République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.
Université de Médéa
Département de Génie mécanique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Génie civil

Option : Equipement de l'habitat

Thème

Modélisation du confort thermique dans l'habitat

Présentée par

CHEMMAA SOUMIA

MESSAOUI RACHIDA

Dirigée par

Dr. Z .TRIKI

Promotion 2018

Remerciement

Avec l'aide de Dieu tout puissant, nous a pouvoir accomplir ce modeste travail

Ce travail de recherche pour l'obtention du diplôme de Master, dirigé par Monsieur ***TRIKI Zakaria.***

Nous sincères remerciements en première lieu à notre promoteur Monsieur ***TRIKI Zakaria,*** *pour sa disponibilité, pour son suivi, ses nombreux conseils et ses Critiques constructives pour l'élaboration de ce travail de recherche.*

A chacun des membres du Jury de Thèse

Nous tenons à les remercier à nos collègues du département de génie mécanique, qui ont contribué de prés ou de loin à la réussite de ce travail, qu'ils trouvent toute ma gratitude.

Nous remercier de toute l'équipe de la bibliothèque de technologie pour leur gentillesse et leur compréhension.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ;

A Mama Aicha qui a tout fait pour que je réussisse dans ma vie, que Dieu me les protèges.

Toute la famille de Chemmaa et Chemlale.

A ma sœurs Ahlem et son mari Bachir et son petit ange Ilaf.

A tous mes frères « Slimane Krimo Hamid Chafik Tahar Ramande Mahfoud Mohammed » et mes enfants Roumaysa, Hafsa, Rania, Alaa, Abd Almouman Taysir, Sohaybe, Israa, Anfal, Iyade, Hanine, Lokman.

Sans oublie à tous qui j'aime et qui m'aime.

Soumia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail ;

A ma précieuse Mère qui a tout fait pour que je réussisse dans ma vie, que Dieu me les protèges.

A mon cher Père qui m'encourageait toujours.

Je souhaite que Dieu me garde mes parents à longue vie et de bonne santé Leurs satisfaction me conduit à ma réussite dans ma vie estudiantine.

A mon mari Amrou et toute la famille TALEB

A ma belle sœur OUarda qui m'encourageait tout le temps.

A ma sœur Sara et son mari Karim JAOUABI et ses petits enfants : fares anfal et israa

Et aussi mes sœurs Brayka et lyakot

A tous mes frères et ses enfants et surtout mes chers frères Moustafa et Achoure .et toute ma famille.

Mes chères amies: sans oublie aucun.

Rachida

Nomenclature

Symboles :

A	Age	ans
Ac	surface cutanée participant aux échanges thermiques convectifs.	m^2
AD	surface de Dubois, surface cutanée totale	m^2
Ad, cl	surface corporelle de l'homme vêtu	m^2
Ae	surface cutanée qui évapore parce qu'elle est mouillée	m^2
Ar	surface cutanée participant aux échanges thermique radiatifs	m^2
BC	convection sanguine	
C	Flux de chaleur échangé par convection	W/m²
Cres	Flux de chaleur échangé par convection respiratoire	W/m²
Eres	flux de chaleur par évaporation respiratoire	W/m²
C_b	chaleur massique de sang	kJ/(kg.K)
Cp	chaleur spécifique de l'air	kJ/ (kg. K)
Cp c	chaleur spécifique du noyau =3.49	kJ/ (kg. K)
Cp sk	chaleur spécifique de la peau =3.49	kJ/ (kg. K)
Cp, bl	chaleur spécifique du sang = 4.19	kJ/ (kg.K)
Emax	flux de chaleur maximum possible	W/m²
Eres	flux de chaleur par évaporation respiratoire	W/m²
Ereq	flux de chaleur requis pour le confort	W/m²
Esk	flux de chaleur totale à la surface de la peau	W/m²
Edif	flux de chaleur par diffusion à travers la peau	W/m²
Ep	flux de chaleur prédit	W/m²
Ersw,req	débit sudoral nécessaire pour le confort	
ET*	Température effective	°C
Fcl	facteur de modulation des échanges de chaleur sèche lié à l'isolement vestimentaire	
Fpcl	facteur de modulation des échanges de chaleur sensible lié à l'isolement vestimentaire	
Fcl	Facteur d'habillement	
H	taille	M
hR	humidité relative	%
hc	Coefficient d'échange de chaleur sensible par convection à la surface	W/ (m².K)
hr	Coefficient d'échange de chaleur sensible par rayonnement à la surface	W/ (m².K)
hco	coefficient d'échange de chaleur par convection naturelle	
he	Coefficient d'échange de chaleur par évaporation	W/ (m².kPa)

It	isolement thermique total	$K \cdot m^2/W$
Icl	isolement thermique du vêtement	$K \cdot m^2/W$
Icle	Effective	$K \cdot m^2/W$
Icli	Elémentaire	$K \cdot m^2/W$
Ia	isolement thermique de la couche d'air K·m2·	$K \cdot m^2/W$
Icls	vêture standardisé	Clo
i_m	indice de perméabilité du vêtement	
K	Flux de chaleur échangé par conduction, W/m²	W/m²
Td	Conductivité tissulaire = 5.28	W/ (m².K)
L	l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue	W/m²
L"	charge thermique	W /m²
M	Production de chaleur interne (taux de métabolisme)	W/m² ou Met
Ma	métabolisme d'activité	
M_b	métabolisme basal	
Mp	composante posturale	
M_{shiv}	Production de chaleur interne (frisson)	
MM	composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse	
m	masse corporelle	Kg
m_{bl}	Débit sanguin périphérique	L/m².h
m_{sw}	Le débit de sudation régulatrice	g/m².h
nsc	efficacité de sudation	[%]
P	Poids	Kg
Pa	Pression de vapeur d'eau	kPa
P_{SET*}	pression de vapeur saturante à la température SET*	
Psk,s	saturée à tsk	
PaH2O	pression partielle de vapeur d'eau ambiante	
Pexp	pression de vapeur d'eau dans l'air expiré	kPa
Q	Flux de chaleur échangé par le corps humain	W/m²
Qsk	Flux de chaleur échangé à la surface cutanée	W/m²
Qres	Flux de chaleur échangé par voie respiratoire	W/m²
Qevp	Echange de chaleur latente	W/m²
Qdry	Echange de chaleur sensible	W/m²
QR	quotient respiratoire, le rapport entre Vco2 et Vo2 (QR est compris entre 0,83 au repos et 1,00 lors d'u travail très intense)	
R	Flux de chaleur échangé par rayonnement	W/m²
Ra	résistance à la vapeur à la limite de la couche d'air	
Re,cl	résistance à l'évaporation des vêtements	(m².kPa)/W
Rcl	Resistance thermique vestimentaire	m² K/ w
Rs	charge solaire	W/m²
S	taux de chaleur stocké, ou bilan thermique	W/m²
S_{sk}	taux de chaleur stockée à la peau	W/m²
Sc	taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps	W/m²

SET	Température effective standard	°C
S_{Wreq}	débit sudoral requis	
SWp	Prédit	
T	Température	°C
T_a	air ambiant	°C
Tcl	à la surface externe du vêtement	°C
T_c	interne (corps)	°C
T_{ch}	de refroidissement	°C
T_{ex}	Extérieur	°C
T_{exp}	air expirée	°C
T_{eq}	Equivalente	°C
T_g	globe noire	°C
T_r	moyenne de rayonnement	°C
T_{sk}	Cutanée	°C
$T_{sk,req}$	requise pour le confort	°C
T_o	Opérative	°C
t	Temps	s
Td	Conductivité tissulaire = 5.28	W/m².K
va	vitesse de l'air	m/s
var	vitesse de l'air résultant du climat et des mouvements à l'intérieur de ce climat	m/s
V_b	débit sanguin	
W	Energie utilisée par le travail externe	W/m²
Wreq	La mouillure cutanée requise	
wex	humidité spécifique (contenu en eau) de l'air expiré	kg eau / kg air sec
W	humidité spécifique de l'air ambiant	kg eau / kg air sec
A	fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau	
σ	constante de Stefan-Boltzmann = 5, 67 $.10^{-8}$	$W \cdot m^2 \cdot K^{-4}$
εsk	émissivité cutanée	
ω	Mouillure cutanée	
ω_0	mouillure à la neutralité thermique	
ε_{yc}	facteur de vasococonstriction	
ε_{SW}	facteur de mouillure	

Abréviations :

ASHRAE = American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

AFNOR = Association Française de Normalisation.

ISO = International Organization for Standardization.

PMV = Vote moyen prévisible (predict mean vote).

PPD = Pourcentage des personnes insatisfaites, % (Predicted Percentage Dissatisfied).

T_{SENS} = l'indice de sensation thermique

T_{SENS}^{-} = l'indice au froid.

T_{SENS}^{+} = l'indice au chaud.

SIG^{-}_{SK} e SIG^{-}_{Cr} = les signaux d'erreur quand les températures internes et de peau Sont inférieures à leurs consignes respectivement

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I Généralité du confort thermique

I.1.Introduction … 4
I.2.Notions sur le confort thermique 4
I.2.1.L'aspect physiologique 4
I.2.2.L'aspect Physiques 4
I.2.3.L'aspect psychologique 5
I.3.Echange thermique 6
I.3.1.Production de chaleur et échanges internes 6
I.3.1.1.Production de chaleur 6
I.3.1.2.Echanges internes de chaleur 7
I.3.1.2.1.conduction tissulaire 7
I.3.1.2.2.convection sanguine 7
I.3.2.Echanges de chaleur avec le milieu environnant 7
I.3.2.1.Les échanges de chaleur par respiration 8
I.3.2.2.Les échanges de chaleur par la conduction 9
I.3.2.3.Les échanges de chaleur par de convection 9
I.3.2.4.Les échanges de chaleur par Le rayonnement 10
I.3.2.5.Les échanges de chaleur latente : l'évaporation.....13
I.3.2.6.L'influence des vêtements 16
I.3.2.6.1.Resistance thermique vestimentaire 16
I.3.3.La thermorégulation 17
I.3.3.1.Thermorégulation végétative 17
I.3.4.La surface cutanée 19
I.4.Bilan et équilibre thermique 20
I.4.1.Bilan thermique 20
I.4.2.Equilibre thermique et neutralité 21
I.4.3.Neutralité thermique et confort thermique 22
I.4.4.Inconfort local 22

I.5.les paramètres du confort thermique 22
I.5.1.La température de l'air 22
I.5.2.L'humidité relative 22
I.5.3.La vitesse de l'air 22
I.5.4.La Température de rayonnement : 23
I.5.5.Température du sol 23
I.5.6.L'habillement 23
I.5.7.L'activité métabolique 23
I.6. Indices de confort 24
I.6.1. Indices physiques 24
I.6.1.1.Température moyenne de rayonnement (T_{mrt}) 24
I.6.1.2. La température résultante ou température opérative 24
I.6.1.3.La température équivalente teq 25
I.6.1.4.La température effective standard (SET*) 25
I.6.2.Les indices physiologiques 25
I.6.2.1.Les indices de danger 26
I.6.2.2.Les indices de confort 26
I.6.2.3.Les indices PMV et PPD 26
I.6.3.La zone de confort thermique 26
I.7.Conclusion : 28

Chapitre II Modélisation du confort thermique

II.1.Introduction 29
II.2.Les modèles simples 29
II.2.1.Le modèle à deux nœuds de Gagge : ET*, SET & PMV* 29
II.2.2.Le modèle de Fanger : PMV & PPD 30
II.2.3.Le modèle K.S.U 31
II.3.Les modèles complexes (dynamique) 33
II.4.Conclusion sur les modèles 34

Chapitre III Modélisation et étude paramétrique

III.1.Introduction 35
III.2.Description du modèle de Gagge 35
III.3.Les équations du modèle 38
III.4.Résultats et discutions 41
III.4.1.La Température interne du corps humain Tc 41
III.4.2.La température moyenne cutanée Tsk 42
III.4.3.Effet métabolique 43
III.4.4.Effet de l'isolement vestimentaire (clo) 44
III.4.5.La vitesse relative de l'air 45
III.4.6.Effet de la température ambiante 46
III.4.7.Effet de la température moyenne radiante 47
III.4.8.L'effet du degré hygrométrique de l'air 48
III.5.Conclusion 49

Conclusions générale 50

Liste des figures

Figure I.1 Les principaux transferts thermiques « passifs » entre l'Homme et son environnement. Les pourcentages (issus de [15]).....8

Figure I.2 niveaux de mouillure et intensité de l'astreinte thermique [19] 14

Figure I.3 principes de la thermorégulation végétative, comportementale et technologique [7] 19

Figure I.4 L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement [27].....21

Figure I.5 correspondances entre PMV et PPD 28

Figure II.1 Représentation du modèle physiologique à deux noeuds de Gagge[24] 30

Figure II.2 Schématisation du modèle thermique de Stolwijk [24].....32

Figure III.1 Schématisation du modèle de Gagge[24].....35

Figure III.2 la température interne d'un corps humain Tc en fonction de temps 41

Figure III.3 la température moyenne cutanée d'un corps humain Tsk en fonction de temps.....42

Figure III.4 Variation de PMV et PPD en fonction du M(Icl=0.7clo, ta=26.5°C, va=0.2m/s, w=0, HR=50%) 43

Figure III.5 Variation de PMV et PPD en fonction du Icl(M=1.2met, ta=22°C, va=0.2m/s, w=0, HR=50%) 44

Figure III.6 Variation de PMV et PPD en fonction du Va(M=1.2met, ta=22°C, Icl=0.7clo, w=0, HR=50%).....45

Figure III.7 Variation de PMV et PPD en fonction du ta(Icl=0.7clo, M=1.2met, va=0.2m/s, w=0, HR=50%) 46

Figure III.8 Variation de PMV et PPD en fonction du La température moyenne radiante (Icl=0.7clo, M=1.2met, w=0, ta=26.5°C, HR=50 %) 47

Figure III.9 Variation de PMV et PPD en fonction du HR(M=1.2met, ta=26.5°C, Icl=0.7clo, w=0, Va0.2m/s) 48

Liste des tableaux

Tableau I.1 valeur de l'activité métabolique « met » suivant Différents taches.....24

Tableau I.2 correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques 27

Tableau III.1 La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique [21].....37

Résumé

L'objectif de ce travail est d'effectuer un modèle mathématique pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments. Le modèle intègre les différents mécanismes de transfert de chaleur entre le corps humain et l'environnement externe, ainsi que les réactions physiologiques. La modélisation permettra par la suite d'étudier l'influence des différents paramètres thermiques et thermo-physiques sur le confort thermique.

Mots clés : Confort thermique, thermique du bâtiment, modélisation mathématique, étude paramétrique.

Abstract

The goal of this work is to perform a mathematical mode to evaluate thermal comfort in buildings. The model integrates the different mechanisms of heat transfer between the human body and the external environment, as well as physiological responses.The modeling will then allow to study the influence of the various thermal and thermo-physical parameters on the thermal comfort.

Keywords : Thermal comfort, thermal building, mathematical modeling, parametric study.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تنفيذ نموذج رياضي لتقييم الراحة الحرارية في المباني. يدمج النموذج الآليات المختلفة لنقل الحرارة بين جسم الإنسان و البيئة الخارجية، بالإضافة إلى الاستجابة الفسيولوجية.و ستسمح النمذجة بعد ذلك بدراسة تأثير مختلف المعايير الحرارية و الفيزيائية الحرارية على الراحة الحرارية.

كلمات مفتاحية : الراحة الحرارية ، البناء الحراري ، النمذجة الحرارية ، دراسة عوامل.

Introduction générale :

Dans la littérature, le confort thermique est défini de plusieurs façons différentes prenant en compte ou pas des différents éléments, le but étant selon De Dear d'offrir un climat intérieur sain assurant le bien être et n'affectant pas la productivité des utilisateurs [1].

Il est défini comme «un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions de conduite pour corriger l'environnement par le comportement.. » [2]. L'occupant ne préférant ni un environnement plus chaud ni plus froid et exprimant ainsi sa satisfaction vis-à-vis de son ambiance thermique [2]. On peut en déduire que le confort thermique est considéré comme un état d'équilibre entre le corps humain et son environnement ou les activités d'échanges thermiques entre les deux entités sont quasi nulles.

Givoni parle de mécanismes de thermorégulation qui sont à un niveau d'activités minimales [3]. Le confort thermique est souvent défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique [4]. L'homme étant homéotherme1, il doit assurer en continu son équilibre thermique. Pour cela, il dispose d'un système de thermorégulation qui lui permet de régler les échanges de chaleur avec son environnement, en exerçant des réactions conscientes (adaptation comportementale) et inconscientes (vasomotricité, frisson et sudation). Avec un bilan thermique global nul, le corps humain assurera son équilibre thermique. La neutralité thermique résulte d'un équilibre thermique obtenu par peu (ou aucune) de réactions physiologiques [5].

Toutefois, cette neutralité thermique ne correspond pas nécessairement au confort thermique. Au delà des facteurs physiques et physiologiques qui régissent la sensation thermique, d'autres facteurs d'ordre psychosociologiques influencent le confort thermique.

