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



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention de diplôme de
Master en Génie Climatique
(Option : Énergie et Froid Industriel)

Thème

Évaluation du confort thermique du corps humain dans les ambiances chaudes et froides

Présentée par

CHERGUI Mohamed Amine

HAMDIS Amina

Dirigée par

Mr. Z .TRIKI

Pr. M.N BOUAZIZ

Promotion 2012

Remerciement

Tout d’abord Nous remercions le bon dieu qui nous a aidés à réaliser le présent travail.

Nos remerciements s’adressent également à nos promoteurs Mr TRIKI Zakaria et Pr BOUAZIZ Mohamed Nadjib qui nous ont dirigés. Ils nous ont apporté une grande aide par leurs savoirs.

A chacun des membres du Jury de Thèse :

Monsieur le Dr. BACHEN Mourad chef du jury et chef du département du Génie de la Matière.

Monsieur Dr. BENCHIKOU

Monsieur Dr. ZIRARI

Nous tenons à les remercier vivement pour leurs présences, leurs lectures et les remarques qui ont enrichi ce travail.

Nous exprimons aussi toute notre gratitude à nos deux familles qui nous ont soutenus a tout moment.

On ne pourrait finir sans remercier nos amis de l’université qui nous ont beaucoup aidés.

Résumé

L'homme exige dans la vie moderne le confort thermique qui varie en fonction de plusieurs paramètres. Nous nous intéressons dans ce travail à l´aspect analytique qui permet d´avoir une vision globale du confort thermique. En partant d´une étude bibliographique sur les approches existantes, nous avons conduit une étude pour explorer de plus près les seuils de confort sur la base du modèle de Fanger et ce dans les ambiances thermiques chaudes et froides.

Mots clés : Confort thermique, Ambiances chaudes, Ambiances froides, Indices de Fanger.

Abstract

The man in modern life requires thermal comfort that varies depending on several parameters. We are interested in this work to the analytical aspect that provides a comprehensive view of thermal comfort. Starting from a literature review on existing approaches, we have conducted a study to explore more closely the comfort levels based on the model of Fanger in hot and cold thermal environments.

Keywords: Thermal Comfort, Hot environment, cold environment, Fanger indices.

ملخص

يتطلب الإنسان في الحياة العصرية الراحة الحرارية , التي تتغير وفق العديد من العوامل .لقد اهتممنا في هذا العمل بالجانب التحليلي الذي يسمح بتقديم وجهة نظر شاملة للراحة الحرارية. ابتداء من دراسة بيبليوغرافية على المناهج الموجودة ، أجرينا دراسة لاستكشاف عن قريب مستويات الراحة الحرارية استنادا إلى نموذج فانجر وهذا في الأوساط الحرارية الساخنة والباردة.

كلمات البحث: الراحة الحرارية، وسط دافئ، وسط بارد، مؤشرات فانجر.

