du sujet et de l'ambiance. Après de multiples essais, deux relations sont nécessaires :

- En conditions d'hiver : les jugements locaux sont calculés en fonction des températures de peau locales et de celle de l'air inhalé,

- En conditions d'été : s'il n'y a pas de soleil la relation est du même type qu'en hiver. Dans le cas contraire le flux reçu entre également dans l'évaluation des sensations.

Il faut être conscient que ces lois n'ont aucun caractère général, elles ne représentent que les deux essayeurs expérimentés, un pour les conditions d'été, un pour les conditions d'hiver. Toutefois un test qualitatif a été fait dans un autobus en soufflerie avec une dizaine de personnes simultanément (hommes et femmes) pour tenter de voir si les essayeurs, et donc MATHER, donnaient des réponses thermiques se situant dans la moyenne d'un panel plus large d'individus. Pour ce test le LESETH a fabriqué 10 "boîtes à sensation" identiques légèrement simplifiées. Cette étude a été entièrement réalisée et analysée par PSA, nous sommes intervenus en conseil pour établir le planning de la journée d'essai, et fixer le nombre minimal de variables à enregistrer sur et autour de chaque personne. Les résultats montrent que MATHER donne des indications généralisables à un échantillon plus vaste d'utilisateurs de véhicules.

Etant donné que pour l'instant il n'existe pas de modèle complet de véhicule, une partie des entrées du modèle MATHER sont des valeurs expérimentales (Figure 27).

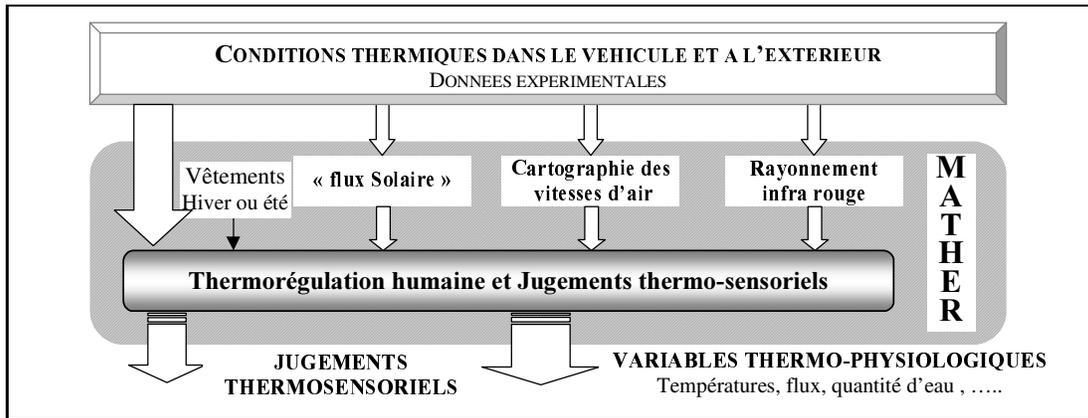


Figure 27 : Entrées sorties du modèle MATHER

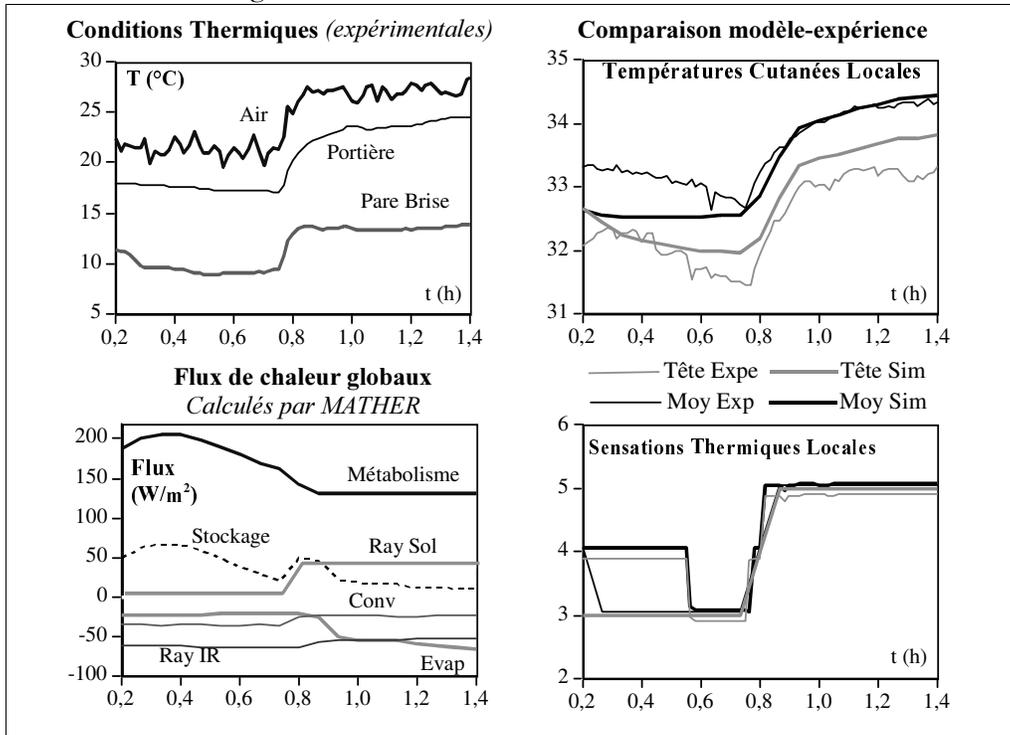


Figure 28 : Exemple de résultats obtenus avec MATHER

Les résultats de MATHER que nous montrons (Figure 28) sont confrontés aux données expérimentales. Ils sont représentatifs de l'ensemble de nos données, les écarts entre modèle et

expérience excèdent rarement un point sur l'échelle de sensations. Ces écarts sont du même ordre de grandeur que les écarts inter ou intra individuels ; il ne semble pas possible de faire mieux.

Au cours des essais, plus d'une centaine de variables ont été enregistrées. Toutes ces données ont été classées, triées et analysées. Une partie, concernant les conditions thermiques à proximité du conducteur sert comme entrée du modèle, une autre comme base de travail pour établir la relation du calcul des sensations. Nous nous sommes trouvés avec une importante base de données, constituée d'un grand nombre de fichiers, qu'il a fallu en permanence garder opérationnelle et compatible avec les évolutions du modèle.

Cette base de données dont nous disposions à l'issue des deux contrats "MATHER" a permis la création d'un *modèle neuronal*, sur un contrat avec P.S.A. Pour développer un tel modèle il faut une base de données non bruitée, c'est à dire qu'à des entrées différentes doivent correspondre des sorties différentes ce qui n'est pas le cas des essayeurs réels. Ce sont donc les résultats donnés par MATHER qui ont été utilisés pour la phase d'apprentissage du modèle neuronal conçu en collaboration avec une équipe du L.A.A.S. de Toulouse. Ce modèle a par la suite été utilisé pour contrôler de façon "intelligente" le système de chauffage et de climatisation d'une Peugeot 605. La conception, la réalisation et l'implantation dans la voiture du régulateur ont entièrement été faites au LESETH.

MATHER est maintenant dans une phase d'aide à la conception. Il est implanté chez P.S.A. qui a développé une interface pour pouvoir exploiter le modèle dans l'environnement de simulation utilisé en bureau d'étude de son service de Recherche et Développement. Après une phase de prise en main du logiciel, nous n'intervenons plus que très ponctuellement pour la maintenance ou pour du conseil.

Le travail dans le domaine des véhicules s'est poursuivi sur un contrat "véhicules électriques" avec P.S.A., qui cherche à développer des nouveaux systèmes de chauffage plus économes en énergie. Ces véhicules électriques posent un problème particulier, contrairement aux véhicules thermiques, la puissance de chauffage doit être fournie par un autre moyen que le moteur, il faut donc la limiter le plus possible. MATHER est utilisé pour tester des nouveaux systèmes, moins consommateur d'énergie mais plus "producteur de confort". Des modifications sur le modèle ont été faites, ainsi que sur les modules environnants, qui avaient été développés pour un véhicule différent.

Des essais ont été faits en site réel sur route en trajet urbain, avec un panel plus large de personnes. Ils avaient pour but de tester si les nouveaux modes de chauffage déterminés à l'aide de MATHER étaient vraiment efficaces et réalisables. Ces essais sont conçus sous notre contrôle pour toute la partie instrumentation du véhicule : capteurs de températures, de flux et de vitesses d'air [Milvaque 1999]. Nous collaborons avec L.A.A. (Laboratoire d'Anthropologie Appliquée – Paris) pour toute la partie concernant le suivi des essais et les questionnaires psycho-sociologiques : conception, utilisation et dépouillement. Ce contrat est associé à la thèse de Cédric Milvaque. Je participe à cette étude de manière ponctuelle, aux discussions de début du contrat pour la définition des objectifs, et régulièrement pour des conseils concernant la thermo-physiologie et l'utilisation des modèles.

c) Le scaphandre spatial

Nous avons été contactés en 1991 par le MEDES (Institut de MEDECine et de physiologie Spatiales) pour l'E.S.A. afin de participer à la création d'un modèle de thermo-physiologie devant être intégré à une modélisation plus large de l'homme dans l'espace. Les applications prévues étaient : l'entraînement de l'équipe de contrôle au sol et le dimensionnement du scaphandre.

Au cours des vols spatiaux habités, les Activités Extra-Véhiculaires (E.V.A.) sont une des principales composantes. Lors des sorties spatiales l'astronaute est protégé d'un environnement hostile par un scaphandre dans lequel les contraintes thermiques peuvent être fortes. Ce scaphandre doit être capable d'évacuer toute la chaleur et l'eau produites par le corps et lui assurer des conditions optimales de survie. Le dimensionnement doit être correct car les enjeux sont forts, il faut être capable d'anticiper certaines situations pour éviter des risques mortels pour l'astronaute. Certaines missions ont été mises en péril pour des raisons de déséquilibre thermique local.

Lors des sorties, l'astronaute est surveillé par télémétrie, soit du satellite, soit de la terre. Dans ce cas la surveillance n'est pas continue, et il faut donc prévoir l'évolution au cours des périodes "aveugles". Le nombre des variables de surveillance est restreint : ce sont les rythmes respiratoires et cardiaques et la température moyenne corporelle. Ces données biomédicales dépendent directement de l'état thermique du corps. A chaque variable sont associées des plages de fonctionnement : nominal, urgence ou survie (Tableau 5).