Chez l'Homme de nombreuses études physiologiques ou psychophysiques ont montré des relations entre l'intensité de la sensation et celle du stimulus. La sensation augmente en fonction "puissance" de l'intensité du stimulus, ou de l'écart entre le stimulus et un seuil. L'organisme possédant de multiples voies sensorielles (visuelles, auditives, olfactives, thermiques, nociceptives, pression,...), les réponses dépendent des capteurs mis en jeu, des voies sensitives et des centres nerveux supérieurs spécifiques. Pour les aspects thermiques, la sensation résulte souvent de l'activité concomitante des capteurs au froid et au chaud. Comme l'inconfort. Pour certaines

personnes, le confort se situera dans une zone de ni chaud – ni froid, pour d'autres dites "frileuses" dans une zone plutôt chaude et pour le reste, dans une zone un peu fraîche. Si la zone sensorielle de ni chaud - ni froid permet - pour la majeure partie des gens - de garantir l'absence d'inconfort thermique marqué, elle ne peut prétendre garantir le confort. Le confort thermique est un état de bien-être général et stable. Il est mesuré à contrario par le taux d'insatisfaction des occupants. Il est subjectif et se diffère d'une personne à une autre selon le métabolisme, le sexe, l'âge, l'habillement, l'activité produite …, ainsi que la zone climatique.

Les éléments déterminants de l'effet complexe du climat d'un local sont, la température de l'air du local et des surfaces environnantes, l'humidité et les mouvements de l'air Une des plus importantes conditions pour le bienêtre et la productivité est d'assurer le confort thermique. Les différents mécanismes mis en jeu sont détaillés et précisés afin de cerner le rôle des différents paramètres et caractéristiques physiques, physiologiques et psychologiques dans la perception thermique par l'homme de son environnement.

L'organisation internationale de normalisation, l'ISO, propose des normes concernant l'ergonomie des ambiances thermiques. Elle spécifie les méthodes de mesurage et d'évaluation des ambiances thermiques. L'utilisation des normes vaut tant pour l'appréciation et l'amélioration de conditions thermiques existantes que pour la conception de nouvelles conditions. Parmi les normes thermiques, il y a celles relatives aux ambiances chaudes, modérées ou froides, celles qui traitent le contact humain avec les surfaces solides, et celles qui sont normes de support. Les normes de confort thermique déterminent la consommation d'énergie par les systèmes environnementaux d'un bâtiment.

L'objectif de ce travail est de développer un modèle de mathématique pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments à partir du modèle de Gagge et permettra par la suite d'étudier l'influence des différents paramètres thermique et thermo-physiques sur le confort thermique. Ce travail se compose de trois chapitres organisés de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous donnerons des notions de base sur le confort thermique.

Le deuxième chapitre nous parlons sur la modélisation du confort thermique et les types des modèles du confort thermique.

Le troisième chapitre un modèle de simulation est développer sur la base du célèbre modèle du Gagge et les résultats ainsi obtenus sont discutées et commentées. Ce travail est clôturé par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I
Généralité sur le Confort Thermique

I.1.Introduction :

Différentes définitions sont données pour le confort thermique selon que l'être humain est considéré comme un objet physique, une machine thermique autorégulée, ou une personne active affectée par ses sensations.

I.2.Notions sur le confort thermique :

Le comportement du corps humain est en perpétuel dialogue avec un environnement thermique donné afin de garantir l'équilibre thermique et donc une température corporelle idéale de fonctionnement qui avoisine les 37°C et offrant ainsi le confort thermique recherché. Cela se traduit par un comportement et des réactions conscientes ou inconscientes faisant intervenir l'aspect physiologique, physique et psychologique.

I.2.1.L'aspect physiologique :

S'ajoutant au facteur décrit précédemment, le facteur physiologique est le second facteur garantissant la neutralité thermique du corps humain. Cela est représenté par la thermorégulation que peut effectuer le corps afin de garantir une température idéale, et qui dépend non seulement de la variation interne de température due à l'activité métabolique (efforts physiques...etc.) mais aussi aux variations externes de température, vitesse de l'air, humidité...etc.

La thermorégulation est décrite selon Parsons (2003) comme étant un système dynamique qui a pour but de maintenir la température du corps à sa valeur de consigne, en maitrisant les échanges de chaleur interne et externe. Elle se décompose en deux catégories, la thermorégulation végétative et la thermorégulation comportementale qui peut être consciente ou inconsciente [6].

I.2.2.L'aspect Physiques :

Ce facteur englobe les échanges thermiques entre le corps humain et son environnement afin de maintenir une température corporelle de 37°C et d'assurer le bon fonctionnement des organes vitaux internes, appelés aussi l'homéostasie.

L'être humain est considéré donc comme étant une machine thermodynamique ou la surface cutanée de la peau représente l'enveloppe et permet les échanges avec l'extérieur, à savoir l'environnement immédiat via différents modes d'échanges (convection, rayonnement,

évaporation, respiration ou autres), les déperditions seront égales à la création de chaleur du à l'activité métabolique [7].

Si par exemple la température du corps augmente par rapport à sa température de consigne, le flux d'échange de chaleur entre ce dernier et l'extérieur augmente aussi dissipant ainsi la surchauffe du corps.

ASHRAE, cité par [7], exprime le bilan thermique comme suite :

$$M - W = Qsk + Qres + S \qquad (I.1)$$

Avec

M = Taux métabolique, W/m².

W = Travail externe, W/m².

Qres = Flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m².

Qsk = Flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m².

S = Taux de chaleur stockée dans le corps, W/m².

I.2.3.L'aspect psychologique :

Au delà des aspects thermiques et physiologiques mentionnés, il existe des facteurs d'ordre psychologique qui influent sur la perception du confort et qui diffèrent d'un sujet à un autre, basés sur une évaluation des paramètres socioculturels telle que l'expérience thermique personnelle ou encore le vécu, plutôt que sur des critères objectifs et absolus, appelés aussi « relativité perceptive » [8]. Une personne exposée à un environnement extérieur chaud et qui est amenée vers un local plus frais par exemple, peut exprimer une satisfaction et un confort envers son environnement alors que son équilibre thermique n'est pas encore atteint.

De Dear parlant quand à eux de satisfaction perçue qui est une interaction entre deux types de satisfactions, la première « anticipée » qui représente l'attente que peut avoir la personne vis à vis de son environnement et la deuxième « obtenue » qui est la condition thermique réelle du local.

I.3.Echange thermique :

I.3.1.Production de chaleur et échanges internes :

I.3.1.1.Production de chaleur :

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

$C_6H_{12}O_6 + 8O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O$

Plus l'activation de l'individu est grande, plus les réaction sont importantes ; la consommation d'oxygène et les rejets en gaz carbonique augmentent proportionnellement, l'énergie totale fournie par le corps ou métabolisme totale est mesuré expérimentalement grâce au volume d'oxygène (VO_2) consommé [9].Il est donné en watt par m^2 de surface corporelle.

$$M=352(0{,}23\ Q + 0\ {,}77)\frac{vo2}{ADU} \qquad (I.2)$$

Avec

M = métabolisme totale (w/m^2);l'unité souvent utilisée est met : 1met=$58w/m^2$

Vo2 = volume d'oxygène consommé ;

Q = quotient respiratoire.

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

$$A_{Du}=0.203P^{0.425}H^{0.725} \qquad (I.3)$$

P=poids en kg ; H=taille en m ;

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

$M=M_b+M_a+DM$

M_b métabolisme basal

Homme : $M_b=\frac{0.048}{ADu}$ (66.47+13.75P+500H-6 ,75A) (I.4)

Femme $M_b=\frac{0.048}{ADu}$ (155,05+9.56P+184,97H-4.67A) (I.5)

A=âge (ans).

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

- métabolisme d'activité M_a, est du a l'augmentation de production de chaleur qui accompagne nécessairement toute activité physique.

D'autres variations de métabolisme, DM, peuvent intervenir; elles sont liées a :

-la physiologie : sommeil, éveil, alimentation,

-la pathologie : dérèglements hormonaux, carences alimentaires,

-la régulation : apparitions de frissons.

I.3.1.2.Echanges internes de chaleur :

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

I.3.1.2.1.conduction tissulaire :

La chaleur est transmise par conduction à travers les couches musculaires, graisseuses et cutanées. Il s'agit d'un phénomène passif, non contrôlé qui est lié aux écarts de température entre les différentes couches. Le coefficient moyen de conduction est d'environ 5,8w/m^2c .Ce mode de transfert est de faible importance par rapport a la convection sanguine [6].

I.3.1.2.2.convection sanguine :

La chaleur est également transmise entre le différentes parties du corps par convection forcée due a la circulation sanguine. Le sang agit comme un échangeur contre-courant. Le débit sanguin augmente dans les couches musculaires en fonction de l'activité physique du sujet ; au niveau de la peau il est contrôle par le système de régulation [6].

I.3.2.Echanges de chaleur avec le milieu environnant :

Les échanges de chaleur entre l'organisme et le milieu environnant s'effectuent principalement à partir de l'enveloppe cutanée par l'intermédiaire de la conduction, de la convection, du rayonnement et de l'évaporation (cf. Figure I.1) [10 - 15].

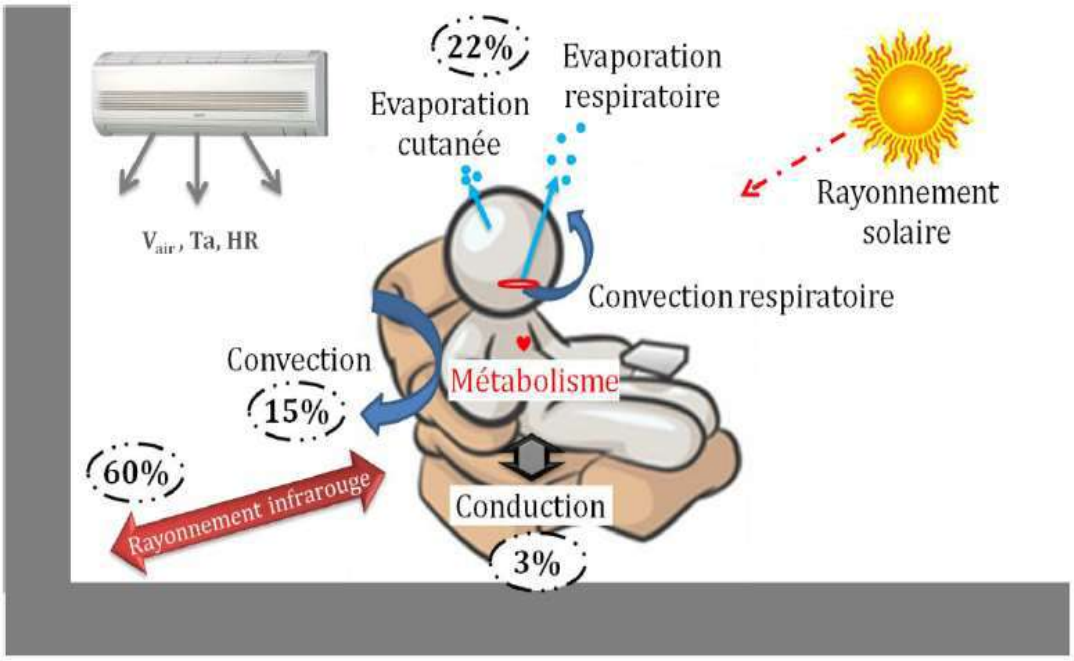


Figure I.1 Les principaux transferts thermiques « passifs » entre l'Homme et son environnement [15].

I.3.2.1.Les échanges de chaleur par respiration :

Pendant la respiration, le corps échange de la chaleur sensible et latente, par convection et évaporation, avec l'air inhalé. A la sortie des poumons, l'air expiré est à une température proche de la température interne du corps, et il est presque saturé. La respiration s'accompagne ainsi d'un transfert de chaleur et de masse. Ces échanges dépendent des différences de température et d'humidité entre l'air expiré et l'air ambiant, et du débit ventilatoire. L'ASHRAE donne l'équation suivante pour calculer les échanges respiratoires [16].

$$Qres = Cres + Eres \quad (I.6)$$

$$Cres=0,0014.M\ (texp - ta) \quad (I.7)$$

$$Eres = 0,\ 0173.M\ (Pexp - Pa) \quad (I.8)$$

Cres + Eres = 0,0014.M (texp – ta) + 0,0173.M (Pexp – Pa) (I.9)

Avec

Cres = flux de chaleur par convection respiratoire, W/m²

Eres = flux de chaleur par évaporation respiratoire, W/m²

I.3.2.2.Les échanges de chaleur par la conduction :

Dans le cas où l'individu se trouve en contact direct avec un solide (généralement : le mobilier), le corps humain échange la chaleur avec celui-ci par un mode de transfert qui est la conduction. C'est un phénomène que l % on retrouve généralement lorsque la personne exerce une tache de bureau où son corps se trouve fréquemment en contact avec le mobilier. Ce type d'échange dépend de la nature des solides (les propriétés physiques du solide, telle que la conductivité thermique) et leur épaisseur. Mais dans la majorité des cas on peut le négligé, car il représente 1% de l'ensemble des échanges. En fait, l'impact de la conduction sur le confort thermique est très faible, même si le contact d'un carrelage frais peut apporter une sensation agréable en été, ou à l'inverse, le sable d'une plage ayant une sensation de brûlure.

$K=K_f A_{CO} (T_{SK}-T_f)$ (I.10)

Avec

A_{CO} = surface corporelle en contact

K_f = coefficient de contact W/m^2c

T_f = température du fauteuil

T_{Sk} = température de la peau

I.3.2.3.Les échanges de chaleur par de convection :

C'est l'échange de chaleur entre l'organisme et le flué l'entoure (généralement gazeux). Qui représente plus de 35 % des pertes de chaleur. Elle dépend de la vitesse du fluide et la tenue vestimentaire.

-Selon la vitesse de l'air, il existe deux types de convection, la convection naturelle ou libre quand la vitesse de l'air est inferieure à 0,2 m/s et la convection forcée pour des vitesses supérieures à 0,2 m/s (c'est le cas des ventilateurs).

Lorsque la vitesse de l'air est élevée les échanges convectifs influent d'une façon importante sur le bilan thermique de l'individu.

Les échanges par convection sont régis par l'équation :

$C = hc\ fcl\ (Tcl - Ta)$ (I.11)

Avec

C = flux de chaleur convectif, W/m²

hc = coefficient de convection thermique (en W/m². K)

fcl = facteur d'habillement

Ta = température d'air, °C

Tcl = température de la surface externe du vêtement, °C

Le coefficient de convection hc calculé par :

$hc = 2{,}38(T_{SK} - Ta)\ 0{,}25$ pour Va < 0,2 m/s (convection naturelle)

$hc = 3{,}5 + 5{,}2V_{ar}$ pour Va ≤ 1m/s

$hc = 8{,}7\ V_{ar}\ 0{,}6$ pour Va ≥ 1m/s

Avec

Va = vitesse de l'air ambiant

V_{ar} = vitesse relative de l'air, c'est-à-dire la résultante de la vitesse de l'air Va par Rapport à un objet immobile et de la vitesse du corps par rapport au sol Var peut être estimé par :

$V_{ar} = Va + 0{,}0052\ (M - 58)$ (I.12)

Avec

M = activités métabolique (en W/m2), telle que décrite précédemment avec une condition supplémentaire de sorte que, si M>200

I.3.2.4.Les échanges de chaleur par Le rayonnement :

Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan .Selon Givoni, il existe d'autre élément intervenant sur l'échange thermique entre l'operateur et l'ambiance, qui est la texture des vêtements, il a dit : « Le régime de ces relations sera aussi affecté par d'autres facteurs tels que les propriétés des matériaux qui constituent les vêtements et la forme de ces vêtements, qui peuvent varier dans une très grande mesure » [3].

Donné selon l'équation :

$R = hr.\ fcl\ (Tcl - Tr)$ (I.13)

Avec

$hr = \sigma \varepsilon sk\ Ar\ /ADU\ \frac{T^4sk - T^4r}{Tsk - Tr}$ (I.14)

Ou

$hr = 4\ \sigma \varepsilon sk\ \ Ar/AD\ [273+\frac{Tsk+Tr}{2}]^3$ (I.15)

Avec

R = flux de chaleur radiatif, W/m²

hr = coefficient d'échange radiatif W/m². K

Tr = température moyenne radiante, °C

Tcl = température de la surface externe du vêtement, °C

Ar = surface cutanée qui rayonne, m²

Fcl = facteur d'habillement

σ = constante universelle de rayonnement de Stefan-Boltzmann 5,67x 10^{-8} W/m².K^4

εsk = émissivité cutanée de 0,97

Ar/AD = rapport entre la surface cutanée qui rayonne et la surface corporelle totale, joue le rôle d'un coefficient de forme qui vaut

- 0,67 pour le sujet accroupi

- 0,70 pour le sujet assis

- 0,77 pour le sujet debout

La température cutanée moyenne se calcul théoriquement comme suit :

Tsk = 30+0.093Ta+ 0.045Tr -0.571Va+ 0.0254PaH2O +0.00128M - 3.575 Icl (I.16)

Avec

PaH2O = pression partielle de vapeur d'eau ambiant, kPa

Icl = isolement thermique du vêtement, k. m² /W

T_r = La température moyenne de rayonnement

$\bar{T}_r = [(Tg)^4 + 2.5.10^8 Va^0.6\ (Tg-Ta)]^{\frac{1}{4}}$ (I.17)

Avec

Tg = globe noir

Une formule simplifiée a été proposée pour une approximation de la température moyenne de rayonnement à partir des températures d'air Ta et de globe noir Tg ainsi que de la vitesse de l'air Va :

$\bar{T}_r$ =Tg+1.8 $\sqrt{Va}$(Tg-Ta) (I.18)

Dans la plupart des cas, les environnements thermiques dans les bâtiments peuvent être considérés homogènes dans les zones occupées. Mais si l'environnement radiatif est fortement hétérogène (large baie vitrée, panneaux rayonnants), la température moyenne de rayonnement est insuffisante, il faut prendre en compte l'asymétrie de rayonnement.