Nomenclature

Symbôles

A_c = surface cutanée participant aux échanges thermiques convectifs m^2
A_D = surface de DuBois, surface cutanée totale m^2
$A_{d,cl}$ = surface corporelle de l'homme vêtu m^2
A_e = surface cutanée qui évapore parce qu'elle est mouillée m^2
A_r = surface cutanée participant aux échanges thermique radiatifs m^2
AET = La durée d'exposition admissible
C = Flux de chaleur échangé par convection, W/m²
    C_{res} = par convection respiratoire
c = chaleur massique de l'air = 103 J/kg K
Cp = chaleur spécifique du corps, kJ/kg.K
DR = le gêne par courant d'air, %
D_{max} = perte hydrique cumulé
E = Flux de chaleur latente échangé par évaporation, W/m²
E_{max} = flux de chaleur maximum possible
E_{res} = flux de chaleur par évaporation respiratoire
E_{req} = flux de chaleur requis pour le confort
E_{sk} = flux de chaleur totale à la surface de la peau
E_{dif} = flux de chaleur par diffusion à travers la peau
E_p = flux de chaleur prédit
$E_{rsw,req}$ = débit sudoral nécessaire pour le confort
ET* = Température effective, °C
F_{cl} = facteur de modulation des échanges de chaleur sèche lié à l'isolement vestimentaire
F_{pcl} = facteur de modulation des échanges de chaleur sensible lié à l'isolement vestimentaire
f_{cl} = Facteur d'habillement,
FC_f = fréquence cardiaque à l'équilibre, bat/m
H = la chaleur à dissipée, W/m² de peau
HR = humidité relative, %
h = Coefficient d'échange de chaleur sensible, W/ (m².K)
    h_c = par convection à la surface
    h_r = par rayonnement à la surface
h_{co} = coefficient d'échange de chaleur par convection naturelle
h_e = Coefficient d'échange de chaleur par évaporation, W/ (m².kPa)
HR = Humidité relative, %
I_t = isolement thermique total $K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$ ou clo
I_{cl} = isolement thermique du vêtement $K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
    I_{cle} = effective
    I_{cli} = élémentaire
I_a = isolement thermique de la couche d'air $K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$
I_{cls} = vêture standardisé, clo
i_m = indice de perméabilité du vêtement
K = Flux de chaleur échangé par conduction, W/m²
k = Conductivité tissulaire, W/ (m².K) [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
M_w = métabolisme d'activité
M_B = métabolisme basal
M_p = composante posturale
M_M = composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse
m = masse corporelle, kg
$\dot{M}_{a_r}$ = ventilation pulmonaire, kg/s
nsc = efficacité de sudation, [%]
Pa = Pression de vapeur d'eau, kPa
$P_{sk,s}$ = saturée à t_{sk}
Pa_{H2O} = pression partielle de vapeur d'eau ambiante
P_{exp} = pression de vapeur d'eau dans l'air expiré, kPa
P = poids, kg
Q = Flux de chaleur échangé par le corps humain, W/m²
Q_{sk} = Flux de chaleur échangé à la surface cutanée
Q_{res} = Flux de chaleur échangé par voie respiratoire
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
r = l'efficacité évaporatoire de la sudation chez l'homme
Ra = résistance à la vapeur à la limite de la couche d'air
$R_{e,cl}$ = résistance à l'évaporation des vêtements, (m².kPa)/W
Rcl = Resistance thermique vestimentaire, m² K/ w
R_s = charge solaire, W/m²
S = taux de chaleur stocké, ou bilan thermique W/m²
S_{sk} = taux de chaleur stockée dans la peau, W/m²
S_{cr} = taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m²
SET = Température effective standard, °C
SW_{req} = débit sudoral requis
SW_p = prédit
T = taille, m
T = Température, °C
T_a = air ambiant
T_{cl} = à la surface externe du vêtement
T_{cr} = interne (corps)
T_{ch} = de refroidissement
T_{ex} = extérieur
T_{exp} = air expirée
T_{eq} = équivalente
T_g = globe noire
T_r = moyenne de rayonnement
T_{sk} = cutanée
$T_{sk,req}$ = requise pour le confort
T_{hn} = humide naturelle
T_o = opérative
T_{wc} = indice de refroidissement éolien, °C
t = temps, s
Tu = Intensité locale de turbulence, %

Va = vitesse de l'air, m/s
Var = vitesse de l'air résultant du climat et des mouvements à l'intérieur de ce climat
W = Energie utilisée par le travail externe, W/m²
W_{req} = La mouillure cutanée requise
w_{ex} = 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
α = fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau
θ = temps, s
σ = constante de Stefan-Boltzmann (5, 67 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)
ε_{sk} = émissivité cutanée
ω = Mouillure cutanée

Abrévations

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

AFNOR = Association Française de Normalisation

ACGIH = American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ISO = International Organization for Standardization

PMV = Vote moyen prévisible (predict mean vote)

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

WBGT = Indice «Wet Bulb Globe Temperature»

PSH = Indice « Predicted Heat Strain »

WCI = wind chill index

Liste des figures

Figure 1. 1 Températures corporelles, effets de l'effort et de la chaleur[5] _____ 6
Figure 1. 2 principes de la thermorégulation végétative, comportementale et technologique [7] _____ 7
Figure 1. 3 Activité électrique des récepteurs thermique en réponse à la température (schéma de principe) [5] _____ 8
Figure 1. 4 Sensations exprimées sur le bras en fonction de la température, compte tenu de la température d'adaptation préalable) [5] _____ 10
Figure 1. 5 Représentation des modalités d'échanges thermiques entre l'organisme (Constitué d'un noyau central et d'une enveloppe périphérique) et le milieu ambiant _____ 14
Figure 1. 6 Equilibre entre les apports et les pertes de chaleur [11] _____ 19
Figure 2. 1 comment le corps humain réagit dans le froid 26
Figure 2. 2 La relation globale entre une personne et son environnement [7]. 35
Figure 2. 3 Variation de la température corporelle, de la fréquence cardiaque et du débit sudoral d'un groupe d'homme pendant la phase d'acclimatement (d'après Parson1993) [18] . 38
Figure3. 1 L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement [7] 40
Figure3. 2 niveaux de mouillure et intensité de l'astreinte thermique [30] 52
Figure3. 3 Les modèles simples du comportement thermique des vêtements. (à gauche le modèle à un seul paramètre : l'isolement thermique et à droite le modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation) 56
Figure 4. 1 Pourcentage prédit d'insatisfaits(PPD) en fonction du 65
Figure 4. 2 Variation de PMV et PPD en fonction du métabolisme 68
Figure 4. 3 Variation de PMV et PPD en fonction du Icl 69
Figure 4. 4 Variation de PMV et PPD en fonction de la vitesse de l air 70
Figure 4. 5 Variation de PMV et PPD en fonction du Température ambiante (Ta)..... 71
Figure 4. 6 Variation de PMV et PPD en fonction du La température moyenne radiante (Icl=0.7clo, M=1.2met, w=0, ta=28°C, HR=50 %) 72
Figure 4. 7 Variation de PMV et PPD en fonction du degré hygrométrique de l'air..... 73