Rr - Rythme respiratoire (resp./min)	Urgence		Nominal	Urgence	
	1 4		2 8		
Hr - Rythme cardiaque (bat./min)	Survie	Urgence	Nominal	Urgence	Survie
	6 3	7 0	13 9	15 8	
Tbm - Température moyenne corporelle (°C)	Survie	Urgence	Nominal	Urgence	Survie
	3 5	3 6	3 7	3 8	

Tableau 5 : Variables monitorées pour l'astronaute

▪ Les conditions thermiques

Le scaphandre est un environnement thermique particulier [Monchoux 1994], l'évacuation de la chaleur produite par le corps y est totalement contrôlée par deux systèmes (Figure 29) :

- Une circulation d'eau froide (L.C.G. : Liquid Cooled Garment). Des tuyaux sont en contact avec la peau sur une partie du corps : tronc, arrière de la tête, haut des bras et des jambes.
- Une ventilation forcée sur les autres parties (O.V.N. : Oxygen Ventilation Network), qui amène l'oxygène, évacue le CO₂ et l'eau, et participe également aux échanges thermiques.

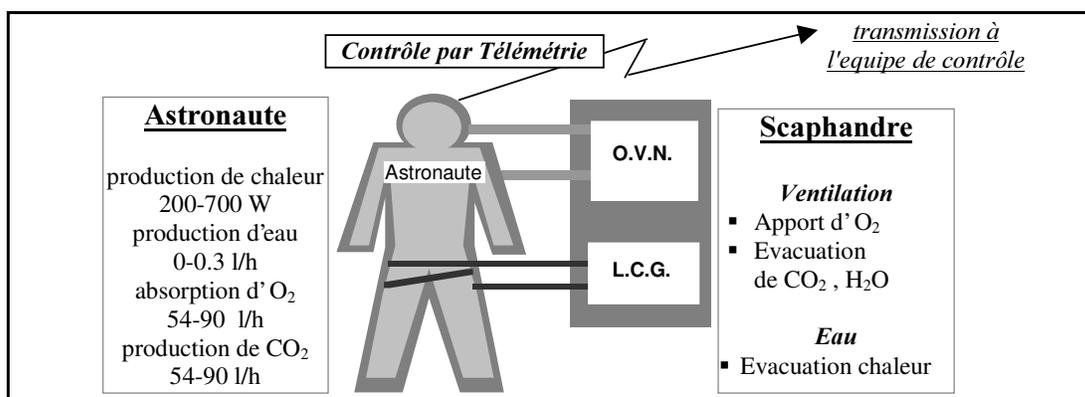


Figure 29 : Schématisation de l'homme et de son scaphandre

Le bilan thermique du corps humain est très différent de celui que l'on établit dans des conditions terrestres habituelles, pour plusieurs raisons :

- l'homme a une activité forte, la chaleur produite est importante (entre 200 et 700 W),
- les échanges de chaleur sèche au niveau cutané se font en grande partie par conduction avec les tuyaux d'eau froide,
- les transferts de masse sont modifiés par la circulation et la composition du gaz, et la présence des tuyaux,

- les échanges respiratoires sont également modifiés car le gaz respiré n'a ni la même composition, ni la même pression,
- les paramètres physiologiques sont modifiés à cause de l'absence de pesanteur.

▪ **Les modèles**

Après une nouvelle étude bibliographique sur les modèles utilisés dans ces conditions, j'ai choisi d'utiliser ici encore le modèle multi-nœuds décrit plus haut. Il a l'avantage de décomposer le corps en suffisamment de segments, compte tenu de la répartition hétérogène des tuyaux du LCG. Le modèle a été largement modifié pour tenir compte des conditions spécifiques à l'espace : modifications physiologiques dues à l'absence de pesanteur (réduction des débits sanguins dans les membres inférieurs, baisse du rendement du travail musculaire,...), changement de la nature et de la composition du gaz inspiré, et changement complet des échanges de chaleur au niveau de la peau liés à la présence du scaphandre. J'ai dû faire de nombreuses hypothèses sur ces échanges cutanés car nous ne disposons pas de description précise du scaphandre (répartition et diamètre des tuyaux, débits de ventilation,...).

Le modèle H.P.M (Human Physiological Model) est composé de trois sous modèles (Figure 30) :

- Le modèle de thermorégulation (THERPHY) calcule les données thermo-physiologiques, dont la température moyenne corporelle (T_{bm}). Le programme a été adapté à l'environnement informatique E.S.L. (European Simulation Language).

On y a ajouté des modèles purement biomédicaux permettant de calculer les rythmes respiratoires et cardiaques, entièrement conçus dans le langage ESL. Ces représentations ont été obtenues par des corrélations empiriques sur des données d'E.V.A. réelles.

- Le modèle (HEART) où le rythme cardiaque en activité dépend du rythme au repos, de la température moyenne corporelle, et de la production de chaleur métabolique. Celle-ci dépend de l'activité et des réactions physiologiques telles que les frissons.

- Le modèle (RESPI) calcule le rythme respiratoire en fonction du rythme cardiaque et de la production de chaleur métabolique. Il calcule également la consommation d'oxygène (V_{O_2}) et la production de gaz carbonique (V_{CO_2}).

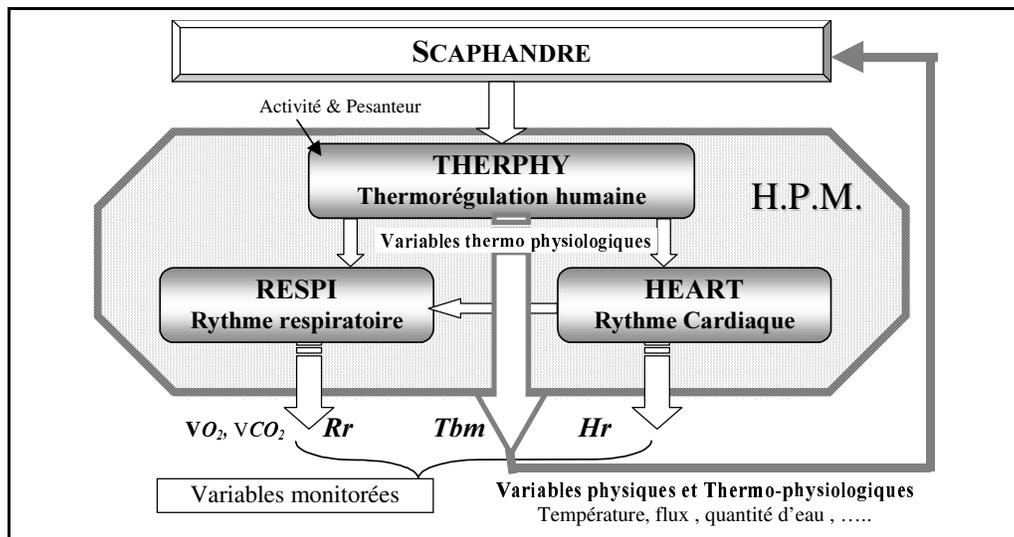


Figure 30 : Composition de H.P.M.

Les sorties de H.P.M (Human Physiological Model) sont de deux types :

- Les 3 variables contrôlées qui permettent de surveiller l'état du sujet.

- Toutes les données physiques et physiologiques utiles pour dimensionner le scaphandre, (quantité d'eau suée, V_{CO_2} expiré, ...), et permettant de comprendre éventuellement pourquoi une des variables de contrôle sort du domaine nominal.

H.P.M. fonctionne dans deux configurations : sur terre ou en impesanteur, ses résultats ont été comparés à des données expérimentales : sur terre (en chambre climatique) et dans l'espace (sorties réelles), données qui nous ont été fournies par ZVESDA (agence spatiale Russe).

Les résultats obtenus (Figure 31) sont encourageants [Thellier 1996], mais ne sont pour l'instant pas très précis car nous n'avions aucune donnée précise concernant les caractéristiques du scaphandre, il a donc fallu évaluer des conditions thermiques plausibles.

Tant que l'on ne possède pas de définition correcte de l'environnement thermique il est illusoire d'attendre des résultats fiables du modèle humain.

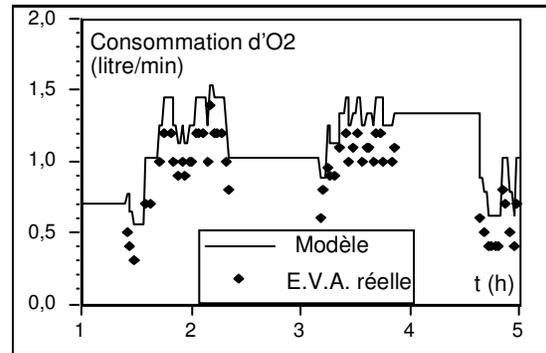


Figure 31 : Exemple de résultats de H.P.M.

Nous ne disposons que des températures d'entrées et de sorties du LCG et de l'OVN, or il y a des phénomènes de couplage entre ces deux systèmes. L'eau évaporée à la surface cutanée peut se recondenser plus loin sur les tuyaux d'eau froide. Les puissances calculées ne sont alors pas celles échangées avec le corps humain. Un début d'analyse des transferts couplés entre l'homme et son scaphandre a été abordé au cours d'un stage de DEA. Malgré le manque de données ce travail a fait émerger les paramètres essentiels [Piniac 1994].

H.P.M. a été développé en collaboration étroite avec des médecins du MEDES, pour toutes les modifications de paramètres physiologiques et la création des modèles biomédicaux. La phase de comparaison avec les résultats expérimentaux n'a pas toujours été facile. Des données très partielles nous étaient transmises par les gens de Zvesda, qui ont une approche et une culture scientifique bien différente de la nôtre. Sur ce contrat H.P.M., qui a duré 2 ans, j'ai travaillé durant 6 mois en tant que chercheur contractuel des hôpitaux de Toulouse. Cette thématique a peu duré au laboratoire, car les vols spatiaux européens habités ont été abandonnés et il n'est pas envisageable de poursuivre sans collaboration.

III.6. Conclusions

Pour un concepteur de systèmes de chauffage et de climatisation, procurer des conditions thermiques optimales aux utilisateurs doit être une des préoccupations principales. Il doit par conséquent posséder des outils permettant d'évaluer rapidement les conséquences sur l'homme des solutions techniques choisies.