Les équations du flux convectif et du flux radiatif sont souvent combinées en vue d'exprimer l'échange total de chaleur sensible, par convection et rayonnement, en termes de la température opérative To et le coefficient d'échange de chaleur Sensible h

$(C + R) = f_{cl}.h. (T_{cl}-T_o)$ (I.19)

h = hr+ hc

$T_o = \frac{hr\,Tr+hc\,Ta}{hr+hc}$ (I.20)

Sur d'autres cas ou les occupants engagés dans des activités physique sédentaires entre 1 et 1,3 me, non exposé au soleil et non exposés à des vitesses d'air supérieures à 0,20m/s, la relation peut être approchée par précision acceptable par :

$T_o = \frac{Tr+Ta}{2}$ (I.21)

Avec

(C+R) = échange de chaleur sensible cutanée, W/m²

T_o = température opérative, °C

h = coefficient d'échange de chaleur sensible W/m²K

En considérant le vêtement comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau à température Tsk et la surface du tissu à température Tcl, les transferts de chaleur sensible peuvent être écrits de la façon suivante.

$(C+R)=\frac{Tsk-Tcl}{Rcl}$ (I.22)

Avec

R_{cl} = Resistance thermique vestimentaire m² K/ w

T_{cl} = température de la surface externe du vêtement, °C

En combinat les deux équations précédentes en éliminant Tcl on obtient :

$$(C+R)=\frac{Tsk-T0}{Rcl+{}^{1}/_{Fcl\ h}} \quad \text{(I.23)}$$

I.3.2.5.Les échanges de chaleur latente : l'évaporation

L'évaporation est le mode d'échange de chaleur dû au changement d'état de l'eau. Elle est le moyen essentiel pour évacuer la chaleur dans les ambiances chaudes par évaporation de la sueur à la surface cutanée. Le système de thermorégulation détermine le débit de sueur nécessaire pour conserver l'équilibre thermique du corps. Le phénomène moteur de l'évaporation sur une surface humide est le gradient de pression de vapeur entre la surface cutanée, l'air environnant et la mouillure cutanée.

$$Esk=\frac{\omega(Psk,s-Pa)}{Re,cl+{}^{1}/_{(fcl\ he)}} \quad \text{(I.24)}$$

Avec

Esk = échange de chaleur évaporatoire cutanée, W/m²

Pa = pression de vapeur d'air, kPa

Psk,s = pression de vapeur à la surface de la peau, kPa (considérée saturée)

Re,cl = résistance vestimentaire à l'évaporation, m².kPa/W (similaire à Rcl)

he = coefficient d'échange de chaleur par évaporation W/m².kPa (similaire à h)

ω = mouillure cutanée

Le coefficient d'évaporation he peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif hc moyennant la relation de Lewis (he / hc = LR, où LR est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,5 °C/kPa pour des conditions intérieures typiques) [16].

La mouillure cutanée est le rapport entre l'évaporation actuelle Esk et l'évaporation maximale possible Emax. Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour ω=1 la peau est complètement mouillée) [4]. La mouillure cutanée dépend de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. D'ailleurs elle n'est jamais nulle, il y a toujours une diffusion de l'eau à travers les cellules cutanées.

Il s'agit de perspiration insensible, elle vaut 6% de l'évaporation maximale.

Le coefficient d'évaporation he peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif hc moyennant la relation de Lewis (he/hc = LR, où LR est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,7 K/kPa pour des conditions intérieures typiques) [17].

Où:

$$He = K\ hc \qquad (I.25)$$

Avec

K = 16,7 K. kPa-1

La mouillure cutanée est le rapport entre la surface mouillée de la peau Ae et la surface totale AD ω = Ae / AD. Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour ω =1 la peau est complètement mouillée) [18]. La mouillure cutanée dépend de la production de sueur qui est déterminée par le système de thermorégulation. Le concept de mouillure est intéressant car il est représentatif de l'astreinte chaude. À 6% de mouillure, on peut montrer que l'évaporation cutanée correspond à la perspiration insensible, perte minimale associée au confort du quotidien. À 100 % de mouillure, on comprend bien que la contrainte est maximale.

Des expériences de laboratoire tendent à montrer que, dès que la mouillure atteint des valeurs de 30%, l'inconfort grandit pour être atteint définitivement à 50 % quand une partie de la sueur commence à ruisseler. Bien sûr, le ruissellement se produit d'abord sur la région où l'évaporation est la moins favorisée : il s'agit souvent du tronc qui possède le moins bon coefficient d'évaporation et bénéficie bien souvent du plus grand isolement thermique local (figure I.2).

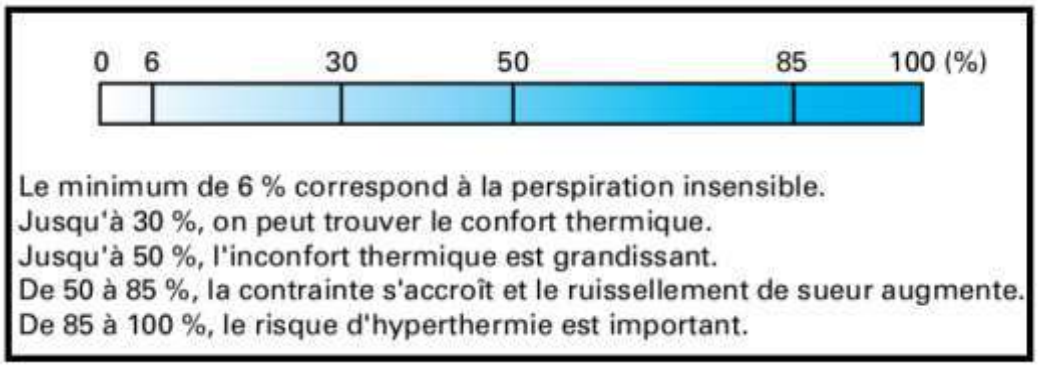


Figure I.2 niveaux de mouillure et intensité de l'astreinte thermique [19]

La perte par évaporation (E) est alors réduite au prorata de la mouillure :

$$Esk = \omega\ Emax \qquad (I.26)$$

Le débit évaporatoire maximal Emax, qui est le débit que l'homme peut réaliser dans l'hypothèse une peau intégralement mouillée. Dans ces conditions :

$$Emax = he\ Fpcl\ (Psk, s - Pa) \qquad (I.27)$$

Avec

Fpcl = facteur de réduction des échanges de chaleur latente par les vêtements.

Le débit évaporatoire requis Ereq correspond au débit évaporatoire que l'homme doit réaliser pour assurer l'homéothermie, il peut être déduit de la relation suivante :

$$Ereq = M - W - Cres - Eres - C - R - S \qquad (I.28)$$

Toutefois, cet équilibre ne pourra être atteint que si Ereq reste inférieur à Emax possible dans l'ambiance considérée. Le rapport entre Ereq et Emax définit la mouillure cutanée requise (ω req) pour assurer l'équilibre thermique. Plus Ereq est proche de Emax et plus l'organisme doit sécréter de sueur de façon à mouiller une plus grande surface cutanée.

Cette augmentation de la mouillure s'accompagne d'un phénomène inévitable : une fraction de la sueur n'est pas évaporée, mais ruisselle sur le corps sans aucun bénéfice thermique pour l'organisme. Le rapport entre la fraction évaporée de la sueur (E) et la sueur sécrétée (Sw), c'est-à-dire le rendement évaporatoire (r) de la sudation diminue donc. La sudation requise (Swreq) pour que l'évaporation requise soit réalisée est donnée par :

$$Swreq = Ereq / r \qquad (I.29)$$

$$r = 1 - 0{,}5.\exp\left[-6,6\ (1 - \omega.\ req)\right] \qquad (I.30)$$

I.3.2.6.L'influence des vêtements :

Comme évoqué lors de la description de certains transferts thermiques, les vêtements sont susceptibles de modifier les échanges thermiques puisqu'ils constituent une résistance aux échanges de chaleur et de vapeur d'eau qui s'effectuent entre la peau et l'environnement. Les flux convectifs, radiatifs et d'évaporation cutanée sont réduits [20]. Les facteurs de réduction de ces flux dépendent du comportement thermique des vêtements qui est lui-même fonction de la résistance thermique et de la capacité évaporatoire du vêtement mais également des mouvements du corps, de la pénétration de l'air dans les tissus ou de l'adsorption d'eau, *etc.* [21]. Mais dans un souci de simplification, il est souvent supposé que les transferts de chaleur entre la peau et les tissus se font uniquement par conduction. L'isolement thermique intrinsèque de la tenue vestimentaire est alors représenté par un indice « Iclo» en m^2 °C W^{-1} qui est souvent exprimé avec l'unité Clo. Cette unité correspond à l'isolement nécessaire au maintien de la « balance thermique » d'un homme sédentaire assis dans une ambiance à 21°C (Tpeau = 33,3°C, HR=50%, vair < 0,51 m s^{-1}) : 1 Clo = 0,155 m^2 °C W^{-1}.

I.3.2.6.1.Resistance thermique vestimentaire :

Le vêtement, qui s'entrepose entre la peau et l'ambiance, constitue une résistance aux transferts de chaleur et de vapeur d'eau. De ce fait les flux C, R, Emax sont réduits. Les facteurs de réductions sont fonction, d'une part, des coefficients de convection thermique hc et de rayonnement thermique hr et, d'autre part, de l'isolement thermique effectif du vêtement Icle :

$$F_{cl} = 1 / [1 + (hc + hr)\, I_{cle}] \quad (I.31)$$

$$F_{pcl} = 1 / [1 + 0{,}92\ hc\ I_{cle}] \quad (I.32)$$

$$I_{cle} = I_{cl} - [(1 - 1/f_{cl}) / (hc + hr)] \quad (I.33)$$

Ou encore :

$$F_{cl} = 1 / [1 + 0{,}155(hc + hr)\, I_{cl}] \quad (I.34)$$

$$F_{pcl} = 1 / [1 + 0{,}155hc\, \frac{Icl}{im}\,] \quad (I.35)$$

Avec

F_{cl} = facteur de modulation des effets convectifs et radiatifs (sans dimension)

F_{pcl} = facteur réducteur des capacités évaporatoires

i_m = indice de perméabilité du vêtement (sans dimension)

F_{cl} = facteur de surface du vêtement (rapport entre la surface de l'homme vêtu et la surface de l'homme nu (A_{cl} /AD)). Le facteur f_{cl} est en première approximation fonction d'I_{cl} :

$$f_{cl} = 1 + 1{,}290\ I_{cl} \quad \text{si} \quad I_{cl} \leq 0{,}078\ m^2.K/W$$

$$f_{cl} = 1 + 0{,}645\ I_{cl} \quad \text{si} \quad I_{cl} > 0{,}078\ m^2.K/W$$

I.3.3.La thermorégulation :

L'homme est homéotherme, quelles que soient les conditions climatiques, sa température interne doit toujours approcher les 37,7 °C (± 0,5 °C) pour protéger ses organes et maintenir la vie [26].

La première barrière de défense est la peau, l'épiderme, dont la température est en moyenne de 34°C. Elle permet les échanges avec l'environnement thermique direct grâce à la thermorégulation. Elle admet des variations importantes de température et permet ainsi de maintenir le centre du corps à une température constante. La thermorégulation est l'ensemble des mécanismes conscients et inconscients permettant de réguler la température du corps humain. Les mécanismes inconscients sont ceux soumis aux lois de la thermodynamique et de la biologie. C'est la thermorégulation physiologique. Elle s'oppose à la thermorégulation comportementale qui correspond aux mécanismes conscients : l'être humain interagit avec son environnement et modifie son comportement pour minimiser l'entrée en action des phénomènes physiologiques.

I.3.3.1.Thermorégulation végétative :

Le corps humain est sujet aux échanges de chaleur avec son environnement. Lorsqu'un déséquilibre apparaît, une régulation inconsciente est instaurée : la thermorégulation végétative.

La température interne est affectée par le métabolisme, la vie cellulaire, qui produit de la chaleur qui doit être évacuée. La température cutanée peut varier de 10 °C en fonction de l'environnement (climat, vêtement…). Face à ces écarts de température, des transferts de chaleur ont lieu à l'intérieur du corps pour rétablir l'équilibre thermique.

La thermorégulation végétative permet les échanges de chaleur entre les différents milieux. Pour réguler la température interne du corps, ce dernier dispose de millions de capteurs, les thermorécepteurs, des terminaisons nerveuses libres, situés à la surface de la peau et au centre du corps Sensibles à la température [1].Ils envoient des signaux dans le centre hypothalamique, au niveau du cerveau, via la moelle épinière. L'information est alors comparée avec une valeur de référence et intégrée au système. En fonction des écarts constatés, différentes actions vont être mises en place afin de maintenir la stabilité thermique. À l'intérieur du corps, les échanges de chaleur se font par convection grâce à la circulation sanguine et par conduction entre les cellules.

- Si la température est trop élevée : il faut rafraîchir le corps.

Pour cela, l'hypothalamus ordonne aux vaisseaux d'augmenter leur diamètre, c'est la vasodilatation. Le débit sanguin est augmenté ainsi que les échanges de chaleur entre le centre du corps et la périphérie. De plus, il peut ordonner aux glandes sudorales de produire de la transpiration. Sous forme d'eau, elle va permettre un rafraîchissement du corps grâce à son évaporation [27].

- Si la température est trop faible : il faut réchauffer le corps.

Pour augmenter la production de chaleur, le centre hypothalamique ordonne, à l'inverse, la vasoconstriction des vaisseaux (diminution de leur diamètre) afin de diminuer le flux sanguin et les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie. Il peut également ordonner des contractions musculaires, les frissons, qui vont augmenter la production de chaleur par les muscles [27].

Les principaux facteurs influençant la régulation sont :

-le sexe : le cycle hormonal chez la femme semble être un facteur important ;

-la morphologie : à la base du rapport entre production de chaleur et surface d'échange ;

-l'âge : il produit des variations de métabolisme et de morphologie ;

-l'acclimatement : c'est l'ajustement des réactions qu'un individu met en jeu lorsqu'il est exposé régulièrement a des conditions extrêmes.

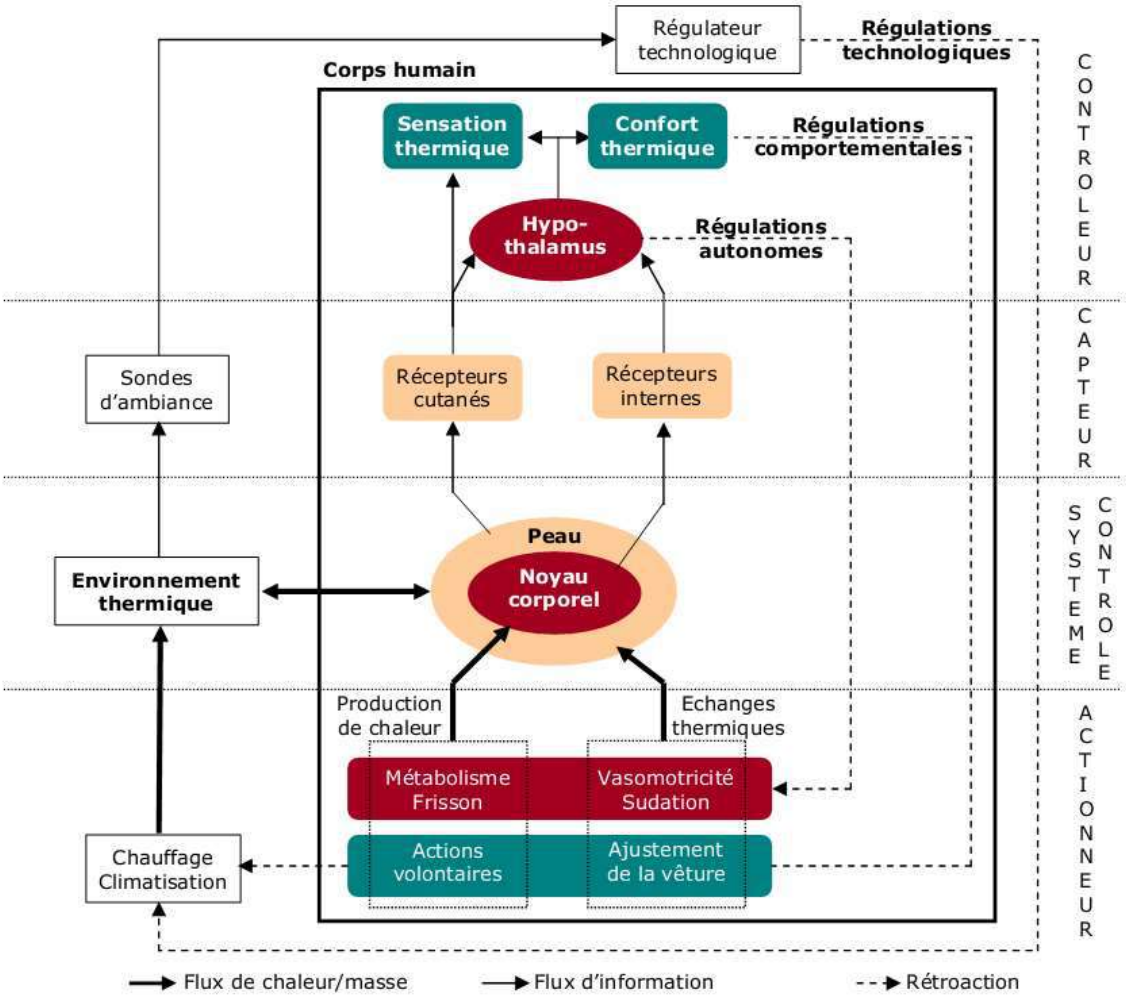


Figure I.3 principes de la thermorégulation végétative, comportementale et technologique [7]

I.3.4.La surface cutanée :

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

Les températures cutanées peuvent varier une gamme beaucoup plus étendue que la température centrale. La température cutanée moyenne au repos varie entre 33°C et 34°C. Les seuils de douleur inférieure et supérieure se trouvent respectivement à 17 °C et 43°C.