Liste des tableaux

Tableau2. 1 Risques pour la santé d'une exposition à la chaleur : symptômes et niveaux de gravitante [12] 25
Tableau2. 2 Coup de chaleur [12] 26
Tableau2. 3 Délai d'apparition de gelure à la main en secondes(s) pour un contact avec un corps métallique à différentes températures en (°C). [13] 27
Tableau2. 4 Gelures superficielles [13] 28
Tableau2. 5 Gelures profonde [13] 29
Tableau2. 6 les échelles de la sensation thermique 33
Tableau2. 7 Echelles de jugements subjectifs sur les conditions thermiques [AFNOR, 2001]. 36
Tableau 3. 1 Niveaux de détermination du métabolisme énergétique [ISO 8996] 44
Tableau 3. 2 Niveaux de détermination du métabolisme énergétique [ISO 8996] 45
Tableau 3. 3 Isolements thermiques intrinsèques d'ensembles vestimentaires caractéristiques lcl (en m-. K/W). [4]..... 58
Tableau 3. 4 Isolements thermiques intrinsèques d'éléments vestimentaires lcil 59
Tableau 3. 5 détermination de Fpcl et Re,cl selon ISO 7933, avec variation du vent Va [22] 60

Sommaire

Introduction 1

Chapitre I : Notions sur le confort thermique 4

1.1 L'homéothermie 5

1.2 L'aspect physiologique : La thermorégulation 5

1.2.1 La thermorégulation végétative 6

1.2.1.1 Les thermorécepteurs 8

1.2.1.2 Le contrôleur 10

1.2.1.3 Perception : expression des sensations 11

1.2.1.4 Les actionneurs 11

1.2.2 La thermorégulation comportementale 12

1.3 Variation physiologique de la température 12

1.3.1 Rythme nycthéméral 12

1.3.2 Progestérone 13

1.3.3 Age 13

1.3.4 Activité physique 13

1.3.5 Emotions 13

1.4 Echanges thermiques 14

1.4.1 Radiation (R) 15

1.4.2 Convection (Cv) 15

1.4.3 Conduction (Cd) 15

1.4.4 Evaporation (E) 15

1.5 Equilibre des échanges thermiques 15

1.5.1 Apports de chaleur 16

1.5.1.1 Thermogenèse 16

1.5.1.2 Apports extérieurs de chaleur 16

1.5.2 Pertes de chaleur : Thermolyse 17

1.5.2.1 Pertes par radiation 17

1.5.2.2 Pertes par convection et conduction 17

1.5.2.3 Pertes par évaporation 17

Chapitre II: Méthodes d'analyses des ambiances chaudes et froides 20

2.1. Introduction 21

2.2. Lute physiologique contre les ambiances chaude et froides 21

2.2.1. Réponses de l'organisme au froid 21

2.2.2. Réponses de l'organisme à la chaleur 23
2.3. Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides 24
2.3.1. Ambiances chaudes 24
2.3.2. Ambiance froides 26
2.4. Sensation thermique 32
2.5. Confort thermique 33
2.6. Neutralité thermique 36
2.7. L'acclimatement 36
Chapitre III : Bilan énergétique de l'homme dans Ses échanges avec l'environnement 39
3.1. L'aspect physique : Bilan thermique 40
3.2. Production de chaleur métabolique 42
3.3. Echange de chaleur sèche (chaleur sensible) 46
3.3.1. Effet dû à la conduction 46
3.3.2. Effet dû à la convection 47
3.3.3. Effet dû au rayonnement 48
3.4. Echanges de chaleur latente due à l'humidité 51
3.5. Les échanges de chaleur par respiration 53
3.6. Isolement vestimentaire 54
3.6.1 L'unité clo 56
3.6.2 Resistance thermique vestimentaire 57
3.6.3 Resistance vestimentaire à l'évaporation 58
Chapitre IV : Modélisation du confort thermique 62
4.2. Modèle de Fanger 63
4.3. Influence des différents paramètres 68
4.3.1. Effet métabolique 68
4.3.2. Effet de l'isolement vestimentaire (clo) 69
4.3.3. La vitesse relative de l'air 70
4.3.4. Effet de la température ambiante 71
4.3.5. Effet de la température moyenne radiante 72
4.3.6. L'effet du degré hygrométrique de l'air 73
Conclusion 75
Références Bibliographiques 77