Si l'on travaille sur la réponse de l'être humain à des stimuli thermiques, on ne peut pas limiter l'analyse des situations à l'étude d'un ou de plusieurs paramètres physiques, car c'est faire totalement abstraction du fait que toutes les parties du corps humain sont liées les unes aux autres et que le corps n'est pas un système passif. Par ailleurs il est évident que l'analyse sensorielle est indispensable, mais elle ne peut se faire sans tenir compte des phénomènes qui sont à l'origine des jugements de l'individu. L'utilisation des modèles complets, tels que nous les avons développés, (Figure 32) présente de nombreux avantages dont je ferais une brève liste. Il existe évidemment quelques inconvénients qui peuvent, en partie, être supprimés par des études plus poussées (cf. § Perspectives).

- Pour un utilisateur non averti, la description de l'état thermique du corps est plus compréhensible en terme de sensation thermique ("j'ai froid", "j'ai chaud") plutôt que de température cutanée. Il faut pouvoir passer des données physiques de l'ambiance aux jugements sensoriels qu'elles engendrent. Le corps humain a un comportement thermique difficile à prévoir, le système de thermorégulation joue un rôle complexe dans la répartition des températures et des mouillures cutanées et donc des flux échangés. Seul un modèle de thermorégulation souple mais suffisamment complet peut simuler ce comportement et être adapté à des utilisations multiples.

- Les modèles développés sont relativement simples d'utilisation, et permettent d'aborder les problèmes d'inconforts locaux en situations hétérogènes, et en régime instationnaire. Il est alors indispensable d'avoir une représentation fine des conditions climatiques. Elle peut être donnée par des mesures, pour les systèmes existants, ou par des calculs si on dispose d'un modèle de l'environnement thermique.

- Même si la phase expérimentale, qui est coûteuse, ne pourra jamais être totalement supprimée, les simulations de diverses configurations peuvent permettre de réduire le nombre d'expériences et donc les coûts d'études, lorsqu'il s'agit de la phase de développement d'un projet.

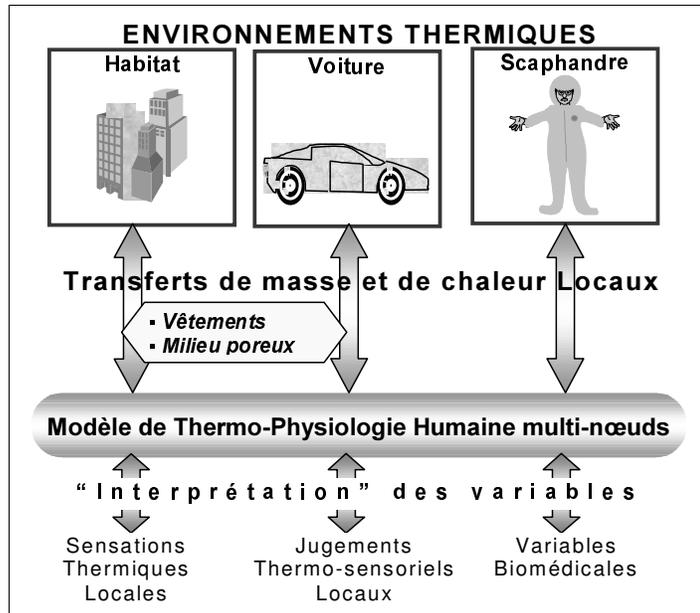


Figure 32 : Récapitulatif de la démarche

- Les modèles permettent d'avoir accès à des variables non mesurables, tels que les flux, et de créer des conditions où on peut découpler des phénomènes qui sont indissociables dans la réalité. L'analyse des flux peut permettre une compréhension détaillée des phénomènes mis en jeu et donc de prévoir des solutions adaptées en cas de problème.

- Enfin il faut remarquer que le modèle est toujours "d'humeur égale", contrairement aux individus qui, d'un jour à l'autre peuvent avoir des réactions très différentes. Le modèle n'a pas de variations intra-individuelles (Figure 33). Les différences données par le modèles sont uniquement dues à de faibles différences sur les conditions climatiques.

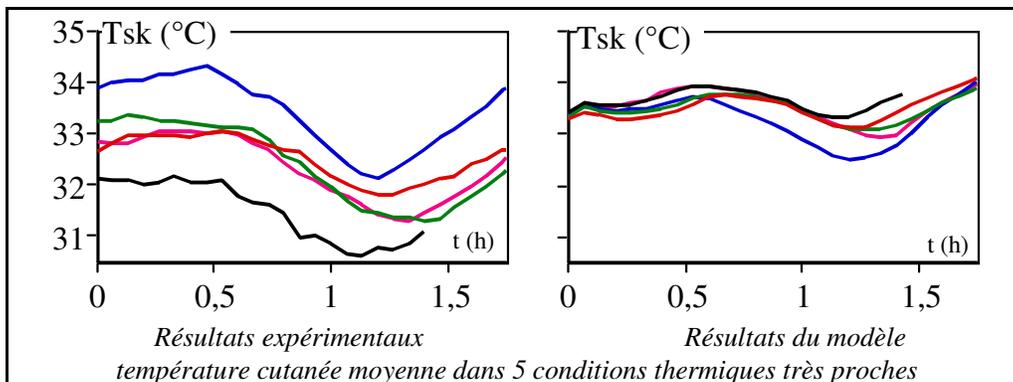


Figure 33 : Comparaison des résultats donnés par le modèle et des individus réels

IV. PERSPECTIVES

Les modèles ont été développés pour comprendre les phénomènes de thermorégulation en considérant presque toujours l'ambiance thermique comme uniforme, ce qui est effectivement le cas dans la plupart des chambres climatiques. Pour l'utilisation que nous voulions en faire, nous avons parfois eut du mal à faire admettre qu'il fallait pouvoir déterminer les effets des hétérogénéités d'ambiance ou de vêtements. Comme il est souvent dit avec humour : *"la tête dans le four, les pieds au congélateur et les deux manches d'un pull sur le même bras, d'après un calcul simple, le bilan thermique global est nul et l'individu peut être au confort"*.

L'étude du confort thermique est inter disciplinaire, pour avoir une approche complète, il faut travailler en permanence avec des physiologistes, des psychologues et des sociologues. Malgré les difficultés parfois rencontrées au cours du travail, je pense que cette approche est la seule qui nous permette de ne pas passer à coté de phénomènes importants, et qu'une vision partielle pourrait totalement oublier. C'est par la complémentarité des équipes que l'on pourra aboutir à une prise en compte de tous les phénomènes qui interviennent dans la notion complexe de confort thermique. Les perspectives de recherche dans ce domaine passent donc par des collaborations avec d'autres équipes. Plusieurs axes de développement sont envisageables.

IV.1. Utilisation des modèles

Nous considérons qu'à l'heure actuelle, dans chacun des domaines dans lesquels nous avons travaillé, les résultats des modèles sont fiables. Ils peuvent être alors utilisés pour faire du développement de nouvelles solutions techniques. Actuellement, c'est ce que fait PSA qui utilise MATHER pour le développement des nouveaux véhicules.

Dans le domaine du bâtiment, habitat et tertiaire, pour l'instant, la seule approche du confort proposée aux bureaux d'études, est le PMV/PPD et les recommandations associées, dont on connaît les limites. Il faut développer une approche plus fine. Un modèle de thermo-physiologie au sein d'une simulation complète d'un bâtiment peut être un outil très utile pour analyser les performances d'un système de chauffage ou de climatisation afin de choisir non plus seulement sur des critères de coût énergétique mais aussi de sensations thermiques optimales.

MARCL, avec la version simplifiée de TRIM, va bientôt être mis à la disposition de la communauté des thermiciens utilisant TRNSYS. Quelques simplifications sont encore nécessaires pour le rendre plus convivial.

IV.2. Elargissement du domaine de validité des modèles de physiologie

Pour l'instant, la plupart des modèles de physiologie représentent un individu "standard", c'est à dire qu'ils représentent un individu qui réagit comme n'importe quel autre mais en aucun cas, comme la médiane des individus.

Le modèle de Stolwijk, qui est à la base de notre travail, dont tous les paramètres ont été établis au cours de nombreuses expériences sur des personnes "calibrées", représente un homme de 1.75 m et 74 kg. Dans l'utilisation industrielle il peut être intéressant de pouvoir déterminer le comportement d'autres membres de la population. Des tentatives ont été faites de modifications des caractéristiques anthropométriques. Ceci peut être simple si on veut représenter un homme de taille différente, mais se complique si le but est de représenter une femme, une personne âgée ou un enfant, car les réactions physiologiques, les rapports masse grasseuse /masse musculaire, etc., sont différents.

Un grand nombre de variables internes au modèle ne sont pas accessibles à la mesure directe et sont déterminées par comparaison de leurs conséquences. Ce modèle semble être "robuste", mais,

comme tout modèle, il n'est pas totalement fiable en dehors des conditions de validations. Il a été établi en régime stationnaire et il est basé sur une théorie du système de régulation qui dépend des températures de peau et centrale, (sous forme de somme ou de produit). On sait par exemple que pour des activités intenses et au cours des régimes transitoires rapides ses résultats s'écartent plus des résultats expérimentaux, qu'au cours des régimes établis. Dans les régimes transitoires, certains physiologistes proposent de prendre en compte également les flux ou les vitesses de variation des températures. Ces phénomènes pourraient aisément être intégrés dans le modèle s'ils sont, au préalable, mieux connus et quantifiés.

Pour élargir le domaine de validité du modèle, il faudrait recalculer tous les paramètres, soit par un très grand nombre d'expériences, soit par une large étude bibliographique, soit par l'accès aux bases de données expérimentales existantes dans d'autres équipes. Or, comme nous l'avons constaté, valider un modèle avec des expériences qui n'ont pas été réalisées dans ce but est difficile car il manque toujours de données précises sur le climat.

Nous envisageons de tester les sensibilités du modèle aux divers paramètres à l'aide du logiciel ZOOM. Ceci nous permettrait ensuite de déterminer un nombre plus restreint d'expériences pour vérifier les conclusions et recalculer éventuellement certains paramètres.

Pour des raisons évidentes, ces développements ne sont envisageables qu'en collaboration étroite avec des physiologistes ou des médecins.