La mesure des températures cutanées se fait par détecteurs de contact (thermocouples, thermistances) ou a distance (détecteurs infrarouge).

I.4.Bilan et équilibre thermique :

I.4.1.Bilan thermique :

Les échanges thermiques de l'Homme dans son environnement dépendent donc des facteurs environnementaux et des facteurs humains. L'ensemble de ces influences s'appelle le bilan thermique dont il est possible de faire une estimation a priori. C'est grâce au calcul du bilan thermique qu'il sera possible de prédire si les conditions sont propices ou non à l'établissement du confort.

Le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante [16].

$$M - W = Qsk + Qres + S \quad \text{(I.36)}$$

$$M - W = (C + R + K + Esk) + (Cres + Eres) + Ssk + Sc \quad \text{(I.37)}$$

Avec

M = taux du métabolisme, W/m²

W = travail externe, W/m²

Qres = flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m²

Qsk = flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m²

Cres = flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m²

Eres = flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m²

C = flux de chaleur sensible échangé par convection à la surface du peau, W/m²

R = flux de chaleur sensible échangé par rayonnement à la surface du peau, W/m²

K = flux de chaleur sensible échangé par conduction à la surface du peau, W/m²

Esk = flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface du peau, W/m²

Scr = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m²

Ssk = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m²

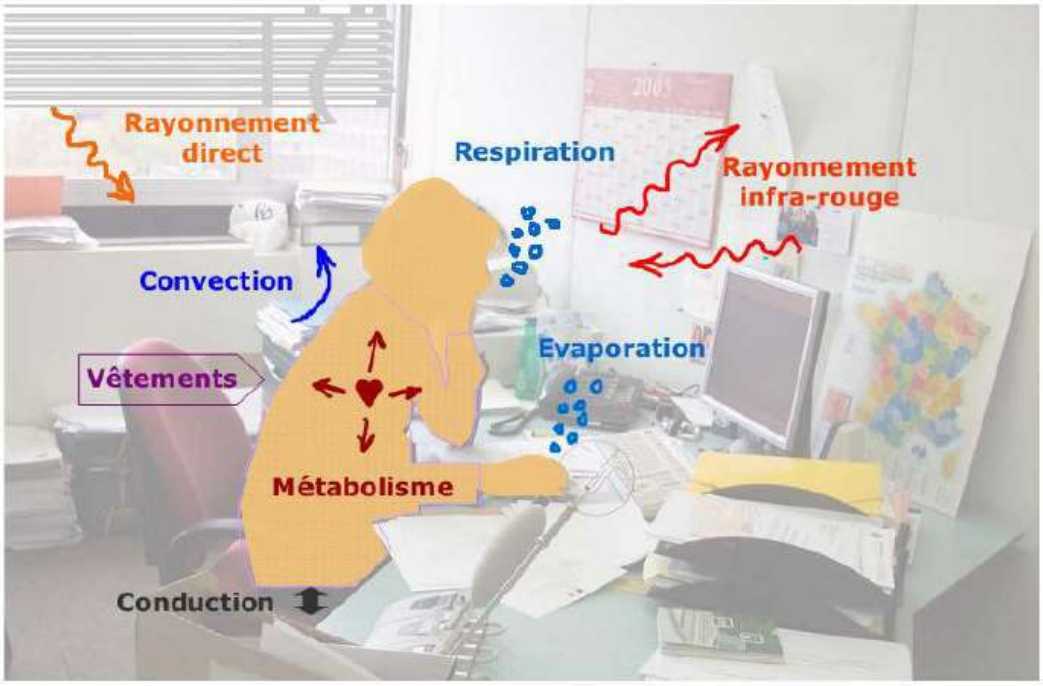


Figure I.4 L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement [27]

Un bilan nul correspond à l'équilibre thermique de l'organisme humain impliquant une stabilité des températures corporelles. Néanmoins, l'équilibre thermique peut être réalisé sous une infinité de conditions métaboliques et thermo hygrométriques qui ne sont pas toutes synonymes de confort.

La chaleur stockée dans le corps peut être déterminé à partir du taux d'augmentation de l'énergie interne. Elle est exprimée en fonction de la capacité thermique et le taux de changement de la température dans le temps [27].

I.4.2.Equilibre thermique et neutralité :

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

I.4.3.Neutralité thermique et confort thermique :

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

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

I.4.4.Inconfort local :

Inconfort local est défini comme ̏un refroidissement ou un échauffement local d'une partie du corps et qui est ressenti désagréable″.

De nombreuses études ont été faites sur les problèmes d'inconforts locaux [28 - 31].

Les principales causes sont :

-asymétrie de rayonnement,

-courant d'air,

-plancher trop chaut,

-différence verticale de température d'air.

I.5.les paramètres du confort thermique :

I.5.1.La température de l'air :

Appelée aussi la température ambiante (T*a*), elle caractérise l'environnement en contact immédiat avec l'individu, facilement mesurable «en degrés Celsius ou fahrenheit».

I.5.2.L'humidité relative :

Représente le rapport entre la quantité d'eau présente dans l'air ambiant et la quantité maximale que peut contenir cet air à la même température, elle influence notamment les échanges évaporatoires entre le corps et l'environnement [32], Elle est exprimée en % et il est recommandé de la maintenir entre 40% < HR< 60%.

I.5.3.La vitesse de l'air :

Exprimée en m/s, elle joue un rôle très important dans la sensation d'inconfort et peut être la cause d'inconfort local lié aux courants d'air si elle dépasse 0.2m/s car cela augmentera les pertes de chaleur par convection et évaporation [33]. Néanmoins dans les bâtiments la vitesse de l'air dépasse rarement cette valeur.

I.5.4.La Température de rayonnement :

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

Or, cette valeur moyenne ne peut pas suffire a caractériser une ambiance [34 - 36], car il peut avoir la même T_{mrt} avec des parois a des températures très différentes. C'est pourquoi il faut définir l'asymétrie de température radiante (DT_{mrt}), qui est la différence entre les températures moyennes de rayonnement, vue par deux éléments plats regardant dans des directions opposées [37].

I.5.5.Température du sol :

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

I.5.6.L'habillement :

Représente les vêtements portés par une personne et qui peuvent créer une résistance thermique modifiant ainsi les échanges de chaleur entre le corps (la peau) et l'environnement. Son rôle principal est de préserver la chaleur du corps et maintenir des conditions acceptables en particulier en hiver, il est exprimé en clo et varie de 0 ou la personne est considérée comme nue à 3 ou même 4 pour un vêtement lourd approprié aux régions. 1clo = 0.155m².K / W.

I.5.7.L'activité métabolique :

L'activité métabolique est définie comme la production de chaleur interne du corps par heure et par m² de surface au repos ou bien du à une activité,

Elle se réfère à toutes les réactions chimiques produites dans l'organisme mais aussi à cause de l'activité de la personne. Elle est exprimée en met qui correspond à 58.2 W/m²,

Le Tableau I.1 ci dessous reprend quelques valeurs en fonction de l'activité réalisée.

Activité / Tache	Valeur « met. »
Etendu couché	0.8
Lecture / Ecriture / Assis	1
Debout	1.2
Assis avec activité de bureau	1.3

Tableau I.1 valeur de l'activité métabolique « met » suivant Différents taches

I.6.Indices de confort:

I.6.1.Indices physiques :

Les indices physiques ou indices de contrainte thermique sont basés sur le fait qu'il est difficile pour un individu de faire la différence entre les divers modes d'échanges de chaleur et que le seul paramètre influençant l'impression de confort est le flux total échangé par le corps. Aune même valeur d'indice correspond une même quantité de chaleur échangée.

I.6.1.1.Température moyenne de rayonnement (T_{mrt}) :

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

$$R=hr(T_{sk}-T_{mrt}) \qquad (I.38)$$

I.6.1.2. La température résultante ou température opérative :

La température opérative est un indice de confort intégrant l'effet de la convection et du rayonnement (ta et tr). Elle est en fait définie comme la température d'une enceinte isotherme dans laquelle un occupant échange la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'enceinte dans laquelle il se trouve réellement [5].

$$C+R=hc\,(T_{sk}-Ta)+hr\,(T_{sk}-T_{mrt}) = h_{tot}\,(T_{sk}-T_{op}) \qquad (I.39)$$

$$T_{op}=\frac{hc\,Ta+hr\,Tmrt}{htot} \qquad (I.40)$$

I.6.1.3.La température équivalente teq :

La température équivalente est définie comme étant la température d'une enceinte Isotherme ayant une vitesse d'air nulle, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur sensible, par convection et rayonnement, que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. Elle permet de prendre en compte les effets des températures d'air, de rayonnement et de la vitesse d'air (ta, tr et va). Elle peut être calculée à partir de la température à l'intérieur d'un globe chauffé.

I.6.1.4.La température effective standard (SET*) :

La température effective est définie comme étant la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet échangerait la même quantité de chaleur et aurait même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. L'indice ET* prend en compte les effets de la température et de l'humidité (ta, tr, et Pa), et pour le calculer, il faut connaître la mouillure cutanée et l'indice de perméabilité à la vapeur d'eau des vêtements (I_m). L'ASHRAE a établi des échelles de confort basées sur cet indice pour des sujets exerçant une activité faible (1 Met), ayant une vêture de0, 6 Clo et dans une ambiance calme (va < 0,2 m/s) [23].

$$C+R+E_{vap} = h_0.F_{cl}\,(T_{sk} - T_0) + (0{,}06+0{,}94w)\ 2{,}2hc\ .F_{pcl}\,(p_{sk} - p_{air})$$

$$= h'_0\ F'_{cl}\ (T_{sk} - SET^*) + (0{,}06+0{,}94\ w)\ 2{,}2\ h'_c\ F'_{pcl}(p_{sk} - 0.5p_{SET^*}) \qquad (I.41)$$

Avec

P_{SET^*} =pression de vapeur saturante à la température SET*

I.6.2.Les indices physiologiques :

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

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

I.6.2.1.Les indices de danger :

Ils ont été créés pour prédire les conséquences d'un climat extrême sur un sujet.

La plupart aboutit au calcul d'une Durée d'Exposition (D.L.E).ils ont en général été établis pour des raisons spécifiques ;leur domaine de validité est donc souvent limité a cette application[38].

I.6.2.2.Les indices de confort :

De nombreux travaux de recherche. Réalisés à l'intérieur des bâtiments ou dans des conditions expérimentales contrôlées en laboratoire.ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices. Nommés (indices de confort thermique).qui sont en fonction de la température et de la vitesse de l'air.

I.6.2.3.Les indices PMV et PPD :

A partir d'études réalisées en laboratoire sous des conditions stables, c'est-a-dire sans que l'individu ne change ni de vêtements, ni d'activité physique, le PMV (Vote Moyen Prévisible) et le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits).Le premier prédit la sensation thermique moyenne d'un large groupe d'individus et le second. Le pourcentage d'occupants de l'environnement thermique.

I.6.3.La zone de confort thermique :

-Le PMV (Vote Moyen Prévisible) :

Le PMV établi par Fanger permet de mesurer une sensation thermique globale du corps humain à partir du métabolisme et donne la moyenne des vôtres en référence à une échelle de sensation thermique .Les valeurs de l'indice PMV varient entre -3et 3 comme l'indique Tableau (I.5).

En constatant que les questionnaires utilisés pour évaluer le confort peuvent omettre certaines situation de confort, Fanger a avancé le postulat suivant : « sont déclarées inconfortables toutes les personnes ayant des sensations supérieurs à l'échelle 2 ou inférieures a l'échelle -2 ». Il a ensuite associé le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits) qui exprime le pourcentage des sujets « insatisfaits »de manière générale.

VALEURS DE L'INDICE PMV	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
SENSATION THERMIQUE	Chaud	Tiède	Légèrement tiède	Neutre	Légèrement Frais	Frais	Froid

Tableau I.2 correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques

-Le PDD (pourcentage Prévisible D'insatisfaits) :

A cause des différences physiologiques.il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions « idéales ».et le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits) exprime sous forme de pourcentage les sujets « insatisfaits » d'une ambiance thermique déterminée.

Par contre.il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum, qui correspond aux conditions optimales de neutralité thermique du corps humain[48].Il reste néanmoins, en moyenne, 5 d'insatisfaits lorsque le PMV est nul.

La norme ISO7730[50]stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique il faut que :

-0,5 <**PMV**<0,5 soit **PPD**<10%

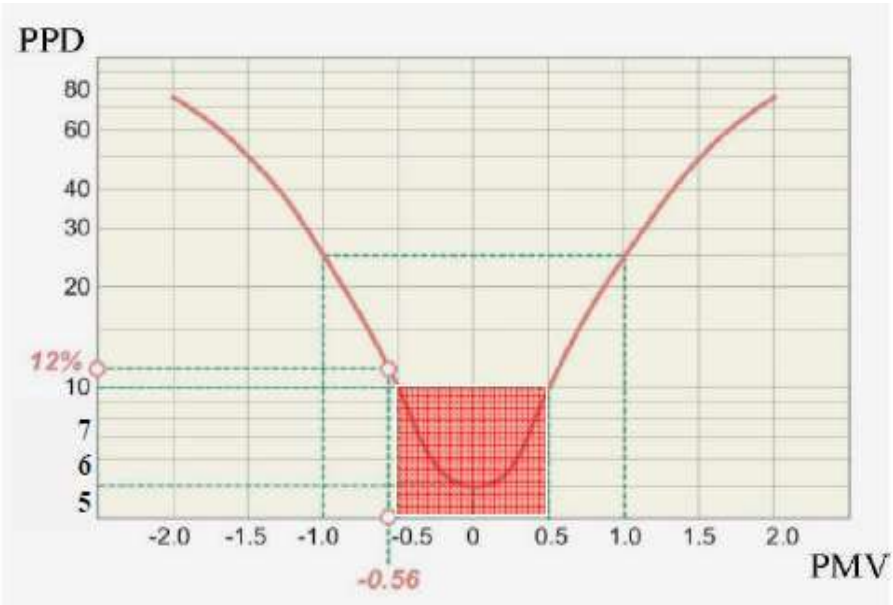


Figure I.5 correspondances entre PMV et PPD

I.7.Conclusion :

On conclure dans ce chapitre que le confort thermique c'est une notion très un important pour l'être l'humain, et que l'environnement thermique caractérisé par des grandeurs physiques et physiologique .L'étude et l'évolution du confort thermique ont d'abordés a travers des indices de confort .des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort.

Chapitre II
Modélisation du Confort Thermique

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre, une courte présentation des modèles les plus courants sera faite, doit intéresses aux modèles de thermorégulation du confort thermique, afin de pouvoir prédire les réactions d'un individu soumis à des climats complexes, tels qu'on peut les rencontrer dans l'habitat, c'est-à-dire variable dans le temps et dans l'espace.