Introduction

Le confort thermique a été défini par Hensen [1] comme "un état dans lequel il n'existe pas de conduite d'impulsions pour corriger l'environnement par le comportement". La American Society of Heating, refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) l'a défini comme "l'état d'esprit dans lequel la satisfaction est exprimée avec l'environnement thermique''. En tant que tel, il sera influencé par l'humeur individuelle, la culture et autres facteurs organisationnels et sociaux. Basé sur les définitions ci-dessus, le confort n'est pas une condition d'état, mais plutôt un état d'esprit. La définition du confort thermique laisse la porte ouverte à ce que l'on entend par état d'esprit ou de la satisfaction, mais il souligne à juste titre que le jugement de confort est un processus cognitif impliquant un grand nombre d'entrées influencés par des facteurs physique, physiologique, psychologique et d'autres.

Les Sensations thermiques sont différentes entre les gens, même dans le même environnement. Même si les capteurs rendent le même résultat quelle que soit la position géographique où une voie de mesure est prise, ce n'est pas le cas pour les personnes. En effet, les personnes résidants dans des espaces très similaires, soumis au même climat, et appartenant à une culture commune, émettent des avis très différents sur le confort thermique due à la combinaison d'un grand nombre de facteurs qui influent sur la perception des êtres humains.

Le diagnostic est donc un outil indispensable pour parvenir à un ensemble d'évaluation des paramètres de l'étude. Classiquement, l'inconfort thermique est considérée comme une condition subjective tandis que la sensation thermique est une sensation objective.la Satisfaction à l'égard de l'environnement thermique est une réponse complexe subjective à plusieurs interaction et à des variables moins tangibles. En d'autres termes, il n'y a vraiment pas de norme absolue pour le confort thermique. En général, le confort se produit lorsque la température du corps est conservée dans une gamme étroite, l'humidité cutanée est faible, et l'effort physiologique de la régulation est minimisé. Le confort dépend aussi du comportement des actions telles que l'habillement, l'activité, le changement de la posture ou l'emplacement, l'ouverture d'une fenêtre ou d'une plainte.

En 1962, Macpherson a défini les six facteurs suivants comme ceux qui affectent la sensation thermique : quatre variables physiques (température de l'air, vitesse de l'air, humidité relative, la température radiante moyenne), et deux variables personnels (isolation des vêtements et le niveau d'activité, c'est à dire le taux de (métabolisme) [2].

Les normes de confort thermique déterminent la consommation d'énergie par les systèmes environnementaux d'un bâtiment et, par conséquent, elles jouent un rôle important dans la durabilité des bâtiments. Cette énergie souvent implique la combustion des combustibles fossiles, contribuant à l'émission de dioxyde de carbone et le changement climatique. Le confort thermique est également un paramètre clé pour un milieu de travail sain et productif.

Avec la nécessité urgente de réduire le coût économique et environnemental de la consommation d'énergie, des enquêtes couvrant de nombreux aspects liés au confort thermique dans les environnements intérieurs ont attiré les auteurs depuis des décennies. Il s'agit notamment de l'établissement des modèles et des indices, la réalisation d'expériences dans le climat des chambres et des enquêtes de terrain, en établissant des normes de confort thermique et des méthodes d'évaluation, etc. La plupart des conclusions importantes sont maintenant la base des normes national et international. Ils se sont concentrés sur des corrélations pour les critères de l'isolation thermique du confort ou sur des questions sur le syndrome du bâtiment malsain. Pour déterminer les conditions thermiques appropriés, les praticiens se réfèrent aux normes. Les normes définissent les plages de température qui devraient aboutir à la satisfaction thermique pour au moins 80% des occupants dans un espace. Les normes internationales de confort telles que les normes ASHRAE et l'organisation des normes internationales (ISO) sont presque exclusivement fondées sur des analyses théoriques d'échange de chaleur humaine réalisée dans les régions au climat de latitude moyenne en Amérique du Nord et en nord de l'Europe.