IV.3. Evaluation subjective du confort thermique

Les interpréteurs des variables physiologiques que nous avons créés sont basés sur des expressions empiriques reliant des paramètres physiologiques ou physiques aux jugements thermiques. Les corrélations sont empiriques bien que notre approche soit basée sur des données de la littérature.

Il serait souhaitable d'avoir une démarche plus complète pour arriver jusqu'à la notion de confort. Actuellement les informaticiens ont fait un pas en avant en intelligence artificielle avec la logique floue et les réseaux neuronaux, ils obtiennent des résultats en se basant sur des méthodes de détermination multi-critères qui se rapprochent plus de l'élaboration des raisonnements complexes du cerveau humain.

Ce problème ne peut pas être traité uniquement par des informaticiens et une collaboration est indispensable, comme nous l'avons déjà vu lors de la création du modèle neuronal pour piloter la climatisation des voitures. Une première sélection des variables pertinentes ne peut être faite que si l'on connaît bien les phénomènes mis en jeu.

IV.4. Pilotage des mannequins thermiques

De nombreuses études dans le domaine de l'environnement thermique utilisent des mannequins thermiques ; mesure des flux locaux en conditions hétérogènes (camions, grues, voitures,...), détermination des caractéristiques des vêtements, etc.

Même si la plupart des mannequins peuvent être régulés par segment, ils sont en général utilisés de façon isoflux ou isotherme. Dans le cas d'environnements hétérogènes, si les mesures de flux locaux sont déterminées avec des températures de "peau" identiques, on peut faire des erreurs importantes, car le corps humain n'est en aucun cas homogène.

Pour l'étude des vêtements, c'est par comparaison entre les puissances perdues lorsque le mannequin est nu, puis vêtu, que l'on détermine l'isolement vestimentaire. Les coefficients d'échanges superficiels sont déduits des mesures sur mannequin nu, puis sont ensuite utilisés pour

le calcul des caractéristiques du vêtement. Or il est évident que ces coefficients varient entre les deux situations. Par ailleurs, la couche d'air entre la peau et le tissu peut être importante et si les différentes zones ne sont pas à la même température, il y a des phénomènes de convection naturelle sous vestimentaire qui peuvent modifier nettement la valeur mesurée de l'isolement thermique.

Il y a quelques années, lorsque s'est posé le problème de la détermination des caractéristiques thermiques locales des vêtements, j'avais développé un modèle de mannequin thermique sec basé sur MARCL calculant les transferts secs, sans réactions de thermorégulation. Cette étude n'a pas été menée à bien, car les données sur mannequin nécessaires à la validation n'étaient pas disponibles. Je pense qu'un modèle de ce genre pourrait être très utile pour caler correctement tous les coefficients de transferts au niveau de la peau et des vêtements. Cette étude ne peut pas être poursuivie sans un partenariat avec une équipe possédant un mannequin.

Le modèle de thermorégulation complet peut être couplé à un mannequin thermique et permettre une meilleure détermination des flux locaux. Même si les transferts de chaleur latente n'existent pas sur le mannequin, si on le régule avec les températures de surface qu'aurait un individu qui transpire, on se rapproche plus des conditions réelles. Le modèle peut être totalement intégré au mannequin, c'est à dire que les flux secs mesurés peuvent servir au calcul des bilans thermiques, les flux latents étant calculés. Les températures de peau qui en découlent peuvent alors être transmises comme valeurs de consigne au régulateur du mannequin.

Une étude a été proposée à l'I.T.F. (Institut des Textiles de France), pour piloter leur mannequin à l'aide de MARCL, c'est à dire en prenant en compte les hétérogénéités des températures cutanées dues à la thermorégulation. Ce projet n'a pour l'instant pas abouti, car l'I.T.F. se trouve confronté aux problèmes de normalisation : actuellement, dans le monde, tous les laboratoires étudiant les vêtements utilisent des mannequins isothermes ce qui permet d'avoir des résultats comparables, à défauts d'être réalistes.

Les modèles peuvent également servir à piloter en température un "morceau" de mannequin pour prendre en compte le comportement thermique du corps entier. Par exemple pour tester des gants ou des chaussures, certaines équipes possèdent une main ou un pied thermostaté. Or, tenter de réduire les flux locaux, en augmentant la résistance thermique locale, d'un gant ou d'une chaussure, peut ne pas être suffisant. Le bilan thermique des extrémités est très lié à l'état général de vasomotricité qui dépend du bilan du corps dans son ensemble. Seul un modèle complet calculant les réactions de thermorégulation peut permettre d'aborder ce phénomène. On peut alors utiliser les flux mesurés localement comme entrée du modèle, et avoir un couplage entre le modèle physique de main et le corps "virtuel" complet.

Depuis longtemps lorsqu'on veut éviter les expériences sur l'être humain et obtenir des résultats reproductibles, l'approche s'est faite, soit par mannequin, soit par modélisation. Ces deux écoles sont souvent farouchement opposées, or je pense qu'elles peuvent être totalement complémentaires. Le mannequin permet d'analyser des effets qui ne sont pas modélisables pour l'instant : effet du mouvement du sujet sur le débit d'air sous vestimentaire, par exemple. A l'inverse le modèle permet de calculer des données qui ne sont pas accessibles sur mannequin sec : transferts latents, débits d'eau transpirée, réactions physiologiques. Le couplage modèle-mannequin peut être un enrichissement pour les deux approches.

IV.5. Approche du confort global

L'Homme demande de plus en plus une prise en compte globale de ses exigences de confort ; thermique, visuel, acoustique et olfactif. Les interactions possibles sont pour l'instant peu prises en compte. Dans les bureaux d'études, ces interactions sont plutôt gérées de façon intuitive, ce qui peut parfois aboutir à des situations désastreuses.

Les interactions entre les divers domaines du confort sont de plusieurs types (Figure 34) :

↔ Les interactions entre les conditions physiques : ce sont celles de l'enveloppe, elles semblent évidentes, mais ne sont pas toujours faciles à gérer, bien souvent pour améliorer un des domaines du confort on en dégrade un autre. Dans les projets les divers aspects de l'ambiance sont traités séparément puis un compromis est trouvé avec le critère de coût qui motive le choix final de la solution technique.

↔ Les interactions homme - environnement. Dans chaque domaine pris séparément on commence à être capable de prédire les conditions optimales.

↔ Les interactions psycho-physiologiques humaines. Elles sont très mal connues, longtemps il a été considéré que les divers domaines n'avaient pas d'interactions entre eux. On se rend compte que si chaque domaine est proche du confort les interactions sont faibles, mais si un des domaines s'en écarte alors il peut y avoir des effets de couplage ou de masque. Un groupe d'étude pour la qualité des ambiances (G.P.Q.A.) a pour but de faire émerger ces éventuelles dépendances. Les études, dans les divers laboratoires, sont pour l'instant faites par groupe de deux phénomènes : thermique/visuel, thermique/olfactif, ... Il faudra ensuite faire une synthèse et envisager un couplage complet. Cette dernière phase sera complexe car les mécanismes du cerveau humain, lors d'un choix multi-critères ne sont pas simples.

Certains aspects des couplages via l'ambiance sont en cours ; couplage thermique/visuel [Depecker 1997, Serres 1997]. Dans un premier temps, sans tenir compte des interactions humaines, il paraît envisageable d'avoir un logiciel complet permettant une approche multi-critères dans l'élaboration d'un bâtiment afin d'obtenir une meilleure adéquation entre les exigences d'un confort maximum pour un coût énergétique minimum. Ce logiciel peut aussi être composé de plusieurs logiciels, disponibles dans chacun des domaines, mais capable de communiquer entre eux. C'est le but actuel des Echanges de Données Informatiques (E.D.I.). Cette étude sur la qualité globale des ambiances et des interactions physiques doit être faite avec d'autres équipes : éclairagistes, d'acousticiens,...

Dans le domaine de l'habitat, MARCL, dans son environnement TRNSYS, aborde uniquement le problème du confort thermique. Il faudrait également disposer de modules pour aborder les problèmes de confort acoustique et d'éclairage, mais aussi de qualité de l'air qui est lié à l'écoulement aéraulique dans le bâtiment. Une partie de ce travail est en cours, TRNSYS peut être utilisé en parallèle avec COMIS qui calcule les écoulements d'air ou avec GENELUX qui calcul l'éclairage [Laforgue 1997].

Ma thématique de recherche s'est toujours située autour de la thermique, mais ma formation initiale et mes activités d'enseignement en "physique de l'habitat", me rendent particulièrement attentive à tous les aspects de la qualité des bâtiments.