II.2.Les modèles simples :

II.2.1.Le modèle à deux nœuds de Gagge : ET*, SET & PMV*

Gagge a développé un modèle dynamique simplifié de la thermorégulation [16]. Ce modèle représente le corps humain en deux nœuds concentriques représentant le centre du corps et la peau. Les échanges entre les deux compartiments considérés isothermes sont modélisés sous forme de conduction tissulaire et convection sanguine. Contrairement au modèle de Fanger, ce modèle permet de calculer les variables physiologiques (températures cutanées et internes, mouillure cutanée) dans des conditions transitoires. La température cutanée, la mouillure cutanée et le flux de chaleur cutané sont utilisés pour le calcul de l'indice ET* (new effective température). L'indice ET* dépend de la vêture et de l'activité du sujet. Pour standardiser le calcul, un nouvel indice, le « SET » (température effective standard) a été défini [16]. Le SET représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêture standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans la quelle il se trouve. La vêture standardisée est calculée selon l'équation [24].

$$I_{cls\ [clo]} = \frac{1.33}{(M[met] - W[met] + 0.74} - 0.095 \qquad \text{(II.1)}$$

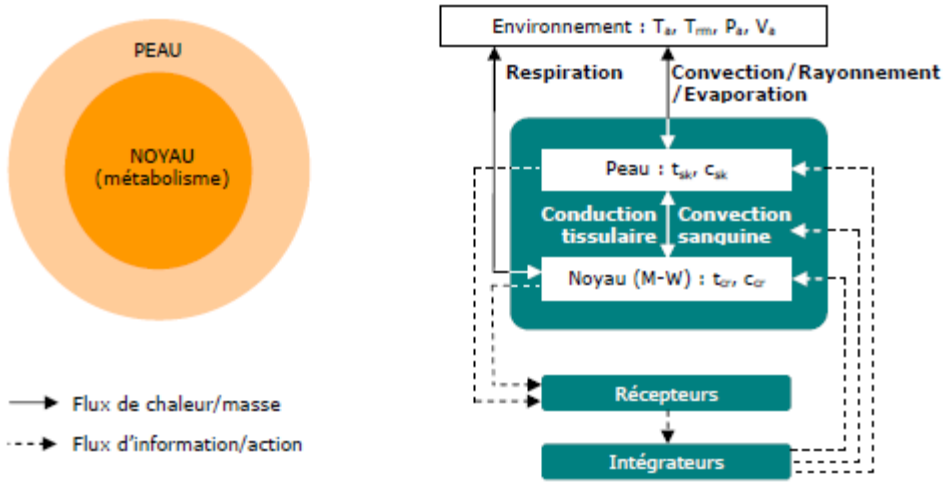


Figure II.1 Représentation du modèle physiologique à deux nœuds de Gagge [24]

II.2.2.Le modèle de Fanger : PMV & PPD

Dans les années soixante-dix, Fanger a établi une méthode qui permet d'analyser et d'évaluer l'ambiance thermique en vue de déterminer les conditions de confort thermique.

Cette méthode est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique. Elle asservi pour développer la norme française et internationale NF EN ISO 7730.

Avec le maintien de l'équilibre du bilan thermique du corps humain (condition nécessaire mais non suffisante pour le confort thermique), Fanger considère, pour le confort thermique, deux conditions supplémentaires concernant la limitation du débit sudoral et de la température cutanée dans les limites du confort [ASHRAE, 1997]. L'ASHRAE présente les deux équations déterminées par Rohles et Nevins pour calculer les valeurs de la température cutanée ($t_{sk,req}$) et du débit sudoral ($E_{rsw,req}$) nécessaires pour le confort thermique à partir du métabolisme (M-W).

$$t_{sk,req} = 35,7 - 0,0275.(M - W) \quad \text{(II.2)}$$

$$E_{rsw,\,req} = 0,42.\,(M - W - 58,15) \quad \text{(II.3)}$$

La méthode de Fanger consiste à déterminer de façon analytique les échanges de Chaleur entre le sujet et l'environnement. Puis en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée (bilan thermique) par le corps humain vêtu, supposé être aux valeurs de confort du débit sudoral et de température cutanée, il a établit un indice, le « PMV », qui prévoit le vote moyen de sensation thermique (globale) d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE. La relation a été déterminée statistiquement à partir des études expérimentales sur près de 1300 sujets dans des chambres climatiques. Pour déterminer l'acceptabilité de l'ambiance thermique, il a lié le PMV à un autre indice, le « PPD », qui prévoit le pourcentage des personnes qui seront insatisfaites dans l'ambiance considérée. Les personnes insatisfaites sont considérées celles dont le vote de sensation est extérieur à l'intervalle [-1,1]. La relation prévoit un minimum de pourcentage des insatisfaits de 5% pour un vote égal à zéro (sensation neutre), puis ce pourcentage augmente de façon symétrique de part et d'autre du vote zéro vers les sensations chaude et froide.

II.2.3.Le modèle K.S.U :

Le modèle KSU, publié en 1974, est dérivé du « Gagge ». Certaines équations ont été modifiées, mais la structure générale est la même.

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

- L'indice au froid T_{SENS}^{-} est relié à l'état de vasococonstriction :

$$T_{SENS}^{-} = -1{,}46\ \varepsilon_{yc} + \varepsilon_{yc}^{2} - 6{,}15\ \varepsilon_{yc}^{3} \qquad \text{(II.4)}$$

ε_{yc} : facteur de vasococonstriction

$$\varepsilon_{yc} = \frac{KS0 - KS}{KS0 - KS - 4} \qquad \text{(II.5)}$$

$$KS = K + V_b C_b \qquad \text{(II.6)}$$

Avec

K : conductance entre centre et peau

V_b : débit sanguin

C_b : chaleur massique de sang

L'indice 0 correspond à la neutralité

L'indice 4 correspond à des conditions très froides

- L'indice au chaud T_{SENS}^{+} est lie à la mouillure cutanée :

$$T_{SENS}^{+} = (5\text{-}6.56\ (HR\text{-}0.5))\ \varepsilon_{SW} \quad \text{(II.7)}$$

$$\varepsilon_{SW} = \frac{\omega 0 - \omega}{\omega 0 - 1} \quad \text{(II.8)}$$

Avec

ε_{SW} : facteur de mouillure

ω : mouillure cutanée

ω_0 : mouillure à la neutralité thermique

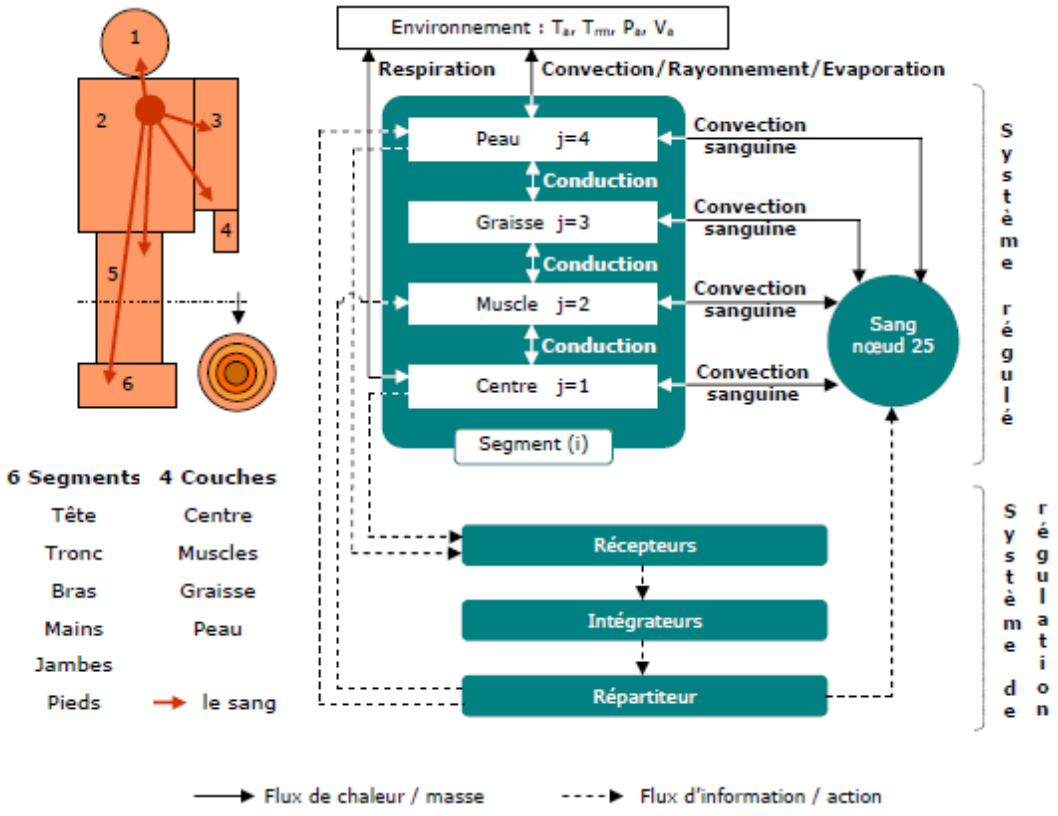


Figure II.2 Schématisation du modèle thermique de Stolwijk [24]

Les deux modèles de Gagge et K.S.U en compte les réactions physiologiques et sont utilisables en régime transitoire .De nombreuses études comparatives ont été

réalisées et montrent qu'ils donnent de bons résultats dans une gamme assez étendue de conditions ambiantes ; mais ont peut étudier uniquement des configurations homogènes, chaque paramètre (Ta, Tmrt, Pa, Va) de l'ambiance étant caractérisé par une seule valeur.

II.3.Les modèles complexes (dynamique) :

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

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

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

Gordon, en 1976, a agrandi le modèle de stolwijk êta créé 10 segments composés de 3 ou 5 couches, ce qui fait au total 44 compartiments.

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

II.4.Conclusion sur les modèles :

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

Les deux modèles ne correspondent pas aux mêmes besoins ni aux utilisations. Le modèle de Gagge est global et peut être utilisé pour des ambiances homogènes, afin due calculer des indices de confort.

Chapitre III
Modélisation et étude Paramétrique

III.1.Introduction :

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

Pour déterminer l'état thermique du corps humain, nous avons utilisé le modèle à deux nœuds de Gagge. Afin de calculer les indices PMV* et PPD, nous avons développé un programme sous MATLAB en utilisant l'algorithme proposé dans la norme ISO 7730.

III.2.Description du modèle de Gagge :

C'est un modèle de thermorégulation humaine .Son but essentiel est de calculer la température effective standard (SET^*) et un indice de sensation (T_{SENS}) [24]. Ce modèle est une version simplifiée, dérivée du modèle de Stolwijk. Il est composé de deux compartiments concentriques représentant le centre du corps et la peau, comme l'indique la figure (III.1).

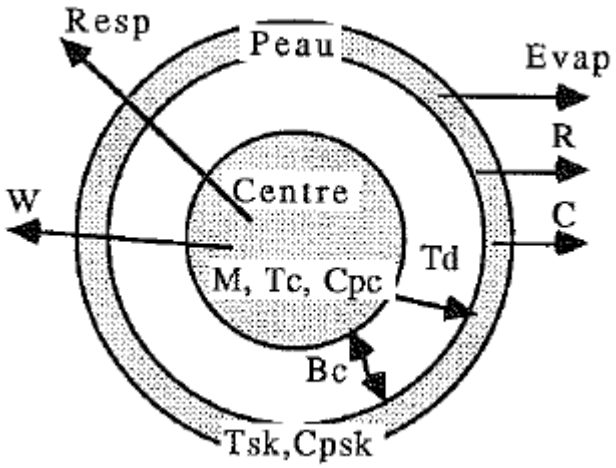


Figure III.1 Schématisation du modèle de Gagge [24].

Avec

M = métabolisme total

W = travail externe

Td = conduction tissulaire ,5.28 W/m². K

BC = convection sanguine

R_{esp} = respiration

C = convection externe

R = rayonnement

E_{vap} = évaporation

Cp = capacité calorifique

c = centre

s_k = Peau

Les compartiments sont isothermes .Les transferts de chaleur entre eux se font par conduction tissulaire (Td) et convection sanguine (BC). Les échanges vers l'extérieur se font par les modes définis au paragraphe précédent .L'influence des habits est prise en compte grâce à des résistances thermique et évaporation globale. A tout instant le bilan thermique des compartiments (S_C et S_{SK}) sont effectué ; on en déduit les nouvelles températures qui en résultent ($T_{C,}$ T_{SK}), puis les réactions physiologiques (vasomotricité, frissons sudation) nécessaires pour équilibrer ce bilan.

L'indice PMV* peut alors être déterminé en remplaçant la température opérative par ET dans l'expression du PMV et en utilisant la température de peau calculée ci avant. Parallèlement les autres indices de confort (PMV, SET, TSENS et DISC) sont calculés à titre de comparaison.

$$PMV = [0{,}303.\exp(-0{,}036.M) + 0{,}028].\ L \qquad \text{(III.1)}$$

$$PPD = 100 - 95.\exp[-(0{,}03353.PMV^4 + 0{,}2179.PMV^2)] \qquad \text{(III.2)}$$

$$L = M - W - Edif - Ersw - req - Eres - Cres - R - C \qquad \text{(III.3)}$$

Avec :

L = l'écart dans le bilan thermique entre chaleur produite et perdue, W/m²

PMV = vote moyen prévisible sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE

PPD = pourcentage prévu des insatisfaits, %

La température cutanée, la mouillure cutanée et le flux de chaleur cutané sont utilisés pour le calcul de l'indice ET* (new effective température). L'indice ET* dépend de la vêture et de l'activité du sujet. Pour standardiser le calcul, un nouvel indice, le « SET» (Température effective standard) a été défini [16]. Le SET représente la Température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative, dans laquelle un sujet, portant une vêture standardisée par rapport à son activité, échangerait la même quantité de chaleur et aurait la même mouillure cutanée que dans l'enceinte réelle dans laquelle il se trouve. La vêture standardisée est calculée selon l'équation [24].

Le SET est un indice de confort thermique intégrant l'effet des six paramètres de base, et applicable dans des conditions transitoires chaudes, modérées ou froides. Les sensations thermiques peuvent être déduites des différentes valeurs de SET à partir du Tableau (III.1) [21].

De plus, Gagge propose de remplacer la température opérative par la température Effective dans le calcul du PMV. Le PMV ainsi calculé est noté PMV*, ceci permet de mieux prendre en compte les effets de l'humidité en zone chaude [24].

SET (°C)	*Sensation*	*L'état physiologique d'une personne sédentaire*
>37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
34.5-37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.0-34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6-30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22.2-25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5-22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5-17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0-14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

Tableau III.1 La relation entre la température standard effective SET et la sensation thermique [21]

III.3.Les équations du modèle :

Le bilan thermique dans chaque compartiment est calculé selon les équations :

Noyau : $S_c = M + M_{Shiv} - (Td + m_{bl} . C_{p,bl}) (t_C - t_{Sk}) - W - Q_{res}$ (III.4)

Peau : $S_{Sk} = (Td + m_{bl} . C_{p,bl})(t_C - t_{Sk}) - Q_{dry} - Q_{evp}$ (III.5)

Avec

Sc, Ssk = Bilan thermique du noyau et de la peau respectivement, W/m²

M + Mshiv = Production de chaleur interne (métabolisme et frisson), W/m²

W = travail externe, W/m²

Qdry, Qevap, Qres = Echange de chaleur sensible, latente et respiratoire respectivement, W/m²

Td = Conductivité tissulaire, 5.28 W/m².K

mbl = Débit sanguin périphérique, L/m².h

Cp, bl = Chaleur spécifique du sang, 4.19 kJ/kg.K (soit 1.163 Wh/LK)

t_c, t_{sk} = Température interne et cutanée respectivement, °C

Les variables physiologiques relatives à la thermorégulation (débit sanguin Périphérique, flux de chaleur généré par frisson et débit de sudation régulatrice) sont calculées en fonction d'un signal d'erreur sur les températures interne, de peau et moyenne du corps. Le signal d'erreur correspond à l'écart par rapport aux consignes (33.6°C pour la peau et 36.8°C pour le noyau).

Le débit sanguin périphérique m_{bl} (en L/m²h) :

$m_{bl} = (6,3+200\times SIG^{+}_{Cr}) / (1+0.5\times SIG^{-}_{Sk})$ (III.6)

Le terme 6.3 en numérateur correspond au débit sanguin en conditions normales.SIG^{+}_{Cr} Le terme 200× est relatif à l'augmentation du débit sanguin en cas de vasodilatation lorsque la température interne est supérieure à la consigne (est le signal d'erreur correspondant à l'écart entre la température interne et la consigne dans le cas où celle-ci est SIG^{+}_{Cr} supérieure à la consigne 36.8°C, est zéro dans le cas contraire). Le terme en dénominateur est relatif à la réduction du débit sanguin en cas de vasoconstriction lorsque la température SIG^{-}_{Sk} de peau est inférieure à la consigne (est le signal d'erreur correspondant à l'écart entre la température de peau et la

consigne dans le SIG^{-}_{SK} cas où celle ci est inférieure à la consigne 33.6°C, est zéro dans le cas contraire).

Le flux de chaleur générée par frisson M_{shiv} (en W/m²) :

$$M_{Shiv} = 19.4 \times SIG^{-}_{SK} \times SIG^{-}_{Cr} \quad \text{(III.7)}$$

Avec

SIG^{-}_{SK} e SIG^{-}_{Cr} = les signaux d'erreur quand les températures internes et de peau Sont inférieures à leurs consignes respectivement. Ils sont zéro dans le cas contraire.

Le débit de sudation régulatrice m_{sw} (en g/m²h) :

$$m_{sw} = 170 \times SIG^{+}_{b} \times \exp\left(SIG^{+}_{SK} / 10.7\right) \quad \text{(III.8)}$$

Avec

SIG^{+}_{b} et SIG^{+}_{SK} = l'écart des températures du corps et de peau par rapport à leurs consignes quand elles leur sont supérieures.