Elles étaient basées principalement sur des modèles mathématiques développés par Fanger à partir des expériences particulières de chambre à température contrôlée. En outre, ces normes sont adaptées pour des conditions thermiques uniformément statiques et sont basées sur le principe que, indépendamment de la race, l'âge et le sexe ; les êtres humains sont considérés être à l'aise dans une gamme étroite, bien défini, de conditions thermiques

De DEAR et Brager ont noté que les normes actuelles du confort thermique et les modèles, qui les sous-tendent, prétendent être également applicable à tous les types de bâtiment, à la ventilation, à la structure d'occupation et à la zone climatique. Les normes de confort thermique prescrites par la norme ISO 7730 sont les premières qui ont été utilisé sur une base dans le monde entier [3].

L'objectif de ce travail est de développer un modèle de simulation pouvant estimer les seuils de confort à partir du modèle de Fanger afin d'étudier l'effet des différents paramètres

pouvant influencer le confort thermique de l'être humain dans les ambiances chaudes et froides.

Ainsi, après avoir présenté la problématique de ce travail, nous donnerons des notions de base sur le confort thermique et la thermorégulation dans le premier chapitre. Le deuxième explique le bilan énergétique de l'être humain dans ses échanges avec l'environnement. Le troisième chapitre présente les différentes méthodes d'analyse du confort dans les ambiances climatiques. Dans le quatrième chapitre un modèle de simulation est développer sur la base du célèbre modèle du Fanger et les résultats ainsi obtenus sont discutées et commentées. Enfin, ce travail est clôturé par une conclusion générale et des recommandations.

Chapitre I : Notions sur le confort thermique

1.1 L'homéothermie

De même que la majorité des mammifères, l'homme est un animal endotherme, c'est-à-dire que l'essentiel de son contenu thermique provient de l'oxydation des aliments qu'il intègre. Cette caractéristique a pour conséquence une faible dépendance de son contenu thermique. Cette relative indépendance a été observée par les premiers physiologistes qui ont qualifié l'homme d'homéotherme, sa température centrale reste constante quelles que soient les variations du milieu extérieur. Chez l'être humain, des valeurs comprises entre 36°C et 37,5°C correspondent aux conditions optimales pour le bon fonctionnement de l'organisme. Par opposition aux animaux poïkilothermes, ou plus précisément ectothermes, c'est-à-dire qui voient leur contenu thermique dépendre essentiellement de l'environnement thermique. [4]
La stabilité de la température corporelle n'est vraie que pour les organes profonds : cerveau, viscères, foie, reins, etc. les couches superficielles de l'organisme sont fortement dépendantes des conditions thermiques ambiantes. L'homéothermie des organes profonds est un garant de leur intégrité fonctionnelle physique et psycho-sensori-motrice.

1.2 L'aspect physiologique : La thermorégulation

L'Homme est une machine thermique, pour assurer ses fonctions vitales, dégrade des substrats énergétiques en permanence, en consommant de l'oxygène, en produisant du CO2, de l'eau métabolique et en dégageant de l'énergie. Même au repos, une centaine de watts sont produits en permanence.

Le maintien de la vie au niveau cellulaire, le fonctionnement des différents organes et l'activité musculaire nécessitent une dépense énergétique permanente, le métabolisme. Cette énergie dégagée essentiellement sous forme de chaleur se propage de l'intérieur vers l'extérieur de l'organisme, véhiculé par la conduction tissulaire et surtout par la convection sanguine. La répartition énergétique et les coefficients locaux d'échange de chaleur font que, globalement, le noyau central est à une température de l'ordre de 37 °C, alors que la surface périphérique (peau) est comprise entre 29-30 °C aux pieds et 34-35 °C au niveau de la tête. Ces températures sont susceptibles de varier, au quotidien, en réponse à des perturbations internes et externes, le schéma de la figure 1.1 rend compte de des températures au repos a la thermoneutralité [5].