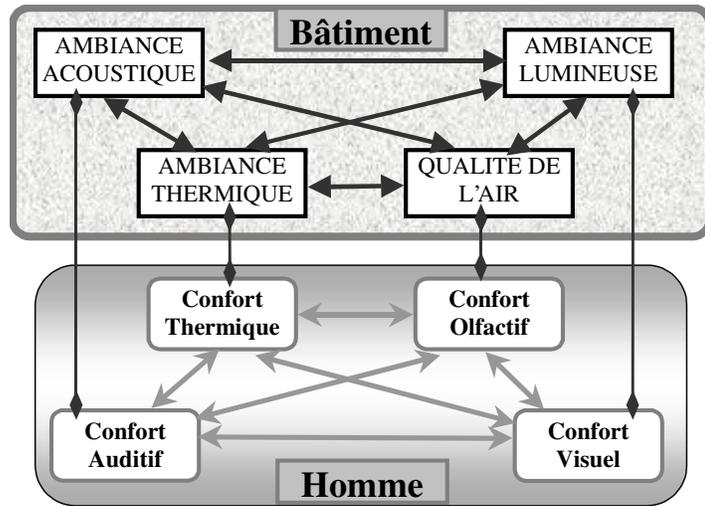


Figure 34 : Interactions entre les divers domaines du confort

Références bibliographiques

- ASHRAE – 1997. Handbook Fundamentals.
- BERGER X. - 1989. *Transferts pariéto-dynamiques en climat chaud et humide*. J.I.Th, Alger, pp. 750-757
- BOHM M., NORÉN, HOLMÉR I., NILSSON H. - 1997. *Special glazing to improve the thermal climate in cabs*. Proc. 4th A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp. 163-172.
- CANDAS V. - 1980. *Influence de la mouillure cutanée sur l'évolution du débit sudoral et des températures corporelles chez l'homme*. Thèse d'état
- CANDAS V., HERMANN C. - 1995. *Les bases physiologiques de l'inconfort*. Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 111-121. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B.
- C.S.T.B. - 1998. *Le Bâtiment demain et après demain*. CSTB édition.
- DEPECKER P., ACHARD G. - 1997. *Vers une approche globale de la climatisation des bâtiments*. Journée de la S.F.T. génie climatique. 12 p.
- DESSAGNE J.M. - 1985. *Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique. le profil de confort UCRES*. Proc Clima 2000, Copenhague.
- DITTMAR A., DELHOMME G., PAUCHARD T. 1995. *Le corps humain. Un système thermique complexe*. Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 3-41. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B
- FANGER P.O. – 1970. *Thermal Comfort*. Mc Graw Hill book compagny, New-York..
- FOHR J.P., TREGUIER G., COUTON D.- 1999. *Dynamic heat and water transfer simulation through layers of fabrics*. Proc. cong. Thermal protection of man under hot and hazardous conditions. pp.325-330
- GAGGE A.P. – 1973. *Rational temperature indices of man's thermal environment and their use with a 2-node model of his temperature regulation*. Fed. Proc. 32.pp.1572-1582
- GRIVEL F., HOEFT A., CANDAS V. - 1989. *Body temperatures and thermal perceptions during warm and cool periodic transients : influence of clothing*. In:Mital A.Advances in industrial ergonomics and safety. Talor and francis eds.
- GOUET L., FOHR J.P., SADAT H. - 1995. *Code de calcul des échanges radiatifs de l'homme dans une enceinte*. Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 111-121. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B
- HERMANN C., BOTHOREL B., CANDAS V. - 1995. *Inconfort thermique et ambiances hétérogènes*. Proc. Congrès de la S.F.T. pp. 555-559. Ed Elsevier Penot F. & Saulnier J.B.
- HOLMER I., NILSSON.H., NORÉN O. - 1995. *Thermal aspects of vehicle comfort*. Proc. 3rd A.T.A. congress, Bologne-Italie, pp.392-400.
- LAFORGUE P. - 1997. *Modélisation visuelle et thermique des sollicitations solaires et leurs effets dans le bâtiment. Application à l'étude et au contrôle du confort radiatif*. Doctorat de l'Université de Savoie. ISIGEC.188p.
- LARTIGUE B., MONCHOUX. F., BRETON J.L. - 1997. *Convection sous vestimentaire et mesure de flux échangés*. Revus générale de Thermique, n° 36, p. 469-479.
- LAVILLE A. - 1976. *L'ergonomie*. Collection que sais-je ? Presse Universitaire de France 125p.
- LIN C.H., HAN T., KOROMISLAS C.C. - 1992. *Effects of HVAC design parameters on passenger thermal comfort*. Proc. International congress & exposition of the S.A.E. Detroit-USA, SAE Technical papers series n° 92 0264.
- LOTENS W. - 1993. *Heat transfer from human wearing clothing*. Eds. TNO Institute for perception 209 p.
- MAUÉ J., WAHL D., CURRIE J. - 1997. *Computation of the thermal environment in passanger compartement and evaluation of thermal comfort*. Proc.4th A.T.A. Congress, pp. 147-155.

- MC CULLOGH E.A. , JONES B.W., HUCH J. - 1985.** *A comprehensive data base for estimating clothing insulation.* ASHRAE Trans. Vol 91.
- MC INTYRE M.A. - 1980.** *Indoor Climate.* Architectural science series, Applied sciences Publishers, London 443 p..
- NORMES : Ergonomie des ambiances thermiques.** Eds. AFNOR
ISO 7726 -1985 (F). *Ambiances thermiques - Appareils et méthodes de mesure des grandeurs physiques.*
ISO 7730 - 1985 (F). *Ambiances thermiques modérés, détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique.*
- OLESEN B. - 1985.** *Local Thermal Discomfort.* Technical review, Brüel & Kjær.
- PARSONS K.C. - 1993.** *Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environment on human health, comfort and performance.* Eds. Taylor & Francis.
- SARI H. - 1994.** *L'interface vêtement : échanges hygrothermiques et micro-climat sous vestimentaire.* Doctorat de l'Université de Nice Sophia Antipolis. 160 p.
- SERRES L. - 1997.** *Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique.* Doctorat de l'INSA Toulouse n°425. 140 p.
- STOLWIJK J.A.J.- 1970.** *Mathematical model of thermoregulation* Physical & behavioral regulation, ed. Hardy Gagge, Stowijk Thomas Publisher Springfield, Chap.48, pp.703-721.
- TRNSYS - 1997.** *Manuel d'utilisation version 14.2.* Madison Université du Wisconsin.
- VUILLERME V. - 1999.** *Echanges énergétiques entre le nourrisson et son environnement : étude des facteurs pouvant conduire à l'hyperthermie.* Doctorat de l'université de Poitiers. 180 p.
- WERNER J., WEBB. P. - 1993.** *A six cylinder model of human thermoregulation for general use on personal computers.* Annals of physiological anthropology. Vol. 12 No 3.pp.123-134

Liste des abréviations

A.D.E.M.E.	Agence De l'Environnement et de Maîtrise de l'Energie
A.F.M.E.	Agence Française pour le Maîtrise de l'Energie
A.I.C.V.F.	Association des Ingénieurs en Chauffage Ventilation et Froid
C.E.P.A.	Centre d'Etudes de Physiologie Appliquée - CNRS Strasbourg (ancien LPPE)
C.T.T.B	Centre Techniques des Tuiles et Briques
E.E.S.	Engineering Equation Solver (Logiciel)
E.S.A.	European Space Agency
HPM	Human Physiological Model (Modèle numérique)
I.R.bât.	Initiation à la Recherche dans le bâtiment - Paris
L.A.A.	Laboratoire d'Anthropologie Appliquée - CNRS Paris
L.A.A.S	Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des systèmes – CNRS Toulouse
L.P.P.E.	Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales - CNRS Strasbourg, (actuel CEPA)
MARCL	Modèle d'Analyse et de Recherche pour le Confort Local (Modèle numérique)
MATHER	modèle de MAnnequin THERmique (Modèle numérique)
MEDES	Institut de Médecine et de physiologie Spatiales, Toulouse
TRNSYS	TRaNsient Simulation SYStem (Logiciel)
Zvesda	agence spatiale russe

Nomenclature

<u>lettres</u>	<u>indices</u>
Hr Rythme cardiaque	bm moyenne corporelle
M Métabolisme	conv convection
Rr Rythme respiratoire	evap évaporation
Sens Sensation	gl global
T Température	I.R. Infra rouge
W Travail externe	Kond Conduction
	l local
	op opérative
Φ Flux de chaleur	ray rayonnement
ω Mouillure cutanée	sk cutané
	skl cutanée locale
	sol Solaire

Index des figures

Figure 1 : L'homme et son environnement.....	7
Figure 2 : Les interactions.....	7
Figure 3 : Bilan thermique du corps humain.....	9
Figure 4 : Evolution du bilan thermique en fonction des contraintes thermiques.....	11
Figure 5 : "Confort ou Inconfort" selon l'ambiance.....	12
Figure 6 : Schématisation de notre démarche.....	17
Figure 7 : Composition du corps humain dans le modèle de thermo-physiologie.....	18
Figure 8 : Entrées - Sorties du modèle de Thermorégulation.....	19
Figure 9 : Configurations à la surface de la peau.....	20
Figure 10 : Transferts dans les vêtements.....	20
Figure 11 : Températures cutanées locales avec deux répartitions différentes de vêtements.....	21
Figure 12 : Transferts de chaleur avec l'environnement "lointain".....	22
Figure 13 : Transferts en milieu poreux.....	24
Figure 14 : Instrumentation du siège et du sujet.....	24
Figure 15 : Températures au niveau du tronc lors du contact avec un milieu poreux.....	25
Figure 16 : Schématisation du calcul de la perception.....	26
Figure 17 : Températures ponctuelles et moyennes.....	27
Figure 18 : Variabilité Intra-individuelle.....	27
Figure 19 : Système de mesure utilisé.....	28
Figure 20 : Exemple de résultats obtenus sur maquette.....	29
Figure 21 : Loi de correction des mesures.....	29
Figure 22 : Mode de fonctionnement de TRIM.....	31
Figure 23 : Couplage entre MARCL, TRIM et les divers modèles.....	32
Figure 24 : Exemple de résultats dans l'habitat.....	32
Figure 25 : La "Boîte à sensation".....	33
Figure 26 : Exemple de conditions thermiques dans une voiture en hiver.....	34
Figure 27 : Entrées sorties du modèle MATHER.....	36
Figure 28 : Exemple de résultats obtenus avec MATHER.....	36
Figure 29 : Schématisation de l'homme et de son scaphandre.....	38
Figure 30 : Composition de H.P.M.....	39
Figure 31 : Exemple de résultats de H.P.M.....	40
Figure 32 : Récapitulatif de la démarche.....	41
Figure 33 : Comparaison des résultats donnés par le modèle et des individus réels.....	41
Figure 34 : Interactions entre les divers domaines du confort.....	45

Index des tableaux

Tableau 1 : Dépendance entre les transferts de chaleur et les paramètres de l'ambiance.....	10
Tableau 2 : Récapitulatif des types de sondes utilisées.....	28
Tableau 3 : Echelle de sensation thermique utilisée dans l'habitat.....	31
Tableau 4 : Echelle de jugements thermo-sensoriels.....	33
Tableau 5 : Variables monitorées pour l'astronaute.....	38

ANNEXES

Françoise THELLIER

Maître de Conférences - 1^{ère} Classe - Section 62, Energétique - Physique

L.E.S.E.T.H. - Laboratoire Etudes des Systèmes et de l'Environnement Thermique de l'Homme
Université Paul Sabatier - 118, route de Narbonne - 31062 Toulouse Cedex, FRANCE
Tél. : (33) (0) 561.55-64.79 ou 68.29 Fax : (33) (0)561.55.60.21

TITRES UNIVERSITAIRES

- 1985 Maîtrise de Sciences et Techniques : "Physique appliquée à l'habitat et au milieu de vie"
1986 D.E.A. d'Energétique, Toulouse : "L'habitant dans l'habitat"
1989 Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse. Spécialité : ENERGETIQUE.
"Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat."
Une approche de l'étude du confort"
Jury : A. Cordier (Président), V. Candas, P. Depecker, J.C. Hoogendorn, R. Javelas,
F. Monchoux, P. Morand, P. Vincensini.
-