L'évaporation de la sudation régulatrice E_{sw} :

$$E_{sw} = 0.68 \times m_{sw} \quad \text{(III.9)}$$

La perspiration insensible E_{dif} (par diffusion) :

$$E_{dif} = (1 - E_{sw} / E_{max}) \times 0.06 \times E_{max} \quad \text{(III.10)}$$

$$E_{sk} = E_{sw} + E_{dif} \quad \text{(III.11)}$$

$$\omega = E_{sk} / E_{max} \quad \text{(III.12)}$$

$$Q_{sk} = h \times F_{cle} \times (t_{sk} - t_0) + \omega \times LR \times h_c \times F_{pcl} \times (p_{s,sk} - p_a) \quad \text{(III.13)}$$

$$F_{cle} = f_{cl} / (1 + f_{cl} \times h \times R_{cl}) \quad \text{(III.14)}$$

$$F_{pcl} = 1 / (1 + (1 / i_{cl}) \times f_{cl} \times h_c \times R_{cl} \quad \text{(III.15)}$$

Les températures internes et cutanées du corps humain sont calculées selon les équations :

$dT_{SK} / dt = S_{SK} / C_{PSK}$ (III.17)

$dT_C / dt = S_C / C_{P\,C}$ (III.18)

Avec

Cp c = chaleur spécifique du noyau [3.49 kJ/ (kg. K)]

Cp_{sk} = chaleur spécifique de la peau [3.49 kJ/ (kg. K)]

t = temps

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

$T_{SENS} = 0.245\ SET^* + 0.0165\ P_{SET^*} - 6.741$ (III.19)

III.4.Résultats et discutions :

III.4.1.La Température interne du corps humain Tc :

La température interne d'un corps humain varie au cours d'une journée de 36.5°C pendant la nuit a 37.5°C en milieu d'après –midi. La figure (III.1) montre les évolutions de la température interne en fonction de temps. En constate que les amplitudes varie entre 0.27°C (Amplitude minimale) et 0.4°C (Amplitude maximale) en fonction de changement de climat. Nous avons fait la moyenne des températures interne et on résulte la température Tc moyenne 36.54 °C.

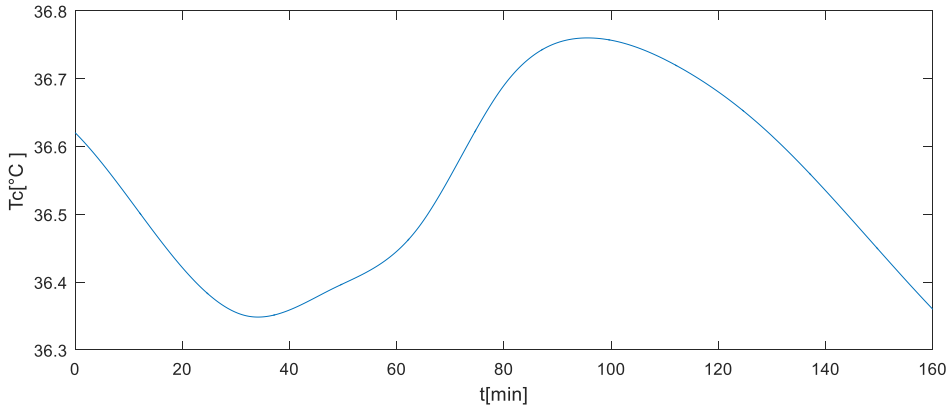


Figure III.2 la température interne d'un corps humain Tc en fonction de temps

III.4.2.La température moyenne cutanée Tsk :

La figure (III.2) montre les évolutions de la température moyenne cutanées Tsk en fonction de temps. En constate que les amplitudes varie entre 2.7°C (Amplitude minimale) et 3.97°C (Amplitude maximale) en fonction de changement de climat. Et en remarque après la simulation les variations de Tsk, en résulte la température Tsk moyenne 32.59°C.

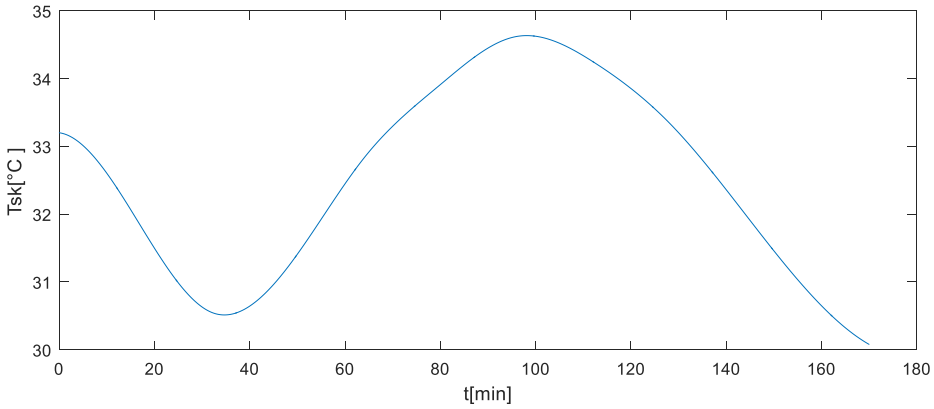


Figure III.3 la température moyenne cutanée d'un corps humain Tsk en fonction de temps

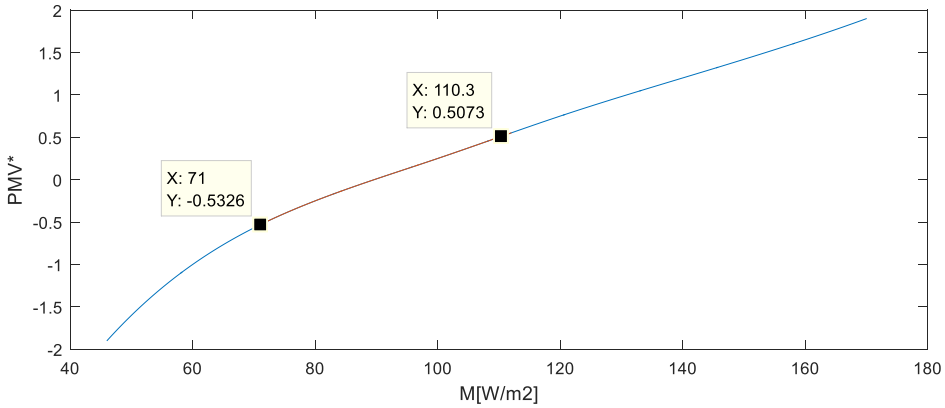
Comparaison :

On peut comparer les évolutions de la température cutanées et les évolutions de la température interne correspond au résultats du simulation montre que la somme de température cutanées moyenne calculée est inferieure a la température interne calculée du corps de Tsk et Tc a une valeur de T égale 3.95°C.

III.4.3.Effet métabolique :

La figure (III.4) (A) et (B) montre l'effet du métabolisme sur les indices de confort de Gagge (PMV* et PPD).On remarque une augmentation de l'activité conduit directement à une production métabolique induit indirectement une augmentation de la vitesse de l'air. Pour assurer le confort dans ces condition, on se doit diminue la température ambiant ou diminue le clo .Aussi de permettre une évacuation du surcroît d'énergie produite par l'activité métabolique.

(A)



(B)

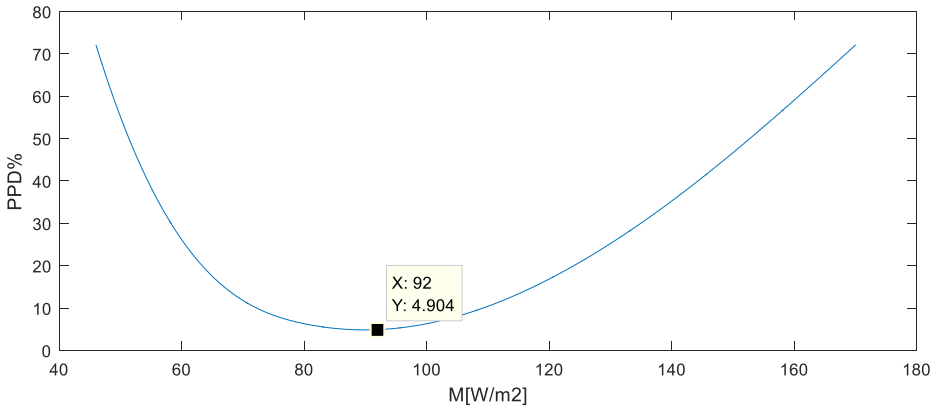
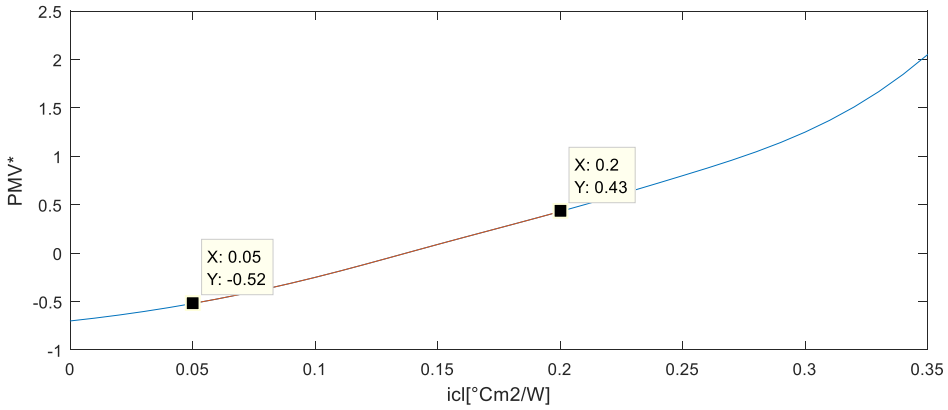


Figure III.4 Variation de PMV et PPD en fonction du M
(Icl=0.7clo, ta=26.5°C, va=0.2m/s, w=0, HR=50%)

III.4.4.Effet de l'isolement vestimentaire (clo) :

Les vêtements permettent de créer un microclimat sous – vestimental, en modifiant les échanges de chaleur, entre la peau et l'environnement et de maintenir le corps dans des conditions thermique acceptable, été comme hiver. La figure (III.5) (A) et (B) montre l'effet de l'isolement vestimentaire sur les indices de confort de Gagge (PMV* et PPD). On peut définit dans ces graphes quel est l'habillement idéal dans c'est condition. C'est l'abscisse de point d'intersection entre la courbe de PMV et PPD pour une vote égale à zéro (sensation neutre) correspondant à une valeur de PPD minimale égale 5%, ainsi pour Ta=26.5°C L'habillement adapté est de 0,15. Le fait de diminuer l'habillement pour une température élevé n'est pas suffisant pour atteindre une sensation de confort.

(A)



(B)

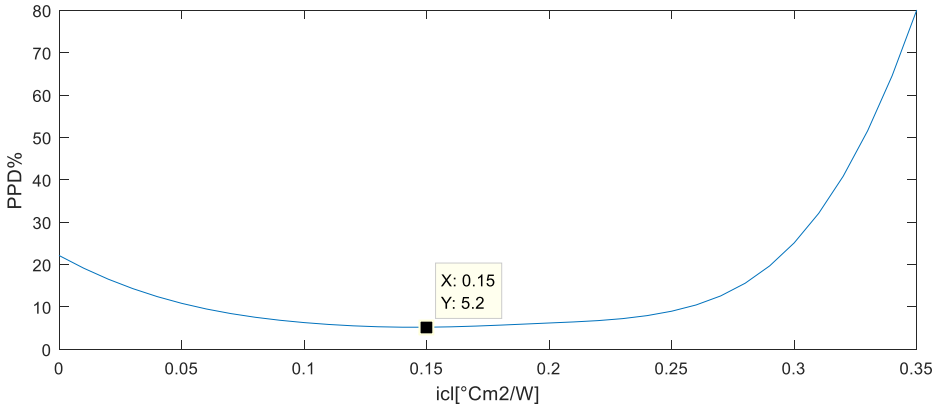


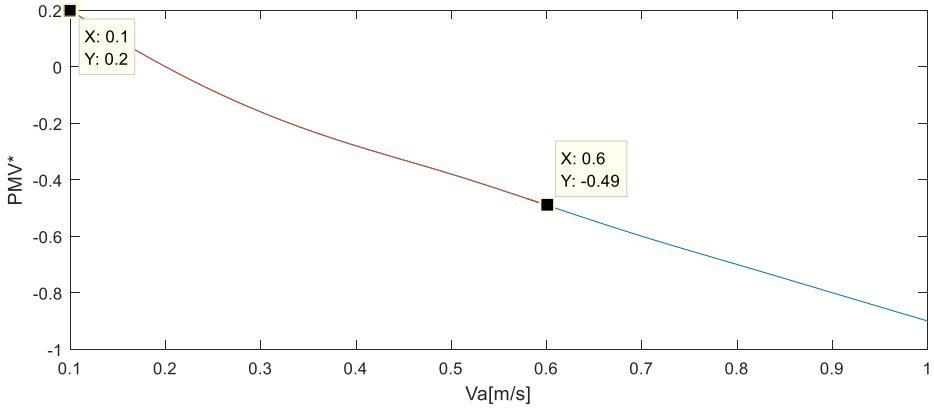
Figure III.5 Variation de PMV et PPD en fonction du Icl

(M=1.2met, ta=22°C, va=0.2m/s, w=0, HR=50%)

III.4.5.La vitesse relative de l'air :

La vitesse de l'air joue un grand rôle dans les échanges convectifs et évaporation à la surface de la peau, comme la température de la peau est presque toujours plus haute que la température extérieure. D'après la figure (III.6) (A) et (B) la vitesse optimale de confort et de 0.2m/s pour Ta=26 .5^{o}C. Toutefois a l'intérieure des bâtiments, ces vitesse demeurent limités ne dépassent pas généralement cette vitesse en effet, l'individu commence à ressentir le mouvement de l'air a cette vitesse, et les concepteurs de systèmes de ventilation mécanique essayant de ne pas la dépasser.

(A)



(B)

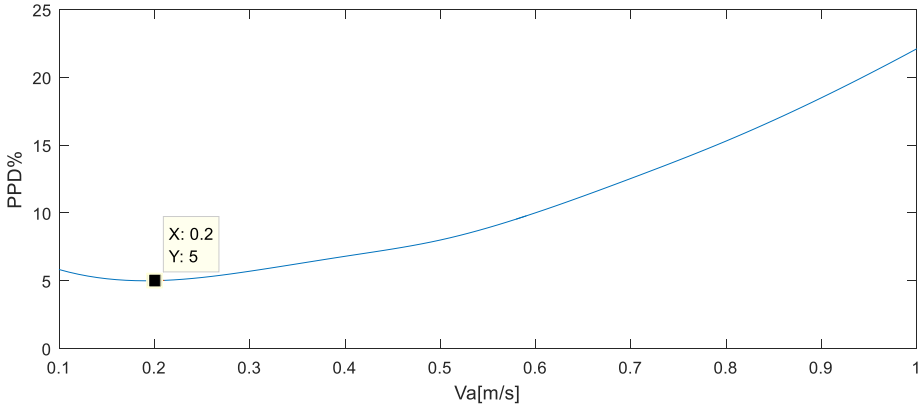
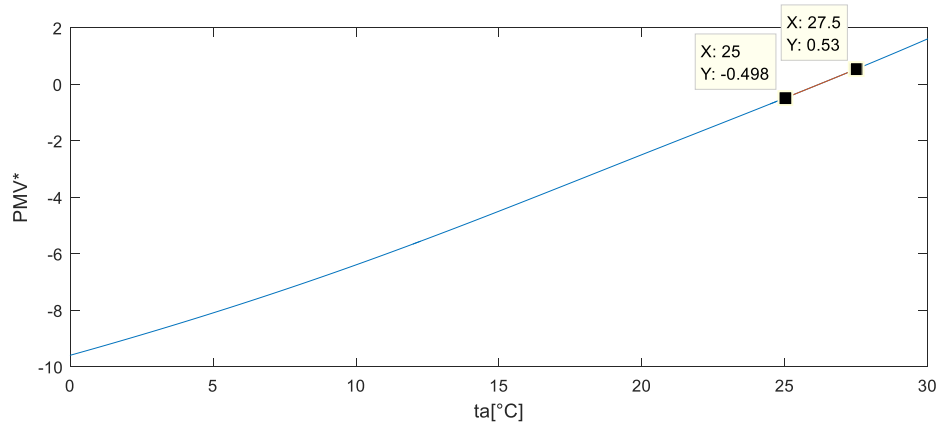


Figure III.6 Variation de PMV et PPD en fonction du Va
(M=1.2met, ta=22°C, Icl=0.7clo, w=0, HR=50%)

III.4.6.Effet de la température ambiante :

Elle représente l'indice le plus utilisé pour le contrôle des ambiances. Ce paramètre ne présente pas de grosses difficultés de mesure et d'évaluation, mais revêt un caractère toutefois limité pour la caractérisation complète de confort. La figure (III.7) (A) et (B) montre l'effet de la température ambiante sur les indices de confort de Gagge (PMV* et PPD). Dans ces conditions, la sensation de confort est obtenue à Ta= 26.5°C ce qui le cas d'un individu debout au repos.