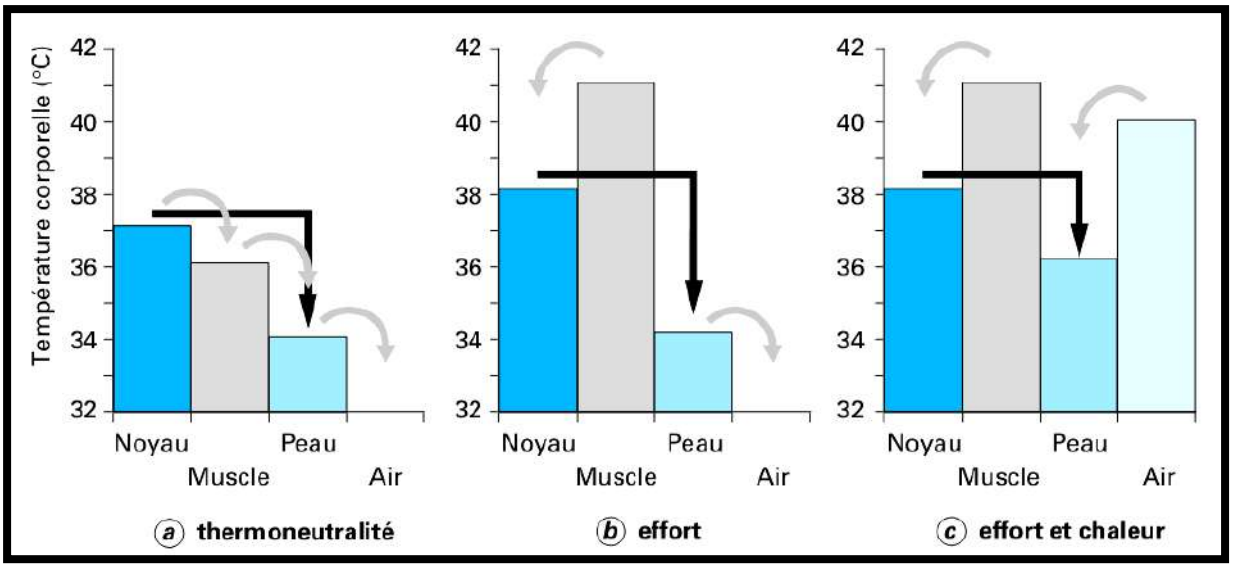


Figure 1. 1 Températures corporelles, effets de l'effort et de la chaleur[5]

La température interne varie essentiellement en fonction de l'activité de l'individu. Les déplacements et les activités musculaires dégagent de la chaleur dans les muscles ; cette chaleur est véhiculée par le sang, elle est donc distribuée centralement et modifie la température interne.

La température externe n'est pas affectée par l'activité métabolique ; elle dépend exclusivement des variations des paramètres extérieurs (température d'air, ou de rayonnement, vitesse d'air, vêtement). L'homme étant homéotherme, il dispose d'un système dynamique de thermorégulation qui permet de contrôler et réguler les échanges de chaleur interne et externe du corps humain, dit système régulé passif, afin de maintenir les températures du corps à leurs valeurs de consigne. Deux types de thermorégulation peuvent être distinguées : une thermorégulation physiologique végétative dont le but est de garder la température interne du corps à l'alentour de 37°C, et une thermorégulation comportementale, consciente ou inconsciente, qui permettent d'anticiper les changements rapides dans l'environnement afin de limiter les réactions physiologiques perçues comme désagréables. La Figure 1.2 explique, de façon simplifiée, le mode de fonctionnement du système de régulation dans le milieu bâti.

1.2.1 La thermorégulation végétative

Le système de thermorégulation végétative assure la régulation dynamique de la température du corps humain, système passif régulé, qui est sujet aux échanges de chaleur et de masse. Les variables contrôlées sont la température interne et la température cutanée. La température interne est maintenue à une valeur proche de 37 °C, mais elle peut varier entre

36°C la nuit et 38-39 °C lors de certains efforts prolongés. La température moyenne de peau est voisine de 34 °C en condition standard. Mais contrairement à la température interne qui varie peu (2 à 3 °C), les températures cutanées sont sensibles à l'environnement thermique : les variations de 10 °C sont possibles en fonction des conditions externes [6].

Le principe de régulation consiste à comparer des signaux en provenance des capteurs internes et cutanés à des valeurs de référence, et d'ordonner des actions atténuantes selon les écarts de réglage détectés. Le siège de contrôle est le centre hypothalamique vers lequel convergent toutes les informations sensorielles qu'il intègre pour déterminer l'amplitude des commandes à envoyer vers les organes effecteurs. Le système de thermorégulation peut être décomposé ainsi en trois parties : les thermorécepteurs (capteurs), le contrôleur et les actionneurs [6]