CARRIERE UNIVERSITAIRE

- 1987/88 **Vacataire** : I.U.T., Génie Mécanique et Productique des Techniques Aérospatiales.
1988/89 **A.E.R.** Allocataire d'Enseignement et de Recherche
I.N.S.A. de Toulouse, Département de Génie Civil, option Génie Climatique.
1989-91 **A.T.E.R.** Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche.
Université Paul Sabatier, UFR-PCA : Physique-Chimie-Automatique.
1991/92 Chercheur contractuel, au Hôpitaux de Toulouse
1992... **Maître de Conférences, 62^{ème} section** Energétique physique. (1^{ère} classe janv. 95)
-

ENSEIGNEMENT

Cours

- *Le confort thermique, modélisation de l'habitant et de l'habitat.* D.E.A "Systèmes énergétiques"
- *L'homme et son environnement thermo-hygro-métrique.* Ingénieur "Physique de l'habitat"
- *Circuits frigorifiques et applications. Traitement de l'air.* DEUST. "Vide et Cryogénie"
- *Habitabilité.* M.S.T. "Physique de l'habitat"
- *Thermo-physiologie de l'homme dans son environnement.* Formation Continue de Médecine.
- *Effets des variations thermiques et hygrométriques sur les comportements humains.*
D.E.A. "Activités physiques de pleine nature"
- *Le confort thermique dans les bâtiments.* E.N.I.T. Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis
- *Bioénergétique. Le corps humain : un système thermique.* Ecole des Mines Albi Carmaux

Travaux Dirigés

- IUT, DEUG, INSA, MST "Physique de l'habitat" et "Procédés physico-chimiques"
- *Thermodynamique des réacteurs*
 - *Thermique du Bâtiment*
 - *Transferts Thermiques*
 - *Thermodynamique*
 - *Modélisation de l'habitat*

Travaux Pratiques

- INSA, DEUST, MST "Physique de l'habitat", Licence de Physique
- *Energétique physique*
 - *Acoustique*
 - *Eclairage*
 - *Climatisation*
 - *Electricité et thermique*
 - *Optique*

CONTACTS EXTERIEURS

◆ Contrats de recherche

- *Confort Thermique dans l'habitat* Ministère du Logement–AFME-EdF/GdF, 1988-91. Collaboration avec le L.P.P.E., de Strasbourg. (actuel CEPA)
- *Human Physiological Model for Extra Vehicular Activity* - MEDES-ESA, 1992-1993. Collaboration avec les médecins du MEDES et ZVESDA.
- *Modèle de Mannequin Thermique dans un véhicule* - PSA PEUGOT-CITROËN /VALEO-Thermique Habitat. 1992 à 98

◆ Collaborations internationales

- *Action Intégrée Franco-Tunisienne*, en liaison avec le laboratoire d'énergie solaire de l'E.N.I.T. (Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis) de 1994 à 98.
- *Stage* au Laboratoire de Chauffage et Conditionnement d'Air, Pr. O. Fanger, Université de Sciences et Techniques du Danemark (3 mois en 1997)

◆ Expositions

- *Mieux vivre chez soi et avec son environnement*, organisée par le CUIET de la mairie de Toulouse, et l'ADEME en 1996

◆ Associations

- AICVF : Associations des Ingénieurs en Climatologie Ventilation et Froid.
- ASHRAE : American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers
- IBPSA France : International Building Performance Simulation Association

Résumé d'activités - chronologie

Après avoir suivi la formation de la M.S.T. "Physique de l'habitat", il m'a paru normal d'effectuer mon stage de D.E.A. d'Energétique au LESETH. C'est donc depuis le début de 1986 que je fais partie de l'équipe "Habitat, thermique et environnement" et plus particulièrement dans la thématique du "confort thermique" qui a démarré au cours de mon D.E.A. et constitue maintenant un axe de recherche important (7 thèses dont deux en cours, 10 DEA, 9 stages IUT ou maîtrise).

Mon travail de recherche se situe autour des transferts de masse et de chaleur du corps humain, grâce à un modèle de thermo-physiologie humaine. Ce modèle a dans un premier temps été mis en place pour analyser les risques d'inconfort thermique dans l'habitat, mais il est rapidement apparu que cette approche intéressait d'autres domaines d'application.

L'habitat : Longtemps les questions de confort thermique ont été occultées par celles d'économie d'énergie. L'étude d'une régulation basée sur des indices de confort a fait l'objet de mon DEA. Cette approche a rapidement montré ses limites. J'ai alors développé, au cours de ma thèse, un modèle de thermo-physiologie et de thermique plus complexe : MARCL (Modèle d'Analyse et de Recherche sur le Confort Local). Il a fallu développer divers modèles pour mieux caractériser les échanges de chaleur entre l'homme et son environnement en régime transitoire et pour des situations thermiquement hétérogènes. La deuxième étape de cette étude a été de passer des variables physiologiques à la détermination des sensations thermiques. Ce travail a fait l'objet d'une thèse (Galéou 1991). L'ensemble des modèles a été validé par confrontation avec des résultats expérimentaux. Cette étude a été financée de 1987 à 1991 conjointement par le Ministère de l'urbanisme et du logement (PCA-MELLAT), l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie (AFME), et EdF-GdF, et menée en collaboration étroite avec le L.P.P.E. (Laboratoire de Physiologie et Psychologie Environnementales du CNRS/INRS). Des stages de DEA sont venus renforcer notre équipe (Zely 1989, Fudym 1990, Salti 1993).

Parallèlement, une importante étude a été menée sur la modélisation, la compréhension, et la mesure des transferts de masse et de chaleur à travers les vêtements ou les tissus, qui jouent un rôle fondamental dans les échanges homme-environnement ; une thèse (Derbel 1990) et plusieurs DEA (Levezac 1991, Hamachi 1992, Van de Steene 1995, Lartigue 1996).

Une collaboration avec le L.A.A.S. (Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes) et EDF a permis d'envisager une régulation thermique des bâtiments à l'aide de réseaux neuronaux. Il a d'abord fallu établir une hiérarchie des paramètres influençant la sensation thermique. Ce travail a été basé sur les résultats donnés par MARCL contrat "métrologie du confort" Ministère du Logement, janvier 92-mai 93.

L'influence de l'ensoleillement sur le confort thermique, avec calcul de la tache solaire dans l'habitat et sur MARCL a été étudié au cours d'une thèse (Belsmajor 1996).

Notre culture dans le domaine du confort thermique dans l'habitat est suffisamment forte pour que nous soyons régulièrement contactés par des industriels pour des petites études ; Etude des vérandas - Technal 1996, Monomur en briques – CTTB 1997/98, ...

L'équipe participe à une Action Intégrée CIMCU sur un projet de réglementation thermique du bâtiment en milieu maghrébin, avec l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

L'espace : De 1992 à 1993 une étude a été faite avec le MEDES (Institut de médecine et de physiologie spatiales) pour l'E.S.A. (European Spatial Agency). Le but de cette collaboration était la création du logiciel H.P.M. (Human Physiological Model) pour analyser les échanges de chaleur locaux entre l'homme et son scaphandre de sorties spatiales. MARCL a été adapté aux conditions très spécifiques de l'espace et une partie biomédicale a été ajoutée. Les résultats ont été comparés à des données expérimentales sur terre et dans l'espace qui nous ont été fournies par ZVESDA (agence spatiale Russe). Un stage de DEA a été fait sur les interactions scaphandre-homme (Piniac 1994). Pour l'instant cette activité est suspendue car les vols spatiaux européens ont été abandonnés.

La voiture : Un important contrat a été signé avec P.S.A.-PEUGEOT-CITROËN et VALÉO Thermique habitacle, de 1992 à 1997. Cette étude porte sur l'élaboration de MATHER, un modèle de MANnequin THERmique en vue de prédire les sensations thermiques du conducteur. Il a fallu prendre en compte toutes les spécificités de cet environnement très hétérogène et susceptible de varier rapidement. MATHER calcule les réponses thermiques subjectives du conducteur, en fonction des paramètres physiques et physiologiques. Les développements et la validation du modèle ont été faits par comparaison avec de nombreuses expériences effectuées en soufflerie. Une "boite à sensation" permettant de relever les sensations a été mise au point et fabriquée au laboratoire. Dix exemplaires simplifiés ont été produits pour P.S.A. Ce contrat a comporté deux phases les conditions d'hiver puis d'été. Ce qui nous a permis le financement de deux thèses ; une sur les conditions hivernales (Althabégoity, 1996) a été complétée par une analyse plus détaillée des transferts de masse et de chaleur dans le siège, des expériences spécifiques ont été réalisées au laboratoire. L'autre thèse, sur les conditions d'été (Piniac 1999), porte sur une analyse plus approfondie de la métrologie employée lors des essais en soufflerie. Des expériences ont eu lieu au laboratoire.

Les compétences acquises sur les réseaux neuronaux dans le domaine de l'habitat ont été exploitées dans le domaine automobile pour lequel nous disposons d'une base de données importante. Un système de gestion neuronale de la climatisation et du chauffage d'un véhicule, capable d'apprendre les habitudes du conducteur, a été réalisé (électronique et logiciel) et testé sur une Peugeot 605 (contrat PSA-LAAS de 1996 à 1998).

MATHER a été utilisé pour déterminer l'influence des paramètres environnementaux en vue de la mise au point d'un chauffage de type nouveau pour véhicule électrique, qui doit être économe en énergie, contrat PSA-L.A.A. (Laboratoire d'Anthropologie Appliquée) de 1996 à 98. Une thèse est en cours (Milvaque). Il a fallu là aussi adapter le modèle pour prendre en compte les particularités des systèmes de chauffage testés.

Publications dans des revues à comité de lecture

1. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G.
Analyse des paramètres de confort thermique par modélisation d'un individu dans son habitat.
Chauffage Ventilation Conditionnement, C.V.C. n°1/2, pp.27-32, janvier/février 1989.
2. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Architecture climatique et confort.
Bâtiment Energie n°57, pp.24-26, août/sept. 1989.
3. MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F., CORDIER A.
Gestion de l'air d'un local : Modélisation fine des échanges d'humidité internes air-habitant-équipement.
Revue Générale de Thermique, Tome XXVIII, n° 335/336, p.663-669, décembre 1989.
4. THELLIER F., MONCHOUX F., CORDIER A., GALEOU M., SERIN G.
Analyse et Gestion du confort dans l'habitat.
PROMOCLIM Tome 23 n°3, p.169-175 avril/mai 1992.
5. MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F., CORDIER A., GALEOU M.
Des logiciels pour l'analyse et la gestion du confort thermique.
Revue Générale de Thermique. N°371, p. 616-620, novembre 1992.
6. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F.
The analysis of thermal comfort requirement through the simulation of an occupied building.
Ergonomics Vol. 37, n°5, p.817-825. Juin 1994.