(A)



(B)

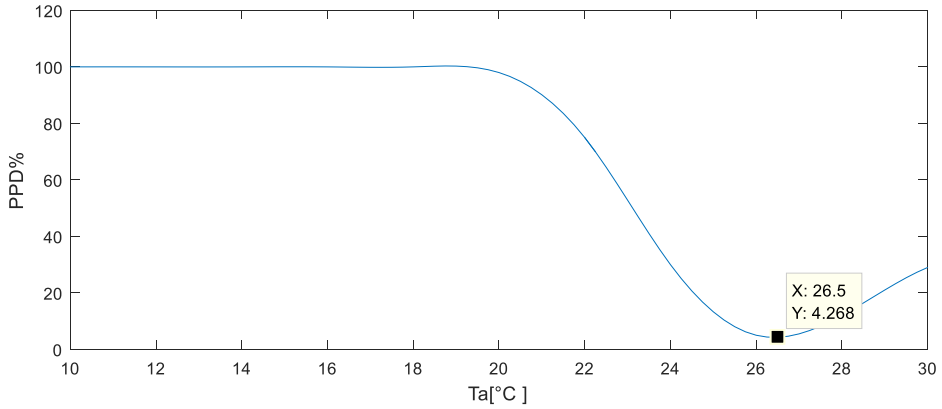
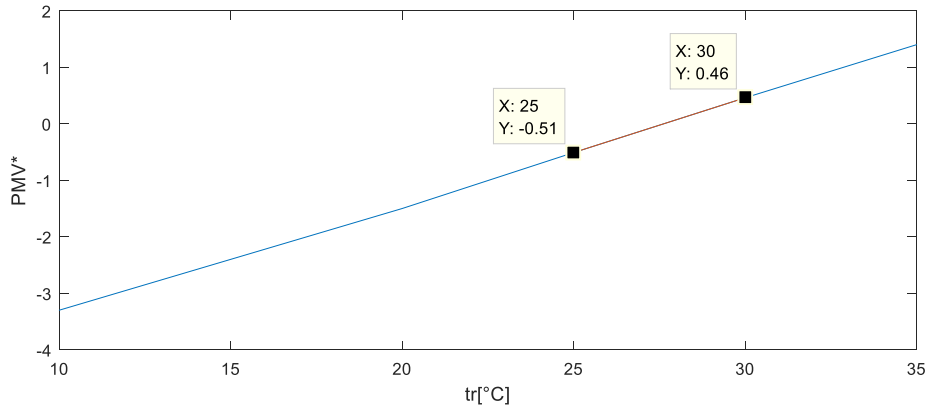


Figure III.7 Variation de PMV et PPD en fonction du ta (Icl=0.7clo, M=1.2met, va=0.2m/s, w=0, HR=50%)

III.4.7.Effet de la température moyenne radiante :

Ce paramètre à une influence considérable sur le niveau du confort thermique en particulier dans les espaces ouverts urbains. La figure (III.8) (A) et (B) montre que la zone de confort est cocue pour une température moyenne radiante Tmr =26.5^{o}C .On remarque que la zone de confort optimal est localiser généralement dans un espaces Tmr >Ta. Ce qui implique que le corps humaine est fait pour vivre dans une ambiance radiative et aussi dans l'extérieure.

(A)



(B)

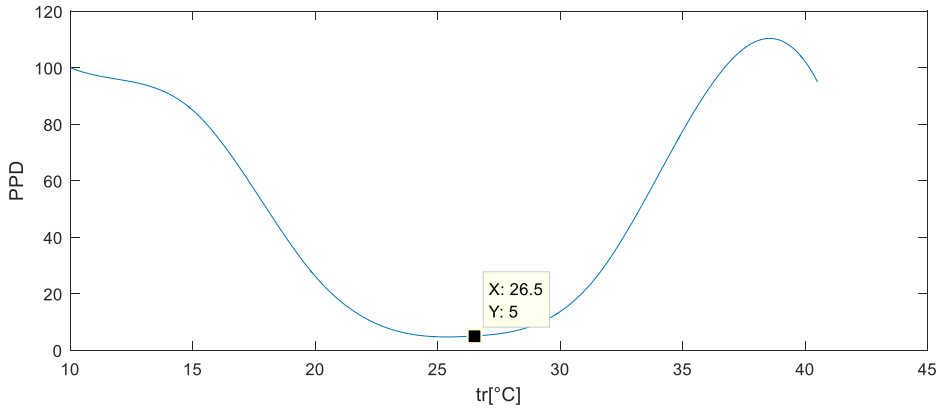
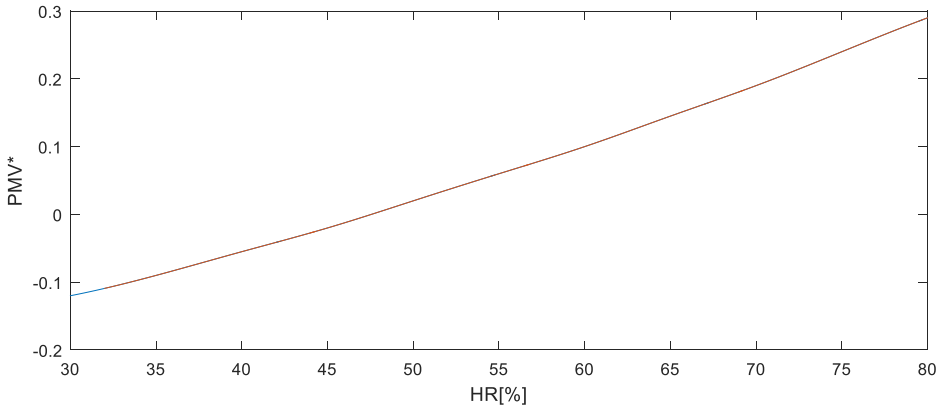


Figure III.8 Variation de PMV et PPD en fonction du La température moyenne radiante (Icl=0.7clo, M=1.2met, w=0, ta=26.5°C, HR=50 %)

III.4.8.L'effet du degré hygrométrique de l'air :

L'humidité relative de l'air influences des évaporatoires cutanés, elle détermine la capacité évaporatoire de l'air et donc l'efficacité de refroidissement de la Sueur. La sensation d'inconfort liée à l'humidité est aussi fonction de la température ambiante Ta puisque la puissance échanges sous forme latente croit avec cette température. La figure (III.9) (A) et (B) montre la variation des indices de Gagge pour les valeurs d'humidité comprises entre 30 % et 80 %.On remarque que l'humidité a relativement peu d'impact sur la sensation de confort a condition toutefois qu'elle soit dans des limites supportables par le système respiratoire. La limite supérieure est fixée à 80 % d'humidité relative au dessus de laquelle le désagrément est aux condensations provoquées à ces niveaux d'humidité.

(A)



(B)

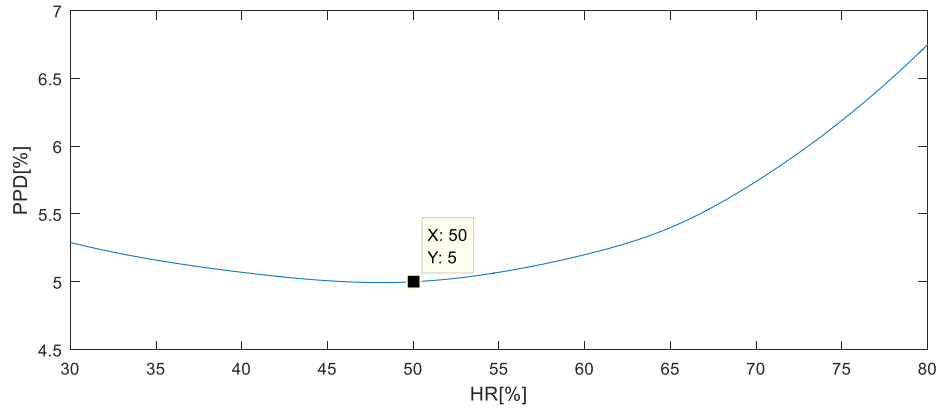


Figure III.9 Variation de PMV et PPD en fonction du HR

(M=1.2met, ta=26.5°C, Icl=0.7clo, w=0, Va0.2m/s)

III.5.Conclusion :

À travers ce chapitre nous avons évalué le modèle de deux nœuds de Gagge qui définit la température de corps humain et la température de la peau puis donnée l'influence des différents paramètres et résulte les zones qui assurer le confort thermique pour l'être humaine dans l'habitat.

Conclusions générale :

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur pour l'être humain tant pour la qualité des ambiances que pour les impacts énergétiques et environnement dont il est responsable.

Pour situer le problème du confort thermique, nous avons développé un modèle mathématique sur MATLAB évaluer le confort thermique dans les bâtiments à partir du modèle de deux nœud afin d'étudier l'effet des différents paramètres pouvant influencer le confort thermique de l'être humain dans l'habitat.

L'étude du confort thermique a été abordée par l'approche de l'équilibre thermique. Celle-ci relie la sensation thermique à quatre paramètres physique et à deux paramètres personnels : d'une part, la température ambiante et rayonnante, l'humidité relative et le mouvement de l'air, et d'autre part, l'activité ainsi que l'habillement de l'occupant. Suite à cette approche, le modèle adaptatif a mis en relation la sensation thermique à la température extérieure afin de prévoir la température de confort. Néanmoins, l'approche de l'équilibre thermique favorise un climat homogène stable et artificiel ainsi qu'un contrôle restreint, alors que l'approche adaptative favorise les environnements diversifiés et sensibles aux variations du climat naturel ainsi qu'un contrôle élevé de l'environnement.

Apres les calcules on a résulte que la température de corps est toujours supérieure a la température de la peau.

Pour assures le confort thermique doit être vérifié l'augmentation de l'activité conduit directement à une production métabolique et définit après ces résultats quel est l'habilement idéale. La vitesse de l'air très importante dans les échanges convectifs et l'évaporation à la surface de la peau est cette vitesse généralement en effet. On remarque que la zone de confort optimal est localiser généralement dans un espaces T_{mr} >Ta. Ce qui implique que le corps humaine est fait pour vivre dans une ambiance radiative et aussi dans l'extérieure. L'effet du degré hygrométrique de l'air influences des évaporatoires cutanés mais peu d'impact sur la sensation de confort a condition toutefois qu'elle soit dans des limites supportables par le système respiratoire.

Faine une modélisation en régime dynamique pour avoir des résultats réels et plus précis.

Références Bibliographiques

[1] De Dear RJ, Brager GS. *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. ASHRAE Transactions 1998*

[2] Hensen JLM. *On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. PhD thesis, Technische Université Eindhoven; 1991.*

[3] GIVONI G. *L'homme l'architecture et le climat. Paris: Le Moniteur, 1978.*

[4]THELLIER FRANÇOISE*. Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat, une approche de l'étude confort. Energétique. Toulouse: Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1989.*

[5] BRUANT M. *développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance. Conception en bâtiment et techniques urbaines. Lyon: INSA de Lyon, 1997, 269 p.*

[6]BELKHOUANE, H. *(2007). Etude de l'impact des modèles de confort sur la consommation énergétique pour les bâtiments NZEB's type bureaux (Cooling dominated) .p, 16.*

[7] Moujalled, B. *(2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. Thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 1-330.*

[8] De Dear, R.J. *(2004). Thermal comfort in practice. Indoor Air, 14 (7), 32-39. Blackwell Munksgaard.*

[9]DEVAL J.C. *Le confort thermique en climat tempéré. Revue de Physique Appl., Vol. 19, pp.513-531 , 1984.*

[10][Houdas Y. et Guieu J. D. 1977], *Houdas Y. et Guieu J. D. La fonction thermique. simep-Editions. Villeurbanne, 1977.*

[11] [Clark J. A., McArthur J. C., et al. 1981], *Clark J. A., McArthur J. C., et al. The physics of the microclimate. In: Bioengineering, thermal physiology and comfort: Elsevier, 1981, pp. 13 - 27.*

[12][Vogt J.-J. 1985], *Vogt J.-J. Confort physiologique. Technique de l'ingénieur, 1985, vol. B-2180, pp. 1-10.*

[13][Johnson A. T. 1991], *Johnson A. T. Thermal responses. In: Biomechanics and exercice physiology New York: Wiley, 1991.*

[14][Candas V. 2000], *Candas V. Confort thermique. Paris, FRANCE: Techniques de l'ingénieur, 2000.*

[15][Guyton A. C. et Hall J. E. 2002], *Guyton A. C. et Hall J. E. Régulation de la température corporelle et fièvre. In: Précis de physiologie médicale. 2ème édition. 2002, pp. 875 - 886.*

[16]ASHRAE*. Chapter 8: Thermal Comfort. In: ASHRAE han book of fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 1997, p. 8.1-8.28.*

[17]Agnès SOMMET*, MEDICAMENTS ET VAGUE DE CHALEUR : APPROCHE PHARMACOEPIDEMIOLOGIQUE, Pharmacologie. L'Université Toulouse III - Paul Sabatier: Université de TOULOUSE, 2009, (1.A-12,20p.).*

[18] *Cours : Physiologie n°3 Professeur : Pr. André Denjean Le 19/11/07 à 8h30 Ronéotypeur : Matthieu DORISON*

[19]Noel Djongyang, René Tchinda , Donatien Njomo. *Thermal comfort , Renewable and Sustainable Energy Reviews;2010*

[20][Vogt J.-J. 1985], *Vogt J.-J. Confort physiologique. Technique de l'ingénieur, 1985, vol. B-2180, pp. 1-10.*

[21] Parsons K. *2002a, Parsons K. Human thermal environment. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. Second edition. London: Taylor & Francis, 2002a, 527 p.*

[22] [AFNOR 2006], *AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. NF EN ISO 7730, 2006.*

[23][AFNOR 2007], *AFNOR. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire. NF EN ISO 9920, 2007.*

[24]Gagge AP, Fobelets AP, Berglund LG. *A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Transactions 1986*

[25]JEAN JAQUES VOGT, *Docteur en médecine chef du département Environnement physique à l'institut national de recherche et de sécurité (INRS) de Nancy, Technique d'ingénieur 10 Aout 1985 -19 Mars 2012. Confort Physiologique, bases physiologique du confort thermique.*

[26]NARÇON SANDRINE*. Caractérisation des perceptions thermiques en régime transitoire - Contribution à l'étude de l'influence des interactions sensorielles sur le confort. Thèse Neuroscience et Comportement. Paris: Ecole Pratique des Hautes Etudes, 2001.*

[27] MOUJALLED, Bassam. 2007*. [Thèse]. Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés [En ligne]. Thèse en Génie Civil. Lyon : Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 330 p.Disponiblesur:<http://fr.pdfsb.com/readonline/5a31684365774237576e64314448316b55513d3d-749128 > (Consulté le 4 décembre 2012).*

[28] OLESN B ,W. *MORTENSEN, E.THORSAUGE,J.BERG-MUNCH, B. Thermal com fort in a room heated by different methods. ASHRAF Trans.vol, 86(1).pp, 34-48, 1980.*

[29] YILMAZZ, Z. *evaluation of built environment form the thermal comfort viewpoint. ASHRAE Trans .vol, 93(1).pp, 549-563.1987.*

[30] DESSAGNE, J, M. *Caractérisation de la qualité d'une ambiance thermique, une profil de confort UCRES. clima 2000, Copenhague 1985.*

[31] FANGER, P, O .*The prediction of comfort and acceptability of complex thermal environments. Energy conservations strategies in building. Comfort, acceptability and health. J. A. J. Stolwijk editor, pp.132- 142. 1972.*

[32] Mazari, M*. (2012). Etude et évolution du confort thermique dans bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou). Mémoire de magister en architecture, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 1-167.*

[33] Taleghani, M., Tenpierik, M., Kurvers, S., Van Den Dobbelsteen, A*. (2013). A review into thermal comfort in building. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 201-215.*

[34] FANGER, P, O.,BANHIDI L.,OLESEN B.W.,LANGKILDE G. *Comfort limits for heated ceilings. ASHRAE Trans., Vol. 86(2), pp.141-155, 1980.*

[35]OLESEN B.W.*Local thermal discomfort.Thermal comfort.Heat Stress.Bruel & Kjaer Technical review, 1972.*

[36]FONGER P, O .*IPSEN B.LANGKILDE G .OLESEN, B, W.CHRITENSEN, N. TANBE ,S . Comfort limits for asymmetric thermal radiation .Energy and buildings.vol, 8.pp, 225-236.1985.*

[37]BLICH J.,JOHNSON K.G. *Glossary of terms for thermal physiology.j. Applied Physiol., Vol. 35(6), pp.941-961,1973.*

[38]Mc INTYRE M.A. *Indoor climate. Architectural series Applied sciences publishers, London, 443., 1980.*

Les normes:

ISO 7730:2005. *Ergonomics of Thermal Environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria Beuth Verlag*

ISO 7933: 2004. *Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted hest strain*

ISO 8996: 2004. *Ergonomie de l'environnement thermique — Détermination du métabolisme énergétique*

ISO 11399: 1995. *Ergonomics of the themal environment- principles and application of relevant international standars*

ISO 7243: 1989. *Hot environments -- Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)*

ISO 9886: 2003. *Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologique*

ISO 11079: 1993. *Evaluation of cold environments- Determination of required clothing insulation (IREQ)*

ANNEXE N°1 : Hygrométrie (ou humidité relative)

De préférence, l'hygrométrie doit rester comprise dans l'intervalle 30 - 70 %.

- Si l'hygrométrie est inférieure à 30 %, l'air est trop sec. Ceci provoque le dessèchement de la peau et des muqueuses, ce qui entraîne gênes et risques sanitaires:

−une peau trop sèche devient rugueuse et irritée,

−les porteurs de lentilles de contact se plaignent du manque de lubrification de leurs lentilles,

− le nez filtre moins bien les particules contenues dans l'air qui pénètrent ainsi dans l'appareil respiratoire,

−la gorge sèche est douloureuse et sujette aux attaques microbiennes…

- Si l'hygrométrie est supérieure à 70 %, l'air est trop humide. Les sujets expriment une sensation d'étouffement. La sueur s'évapore mal à la surface de la peau et peut ruisseler.