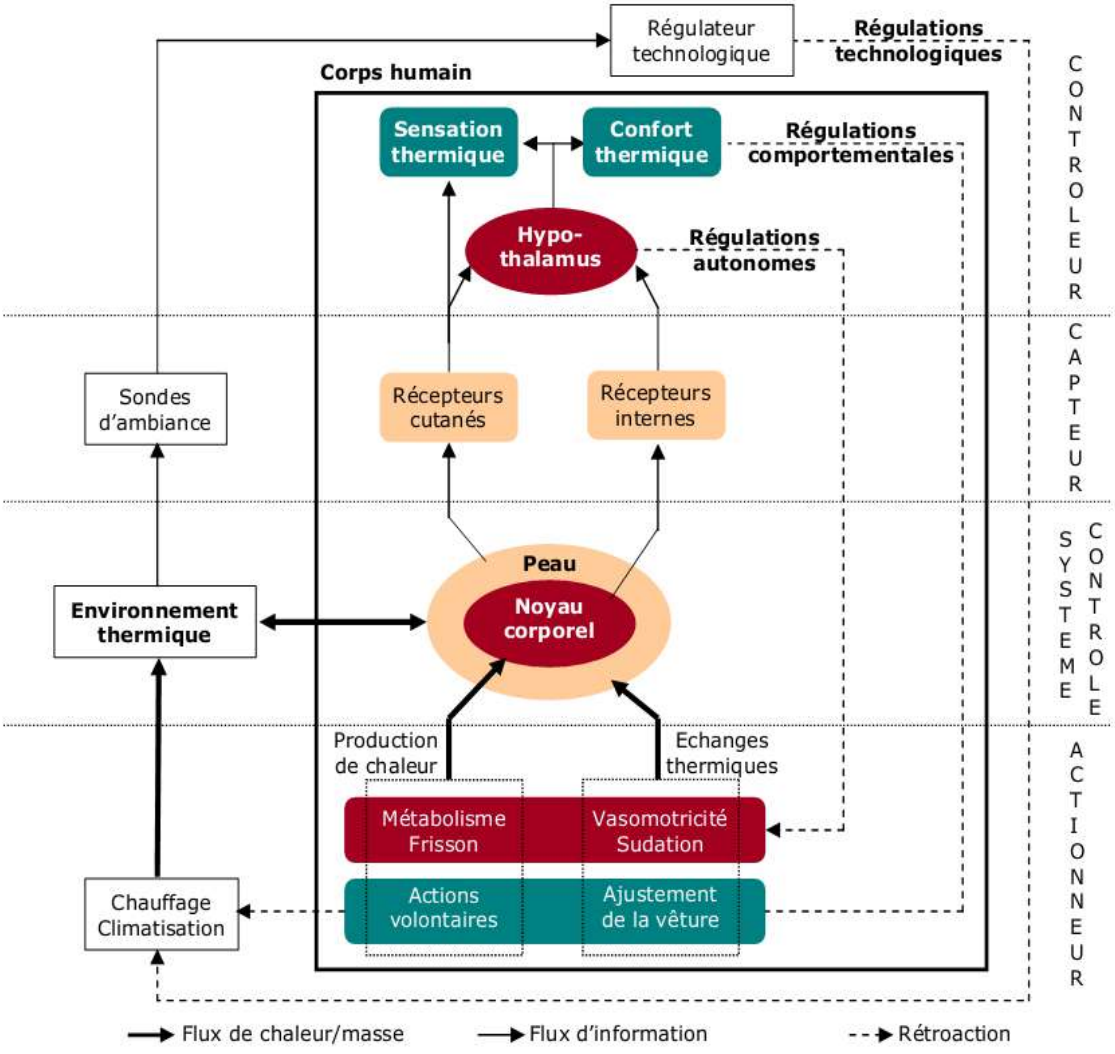


Figure 1. 2 principes de la thermorégulation végétative, comportementale et technologique [7]

1.2.1.1 Les thermorécepteurs

Des thermorécepteurs ont été identifiés dans la peau et à l'intérieur du corps. Les thermorécepteurs internes, dits centraux, informent le système de régulation des variations de la température interne. Les thermorécepteurs cutanées sont des terminaisons nerveuses libres et couvrent largement la surface de l'épiderme. Deux types de thermorécepteurs sont distingués : ceux sensibles au chaud et ceux sensibles au froid. Les détecteurs chauds sont sensibles à des élévations de température de 0.001 °C/s (3.6 °C/h), les détecteurs froids sont sensibles à une baisse de 0.004 °C/s (14 °C/h). Dans la peau, les fibres sensibles au froid sont plus nombreuses et plus superficielles que celles sensibles au chaud [8].

Les récepteurs stimulés par la température de peau ou sa variation donnent naissance à des informations dont la fréquence est proportionnelle à la température. Ainsi un récepteur au froid situé dans une région où la température de peau s'élève verra son activité électrique diminuer et inversement pour un récepteur au chaud (figure1.3). Mais ces récepteurs sont également sensibles à la vitesse de variation de la température : si donc la température de la peau varie lentement, seule l'information liée à l'aspect statique (niveau absolu de la température) sera transmise. Au contraire, si la température varie plus rapidement (grossièrement > 0.02 °C/s), les récepteurs font preuve d'une activité dynamique rendant l'individu plus rapidement et plus intensément sensible au changement thermique [9].