Communications dans des congrès et colloques avec actes

Congrès internationaux

- CI.1. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Influence de la sensation thermique de l'habitant sur la régulation d'un bâtiment.
Proc. J.I.Th. Vol.2, pp.574-579, eds. PIRSEM-CNRS, Lyon, septembre 1987.

- CI.2. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Simulation of an occupied building for comfort analysis.
 Proc. I.S.E.S., Vol.4, pp.3275-3279, Pergamon press, W.H.Bloss, F. Pfisterer Ed., Hambourg-RFA, septembre 1987.
- CI.3. CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Comportement thermique d'un habitant.
 Proc. C.I.B. International Workshop, W-67, Sophia-Antipolis, avril 1989.
- CI.4. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F., SERIN G., GRIVEL F., CANDAS V.
Influence de l'environnement sur le corps humain. Modélisation d'un bâtiment occupé. Proc. C.I.B, Vol.1, pp.321-328, Paris, juin 1989.
- CI.5. CORDIER A., MONCHOUX F., THELLIER F., ZELY D.
Le confort thermique dans le bâtiment.
 Colloque "Energies Renouvelables", Marrakech-Maroc, juin 1989.
- CI.6. CORDIER A., MONCHOUX F., THELLIER F., ZELY D.
Cold surface influence on thermal comfort.
 Proc. I.S.E.S. Pergamon press, Vol.2, pp.1094-1098, Kobe-Japon, septembre 1989.
- CI.7. CORDIER A., DERBEL H., MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F.
Influence du vêtement sur le confort thermique. Modélisation en régime dynamique.
 Proc. 4th J.I.Th. Vol.2, pp.645-651, Alger, novembre 1989.
- CI.8. DERBEL H., SERIN G., THELLIER F., MONCHOUX F.
Influence du vêtement sur l'évolution des variables physiologiques d'un sujet soumis au rayonnement solaire.
 Proc. 5th J.I.Th. Vol.2, pp.761-768, PIRSEM-CNRS Ed. , Monastir-Tunisie, avril 1991.
- CI.9. THELLIER F., CORDIER A., GALEOU M., MONCHOUX F., FUDYM O.
Comfort analysis as criterion for energy management.
 Proc. IBPSA, "Building Simulation'91", pp.619-622, Sophia-Antipolis- France, août 1991.
- CI.10. CORDIER A., GALEOU M., MONCHOUX F., THELLIER F.
Predicting local thermal feeling in a building.
 Proc. I.S.E.S., Pergamon Press, Vol.3, part 1, pp.3035-3040, Denver-USA, août 1991.
- CI.11. LARBI-YOUCHEF M.H., CORDIER A., MONCHOUX F., THELLIER F.
Effect of a veranda on thermal behaviour of a building with an occupant.
 Proc. 2nd world renewable energy congress, Reading-U.K., septembre 1992.
- CI.12. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F.
Clothings effects on thermal. Evolution by transient modelling.
 Proc. 5th Int. Conf. on Environmental Ergonomics, ICEE'92, pp. 32-33. Maastricht-Neederland, novembre 1992.
- CI.13. MONCHOUX F., THELLIER F., CORDIER A.
L'homme et son environnement thermique.
 Proc. Colloque Franco-Québécois, "Thermique des systèmes à température modérée", pp. 81-86, Toulouse-france, juin 1993.
- CI.14. LARBI-YOUCHEF MHAB., CORDIER A., MONCHOUX F., THELLIER F.
design of building from a thermal comfort code.
 Proc. 2nd BEPAC conf., York-U.K., Avril 1994
- CI.15. MONCHOUX F., THELLIER F., BAGIANA F. (ESA) , BARER A.(ZVESDA)
Human physiological model during Extra Vehicular Activity.
 Proc. 24th Inter. Conf. on Environmental Systems and 5th European Symposium on Space and Environmental Control Systems. SAE N° 94 1333. Friedrichshafen-Germany, juin 1994.
- CI.16. ALTHABÉGOÏTY F., CORDIER A., THELLIER F.
MATHER - A model to study thermal comfort in vehicle.
 Proc. 2nd Inter. Congress on Physiological Anthropology, p.132-136. Keil-Germany, septembre 1994.
- CI.17. THELLIER F., MONCHOUX F., BONIN J.L., CLEMENT G. (MEDES)
Model of physiological responses during spatial Extra Vehicular Activity.
 Proc. 6th Int. Conf. on Environmental Ergonomics, ICEE'94, pp. 175-175, Eds. J. Frim, M.B. Ducharme, P. Tikuisis, Montebello-Canada, septembre 1994.

- CI.18. THELLIER F., ALTHABÉGOÏTY F., CORDIER A.
Modelling of local thermal sensations of a car driver in winter conditions.
Proc. 6th Int. Conf. on Environmental Ergonomics, ICEE'94 , pp.190-191, Eds. J. Frim, M.B. Ducharme, P. Tikuisis. Montebello-Canada, septembre 1994.
- CI.19. BELMASJOR N., MONCHOUX F., THELLIER F.
Ambiance interieure dans l'habitat ensoleillé.
Proc. European conf. on energy performance and indoor climate in buildings. pp. 404-409, Lyon-France, novembre 1994 .
- CI.20. THELLIER F., ALTHABÉGOÏTY F., CORDIER A.
Modelling of radiative exchanges between a car driver and his vehicle.
Proc. A.T.A. Congress, n°SAE 95 a1006, p 413-420, Bologne-Italie, mars 1995.
- CI.21. MONCHOUX F., THELLIER F., BAGIANA F. (ESA), BARER A.S.,(ZVESDA) CLEMENT G. (MEDES) , BRAAK L.(MEDES)
Development and validation of a human model for biomedical responses during Extra Vehicular Activity.
11th I.A.A. Man in Space symp. Man in space for science and technology development. Toulouse-France, mars 1995.
- CI.22. PETITJEAN C. (Valéo), THELLIER F.
MATHER : in cab thermal comfort numerical model.
Proc. S.A.E. Congress, n°950019, Detroit-U.S.A., mars 1995.
- CI.23. MONCHOUX F., THELLIER F., CORDIER A.,
Gestion des ambiances thermiques.
Colloque Franco-Québécois "Thermique des systèmes à températures modérées". pp. 29-33, Sherbrooke-Canada, mai 1995.
- CI.24. PINIEC S. , THELLIER F., DUVEAU H. (PSA) , DEFFIEUX J.C. (Valéo)
MATHER : Model of local thermal sensations of a car driver.
Proc. A.T.A. Congress , pp. 109-117, n° SAE 97A3014, Bologne-Italie, octobre 1997
- CI.25. MILVAQUE C., MONCHOUX F., CORDIER A., THELLIER F.
Confort thermique dans les voitures. Evaluation en conditions réelles
Colloque Franco-Québécois . Canada, mai 1999.

Congrès Nationaux

- CN.1. THELLIER F., MONCHOUX F., CORDIER A., BELMASJOR N.
L'homme un système thermique. Modélisation et usage des modèles
Proc. congrès de la S.F.T. " Thermique au service de l'homme et de son proche environnement". Elsevier, eds. F.Penot et J.B. Saulnier, p.510-515, Poitiers-France, mai 1995.
- CN.2. ALTHABÉGOÏTY F., PINIEC S., THELLIER F.
Effet sur le confort thermique du conducteur sur du choix du mode de chauffage d'une voiture froide.
Proc. congrès de la S.F.T. " Thermique au service de l'homme et de son proche environnement". Elsevier, eds. F.Penot et J.B. Saulnier, pp.543-548, Poitiers-France, mai 1995.
- CN.3. MONCHOUX F., LARTIGUE B.,THELLIER F.
Convection naturelle sous vestimentaire
Proc. Congrès S.F.T., "Thermique aéronautique et spatiale", Toulouse, mai 1997.
- CN.4. THELLIER F., PINIEC S. , MONCHOUX F.
Intérêt des modèles de thermo-physiologie dans l'analyse des conditions thermiques complexes. Proc. Congrès S.F.T., "Thermique aéronautique et spatiale", pp.749-754, Toulouse, mai 1997.
Paru également sous le titre : *Interest of thermophysiological models in the analysis of complex thermal conditions.* Proc. colloque "La Protection thermique de l'homme en milieu chaud et hostile", Paris, pp. 313-318, mars 1999.

Journées d'études

- J.1. CORDIER A., THELLIER F.
Modèle de bilan thermique du corps humain.
Journées de la S.F.T. : "Etat des connaissances sur le confort hygro-thermique dans les bâtiments", Paris, 1988.

- J.2. CORDIER A., MONCHOUX F., THELLIER F.
Modèle de thermorégulation humaine. Comparaison en situation réelle et situation simulée.
Journées de la S.F.T., "Evaluation des échanges de chaleur et du confort thermique", Paris, juin 1989. Paru également dans FrancoClim 2-3 novembre 1989.
- J.3. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F.
Modélisation des échanges thermiques et des réactions physiologiques.
Journée de la S.F.T. "L'homme dans son environnement thermique", 11 p. Paris, mai 1993.
- J.4. MONCHOUX F., THELLIER F.
Influence de la posture et de la thermorégulation sur les échanges radiatifs entre l'homme et son environnement.
Journée de la S.F.T. " Modélisation thermique, physique et mathématique de la cellule à l'organisme tout entier et à son environnement", Paris, janvier 1996.
- J.5. THELLIER F., MONCHOUX F.
*Où en sont les méthodes d'évaluation de l'inconfort local.*Journée de la S.F.T., "Innovations et perspectives de recherche en génie climatique", Paris, octobre 1997.
- J.6. CORDIER A., THELLIER F.
Introducing P.M.V. in TYPE 56 Journée de TRNSYS, Liège-Belgique janvier 1998.
- J.7. CORDIER A., THELLIER F., MONCHOUX F.
mise en œuvre du PMV dans le modèle multi zone (Type 56) 1^{ère} Journées Francophones TRNSYS, Nice-France, avril 1998.
- J.8. THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F.
TRNSYS-Type-MARCL : Module d'Analyse et de Recherche du Confort Local.
1^{ère} Journées Francophones TRNSYS, Nice-France, avril 1998.