Une humidité excessive favorise le développement de bactéries, moisissures, champignons, acariens…

Pour maintenir l'hygrométrie dans cet intervalle, il est souvent nécessaire d'humidifier l'air en hiver et de le déshumidifier en été.

ANNEXE N°2 : L'unité de résistance thermique des vêtements (Clo)

Les résistances thermiques aux échanges s'expriment en m². °C/W. L'unité d'isolement vestimentaire utilisée est le clo, définie comme l'isolement vestimentaire nécessaire pour maintenir en équilibre le bilan thermique d'un sujet au repos exposé à un air calme, à une température de 21°C.

Exprimé en unités physiques

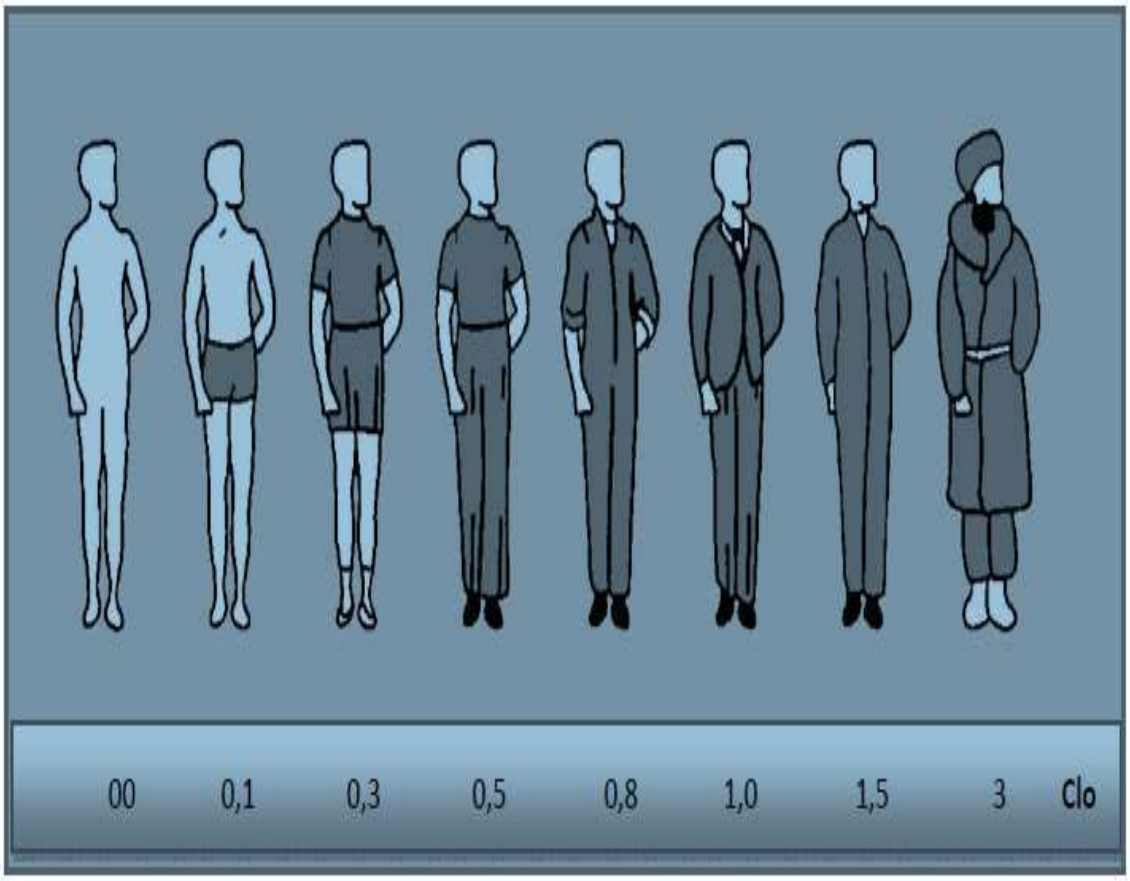
$$1 \text{ clo} = 0{,}155 \text{ m}^2.$$

Ensemble vestimentaire	Icl
Nu	0
short	0,015
Ensemble tropical typique (slip, short, maillot de corps à manches courtes, chaussettes légères et sandales)	0,045
Vêtement d'été léger (slip, pantalon d'été, maillot de corps à manches courtes, chaussettes légères et chaussures)	0,08
Vêtement de travail léger (sous-vêtement léger, chemise de coton à manches longues, pantalon de travail, chaussettes de laine et chaussures)	0,11
Vêtement d'hiver (sous-vêtement, chemise à manches longues, pantalon, chandail à manches longues, chaussettes chaudes et chaussures)	0,16
Vêtement européen typique (sous-vêtement de coton à jambes et manches longues, chemise, pantalon, gilet, veste, chaussettes de laine et chaussures chaudes	0,23

Tableau : isolements thermiques intrinsèques d'ensembles vestimentaires caractéristiques l_{cl} (en m-. K/W) [25]

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

Tableau : exemple de valeurs de I_{cl} pour différentes tenues vestimentaire [24]



L'évaluation de l'isolement thermique I_{cl} peut se faire soit sur la base de tableaux donnant l'isolement thermique vestimentaire pour différents ensembles vestimentaires caractéristiques (tableau 1.2), soit sur la base des isolements thermiques intrinsèques $I_{cil,}$ de divers éléments vestimentaires (tableau 1.2). Ces deux tableaux sont extraits de la norme ISO 7730. I_{cl} est obtenu par somation ΣI_{cli} des isolements élémentaires au moyen de l'équation :

$I_{cl} = 0{,}82 \Sigma I_{cli}$

Élément vestimentaire	Icli
Slip	0.002
Chaussettes légères	0,005
Chaussettes chaudes	0.006
Sous-vêtements; slip et soutien-gorge	0,008
jupon	0.020
combinaison	0.029
caleçon	0.008
maillot de corps	0,009
Chemisette: T-shirt	0.014
légère à manches courtes légère à manches longues	0.031
, chaude à manches courtes	0.043
Jupe chaude	0.039
Robe: légère	0,034
chaude	0,026
Chandail: léger à manches courtes	0.098
chaud à manches longues	0,026
Veste chaude	0,057
Pantalon: léger	0,076
moyen	0,040
chaud	0.050
Chaussures légères	0.068
	0.006

Tableau :Isolements thermiques intrinsèques d'éléments vestimentaires l_{cil} (en m^2. K/W) [25]

ANNEXE N°3 : L'unité d'énergie métabolique (Met)

Le métabolisme total M peut être mesuré expérimentalement à partir du volume d'oxygène consommé. Dans la pratique, il est estimé à partir des tableaux qui donnent le métabolisme en fonction de la description de l'activité ou la tâche. La puissance métabolique est donnée par rapport à la surface corporelle. Elle est exprimée souvent en Met, l'unité de Met est égale à 58.15 W/m² et correspond au métabolisme d'un individu assis au repos.

(Où la surface du corps humain est d'environ 1,8 m²).

Activité	Met
Repos, couché	0.8
Repos, assis	1
Activité, légère (bureau, école…)	1.2
Activité légère debout (laboratoire…)	1.6
Activité moyenne debout (travail sur machine…)	2.0
Activité soutenue (travail lourd sur machine…)	3.0

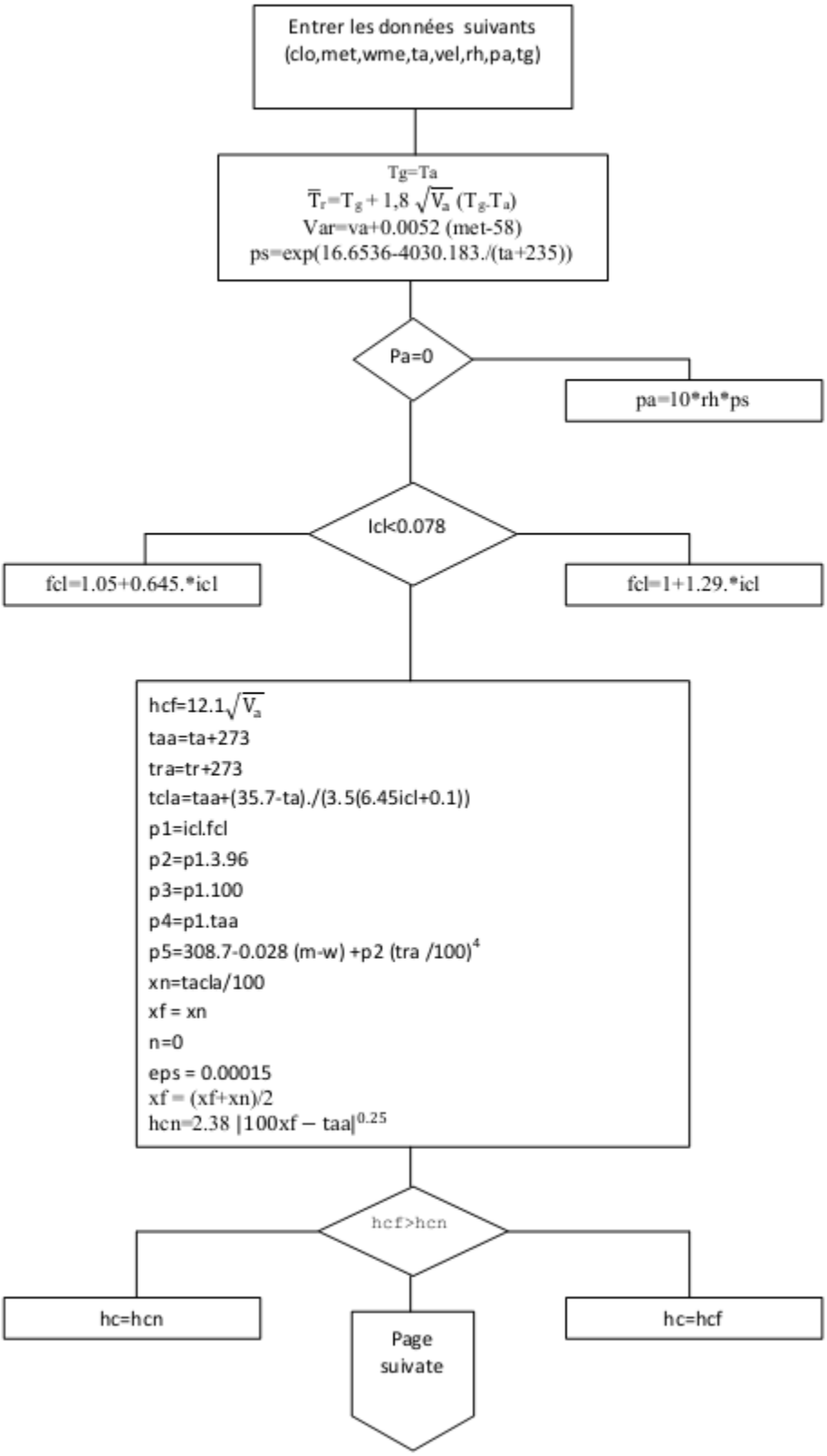
ANNEXE N°4 :

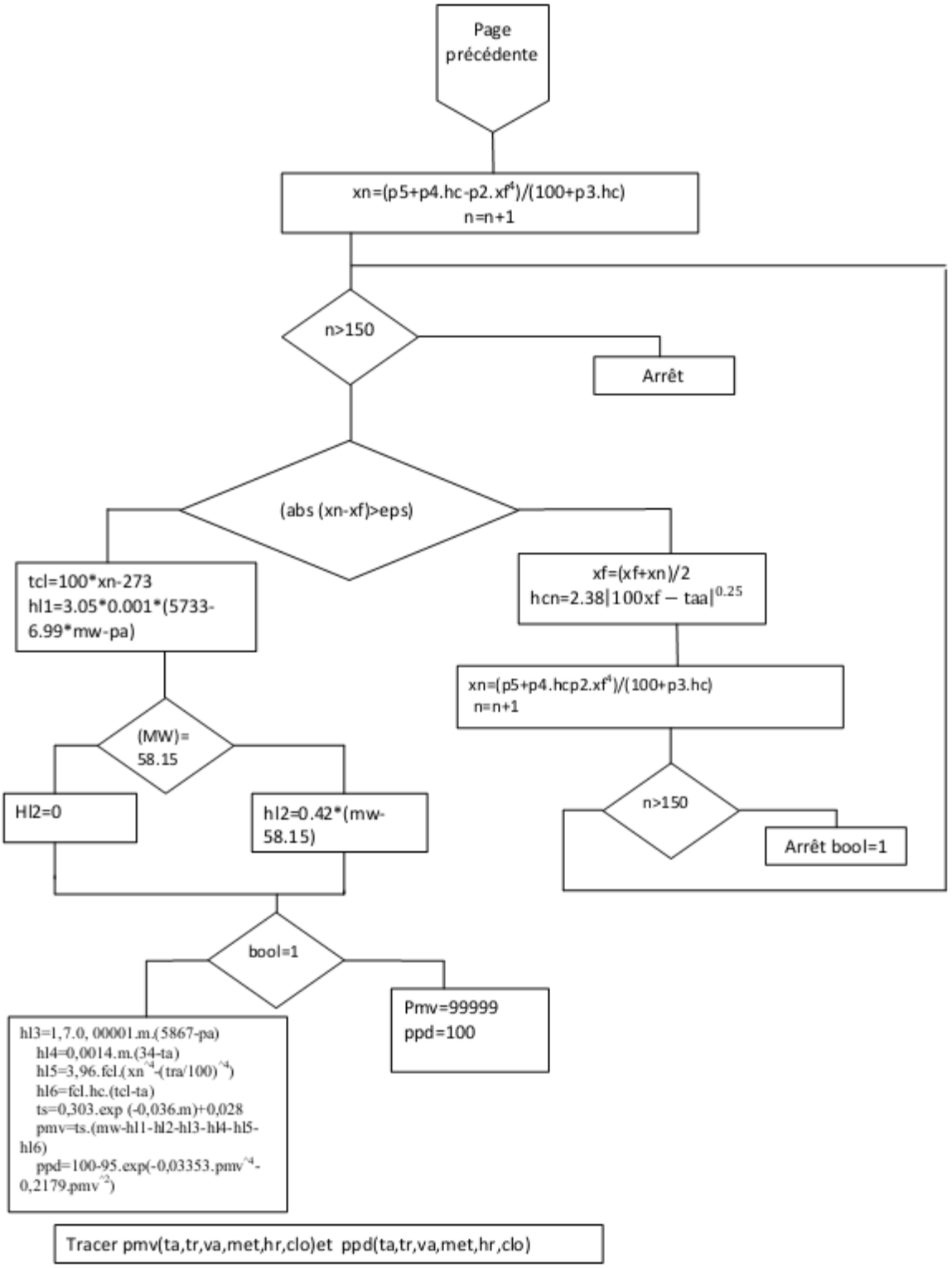
Les normes élaborées jusqu'à présent dans le domaine du confort thermique

Ambiances modérée	ISO 7730	Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local
	ISO 10551	Ergonomie des ambiances thermiques – Evaluation de l'influence des ambiances thermiques l'aide d'échelles de jugements subjectifs (Juin 2001)
	ISO 13732-2	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 2: Contact humain avec des surfaces à température modérée (2001)
Ambiances chaudes	ISO 7243	Ambiances chaudes – Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir), (Février 1994)
	ISO 7933	Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise (Septembre 1997)
	ISO 13732-1	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 1: Surfaces chaudes
Ambiances froides	ISO 11079	Evaluation des ambiances froides -- Détermination de l'isolement requis des vêtements (1993)
	ISO 13732-3	Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces -- Partie 3: Surfaces froides (2005)
Normes de support	ISO 11399	Ergonomie des ambiances thermiques – Principes et application des Normes internationales pertinentes (2001)
	ISO 7726	Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques (2002)
	ISO 9886	Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques (Juin 2001)
	ISO 8996	Ergonomie – Détermination de la production de la chaleur métabolique (Février 1994)
	ISO 9920	Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire (Juin 1995)
	ISO 13731	Ergonomie des ambiances thermiques – Vocabulaire et symboles (Mai 2002)

Tableau :Liste des normes ISO qui traitent des ambiances thermique

ANNEXE N°5 : organigramme du calcule




Page précédente
xn=(p5+p4.hc-p2.xf^4)/(100+p3.hc)
n=n+1
n>150
Arrêt
(abs (xn-xf)>eps)
tcl=100*xn-273
hl1=3.05*0.001*(5733-6.99*mw-pa)
xf=(xf+xn)/2
hcn=2.38|100xf − taa|^0.25
xn=(p5+p4.hcp2.xf^4)/(100+p3.hc)
n=n+1
(MW)= 58.15
HI2=0
hl2=0.42*(mw-58.15)
n>150
Arrêt bool=1
bool=1
Pmv=99999
ppd=100
hl3=1,7.0, 00001.m.(5867-pa)
hl4=0,0014.m.(34-ta)
hl5=3,96.fcl.(xn^4-(tra/100)^4)
hl6=fcl.hc.(tcl-ta)
ts=0,303.exp (-0,036.m)+0,028
pmv=ts.(mw-hl1-hl2-hl3-hl4-hl5-hl6)
ppd=100-95.exp(-0,03353.pmv^4-0,2179.pmv^2)
Tracer pmv(ta,tr,va,met,hr,clo)et ppd(ta,tr,va,met,hr,clo)