Mémoires

- THELLIER F. *L'habitant dans l'habitat.* Rapport de stage, D.E.A. d'Energétique, 50 p., juillet 1986.
- THELLIER F. *Modélisation de comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort.*Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse n° 510, 190 p., 1989.

Rapports hors contrat

- RH.1. THELLIER F.
Analyse des paramètres de confort thermique par modélisation d'un individu dans son habitat.
Rapport présenté au Concours A.I.C.V.F. jeunes, 22 p., juin 1988. (Premier prix, spécial Maîtrise de l'énergie)
- RH.2. THELLIER F.
Fiche Proforma, Version 1.0 - *Notice d'utilisation du modèle MARCL de comportement thermique du corps humain*, décembre 1989.
- RH.3. THELLIER F., CORDIER A., GALEOU M., MONCHOUX F.
Fiche Proforma, Version 2.0 - *Notice d'utilisation sur MARCL. Modèle de thermorégulation humaine et évaluation des sensations thermiques pour un homme dans une ambiance hétérogène*, 35 p. novembre 1991.
- RH.4. CORDIER A., GALEOU M., MONCHOUX F., THELLIER F.
Fiche Proforma - *Notice d'utilisation sur TRIM. Modèle de prédiction de la sensation thermique de l'individu*, 15 p. novembre 1991.

Rapports de Contrats

L'Habitat

Etude de l'influence de l'habitant sur le comportement d'une enceinte habitable.

AFME/IRBât (Initiation à la Recherche dans le Bâtiment).

THELLIER F.

- Rapport n°1, 20 p., septembre 1987. - Rapport n°2, 23 p., septembre 1988.

Confort Thermique dans l'Habitat

Contrat PCA-MELLAT/EdF/GdF

Convention de recherche n°87 61 370 00223 37501

THELLIER F., MONCHOUX F., CORDIER A., SERIN G.

- *Analyse des paramètres de confort thermique par modélisation d'un individu dans son habitat*
 - Rapport d'avancement n°1, 21 p., juin 1988.
 - Rapport d'avancement n°2, 24 p., octobre 1988.
- Ma thèse a constitué le Rapport final. *Modélisation de comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort.* 190 p., juillet 1989.
- Rapport Supplémentaire. *Les limites d'inconfort. Comparaison Modèle-expériences.* 20 p., janvier 1990.

Contrat N°1 - AFME / EdF / GdF.

Convention de recherche n° 9-04-0109

THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F., GALEOU M.

- *Confort thermique de l'habitant. Améliorations apportées au modèle de thermorégulation humaine.* 10 p., mars 1990.
- *Influence de la posture sur les échanges radiatifs. Comparaison avec les expériences à climat constant pour un sujet assis et debout.* 13 p., juillet 1990.
- *Confort thermique. Comparaisons des résultats modèle - expériences dans toutes les configurations.* 40 p., décembre 1990.

Contrat N°2 - AFME / EdF / GdF.

Convention de recherche n°0.04.0067

GALEOU M., CORDIER A., THELLIER F., MONCHOUX F.

- *Modèle de prédiction de la sensation thermique de l'individu.*
 - Rapport d'avancement n°1, 10 p., janvier 1991.
 - Rapport d'avancement n°2, 11 p., mars 1991.
- La thèse de M. Galéou a constituée le Rapport final. *La sensation thermique de l'homme dans son habitat. Des grandeurs physiques et physiologiques aux sensations.* , 200 p., octobre 1991.

Etude du monomur. Etude de l'inertie et son impact sur le confort.

CTTB (Centre Technique des Tuiles et Briques)

MONCHOUX F., THELLIER F. et Maîtrise de physique de l'habitat

- Rapport n° 1, 20 p., juin 1997
- Rapport n° 2, 15 p., juillet 1997
- Rapport n° 3, 30 p., juin 1998

L'Espace

Human Physiological Model for Extra-Vehicular Activity

Medes (groupement de MEDEecine Spatiale) - ESA (European Space Agency)

THELLIER F., MONCHOUX F. (LESETH), CLEMENT G. , BRAAK L. (MEDES)

- Rapport d'avancement, 40 p., en anglais, Avril 1992.
- Rapport Final du premier contrat, 200 p., en anglais, septembre 1992.
- Rapport Final du deuxième contrat, 150 p., en anglais, novembre 1993.

La Voiture

MATHER : MAnnequin THERmique dans un Véhicule Automobile

PSA PEUGEOT CITROËN - VALÉO THERMIQUE HABITACLE

Convention de recherche n°92.32.020

Phase I - les Conditions d'hiver - Confidentiel

THELLIER F., ALTHABEGOITY F., CORDIER A., MONCHOUX F., G. SERIN

- Rapport d'avancement n°1, 40 p., septembre 1992.
- " " " " n°2, 120 p., février 1993.
- " " " " n°3, 50 p., juin 1993.
- " " " " n°4, 43 p., octobre 1993.
- Rapport d'avancement n°5, 51 p., février 1994.
- Rapport Final de synthèse, 150 p., juin 1994.

- Enveloppe Soleau, novembre 1993.

Phase II - les Conditions d'été - Confidentiel

THELLIER F., PINIEC S., CORDIER A., MONCHOUX F.

- Rapport de recherche n°II.1, 50 p., décembre 1994.
- " " " " n°II.2, 85 p., avril 1995.
- " " " " n°II.3, 83 p., septembre 1995.
- " " " " n°II.4, 160 p. janvier 1996.
- " " " " n°II.5, 70 p., juin 1996.
- " " " " n°II.6, 100 p., décembre 1996.

Rapport final II., 120p., Janvier 1997.

- Récapitulatifs de tous les essais, 145 p., décembre 1996.

Chauffage d'une voiture électrique - P.S.A. PEUGEOT CITROËN - Confidentiel

LAA (Laboratoire d'Anthropologie Appliquée)

Convention de recherche n°96 32 046

MILVAQUE C., MONCHOUX F., THELLIER F.

- Rapport de recherche n° 1, 50 p., janvier 1997.
- " " " " n°2, 85 p., mai 1997.
- " " " " n°3, 95 p., juillet 1997
- " " " " n°4, 18 p., octobre 1997.
- " " " " n°5, 22 p., janvier 1998.

Rapport final, octobre 1998.

LES PUBLICATIONS SIGNIFICATIVES en annexe de l'habilitation complète

MONCHOUX F., SERIN G., THELLIER F., CORDIER A., GALEOU M.

Des logiciels pour l'analyse et la gestion du confort thermique.

Revue Générale de Thermique. n°371, p. 616-620, novembre 1992.

THELLIER F., CORDIER A., MONCHOUX F.

The analysis of thermal comfort requirement through the simulation of an occupied building .

Ergonomics Vol. 37, n°5, p.817-825. Juin 1994.

MONCHOUX F., THELLIER F., BAGIANA F. (ESA) , BARER A.(ZVESDA)

Human physiological model during Extra Vehicular Activity.

Proc. 24th Inter. Conf. on Environmental Systems and 5th European Symposium on Space and Environmental Control Systems. SAE N° 94 1333. Friedrichshafen-Germany, juin 1994.

THELLIER F., ALTHABÉGOÏTY F., CORDIER A.

Modelling of radiative exchanges between a car driver and his vehicle.

Proc. A.T.A. Congress, n°SAE 95 a1006, p 413-420, Bologne-Italie, mars 1995.

PINIEC S. , THELLIER F., DUVEAU H. (PSA) , DEFFIEUX J.C. (Valéo)

MATHER : Model of local thermal sensations of a car driver.

Proc. A.T.A. Congress , pp. 109-117, n° SAE 97A3014, Bologne-Italie, octobre 1997

THELLIER F., MONCHOUX F.

Où en sont les méthodes d'évaluation de l'inconfort local.

Journée de la S.F.T., "Innovations et perspectives de recherche en génie climatique", Paris-France, octobre 1997.

L'HOMME ET SON ENVIRONNEMENT THERMIQUE. Modélisation

Françoise THELLIER

Document extrait du mémoire de l'habilitation à diriger des recherches
(62^{ème} section Energétique physique)

L'homme demande une bonne qualité d'environnement dans toutes les situations : habitat, transports,... Le travail présenté s'intéresse à l'aspect thermique. Notre but est une meilleure compréhension des interactions homme-environnement.

Ce travail s'est fait par le développement de modèles permettant le calcul fin des transferts de masse et de chaleur locaux au niveau cutané. Pour cela il faut connaître avec précision les conditions climatiques, c'est à dire les différentes variables physiques et leurs variations spatiales et temporelles. Il faut également déterminer les effets de celles-ci sur le corps humain.

Cette analyse passe donc par une modélisation de la thermo-physiologie humaine. Le corps humain est un système thermique non linéaire, complexe et régulé. Deux modèles sont utilisés, l'un simple où le corps est composé de deux compartiments pour l'analyse des situations homogènes, l'autre plus complet de 24 à 45 compartiments selon la complexité des conditions thermiques.

Des modèles sont créés pour calculer séparément chaque type de transfert par convection, rayonnement infra-rouge et solaire, transfert à travers les vêtements ou un milieu solide. Diverses campagnes d'expériences ont été réalisées pour établir et valider ces modèles développés essentiellement au sein du logiciel TRNSYS.

Nous présentons des applications dans l'habitat, la voiture et le scaphandre de sortie spatiale. Pour chaque domaine nous donnons, les particularités des conditions thermiques, les expériences réalisées et les interpréteurs. Afin d'analyser les situations réelles, le nombre des variables doit être limité. Nous avons développés des interpréteurs qui traduisent les variables physiques et/ou physiologiques en données pertinentes pour le domaine étudié. Il s'agit de sensations thermiques locales pour l'habitat ou de rythme cardiaque dans le scaphandre.

Pour un individu soumis à des conditions thermiques complexes, cet outil complet permet d'obtenir toutes les variables physiques, physiologiques et perceptives, locales et globales, ainsi que des variables non mesurables comme les flux de masse ou de chaleur permettant de mieux comprendre les phénomènes de couplages. On peut alors envisager le dimensionnement d'équipements techniques en tenant compte des exigences de "confort" de l'être humain.