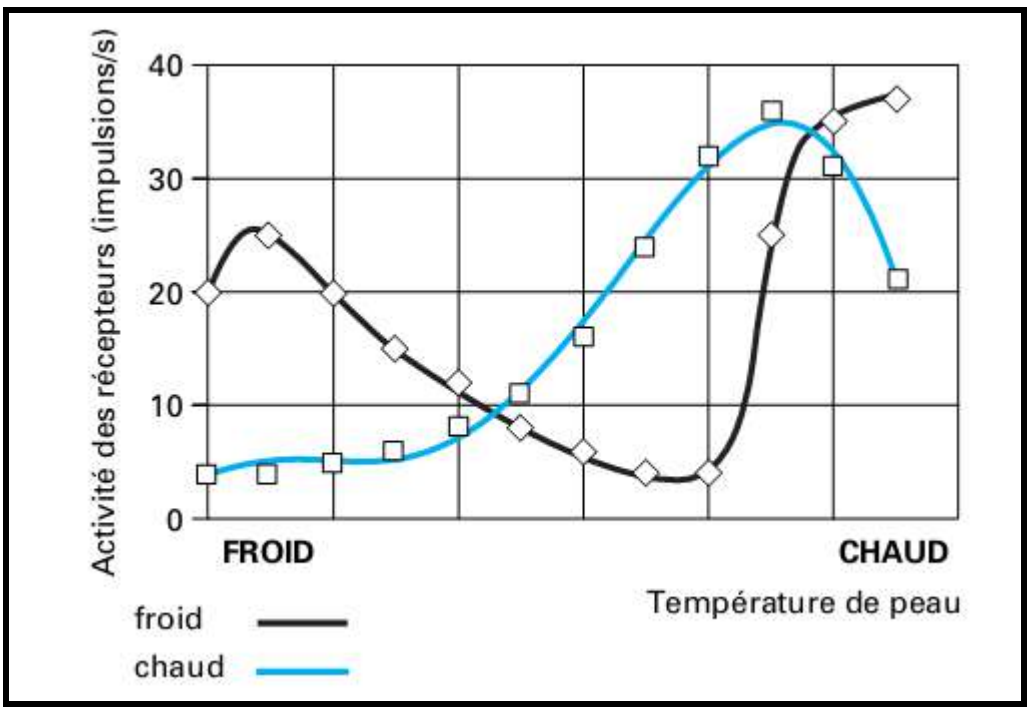


Figure 1. 3 Activité électrique des récepteurs thermique en réponse à la température (schéma de principe) [5]

En effet, ainsi que l'illustre la figure 1.3, les récepteurs au chaud et au froid sont actifs simultanément dans la plage au voisinage de la thermo neutralité. Quand la température de peau varie, dans un sens ou dans l'autre, certains récepteurs sont alors moins actifs alors que les autres le sont plus. À une certaine température de peau (33-34°C chez l'Homme), les activités des récepteurs au chaud et au froid sont de même amplitude, ce qui explique la sensation de ni chaud, ni froid. En deçà et au-delà, c'est la combinaison de tous les influx qui est interprétée par les centres supérieurs comme un signal chaud ou un signal froid (notons l'existence d'une sensation paradoxale froide pour des températures de peau élevées, du fait de la courbe de réponse des récepteurs sensibles au froid).

Enfin, les thermorécepteurs sont capables d'adaptation, c'est-à-dire que leur activité s'estompe avec le temps alors que le stimulus perdure. Cela a pour conséquence que la même exposition à un stimulus donné engendrera des activités (donc des sensations) différentes selon la température d'adaptation initiale. Pour s'en convaincre, il suffit de plonger la main gauche dans une bassine d'eau à 26°C et la main droite dans une eau à 38°C pendant une minute. Ensuite, le fait de plonger simultanément les mains dans une eau à 32°C procurera, même après la courte phase transitoire, des sensations différentes selon la température initiale (température d'adaptation) de chaque main. Ces phénomènes d'adaptation expliquent pourquoi des jugements différents peuvent être obtenus pour des mêmes niveaux de température cutanée ou inversement. Ce sont ces processus complexes qui « trahissent » l'individu quand il dit (en fonction du fait qu'il vient d'un autre climat) qu'il perçoit quelque chose de plus chaud ou de moins froid, alors qu'en réalité le climat est plutôt neutre. Il n'en reste pas moins vrai que la température reste toujours la grandeur d'entrée du système, mais que son impact sensoriel dépend aussi de la température initiale.

La figure 1.4 montre que la sensation « neutre » peut être obtenue pour différents niveaux de température de surface en fonction de leur état initial d'adaptation.

L'impact de ces adaptations sensorielles sur l'appréciation perceptive est d'autant plus grand que la surface cutanée exposée est grande, d'où les observations parfois divergentes entre des personnes plus ou moins couvertes.

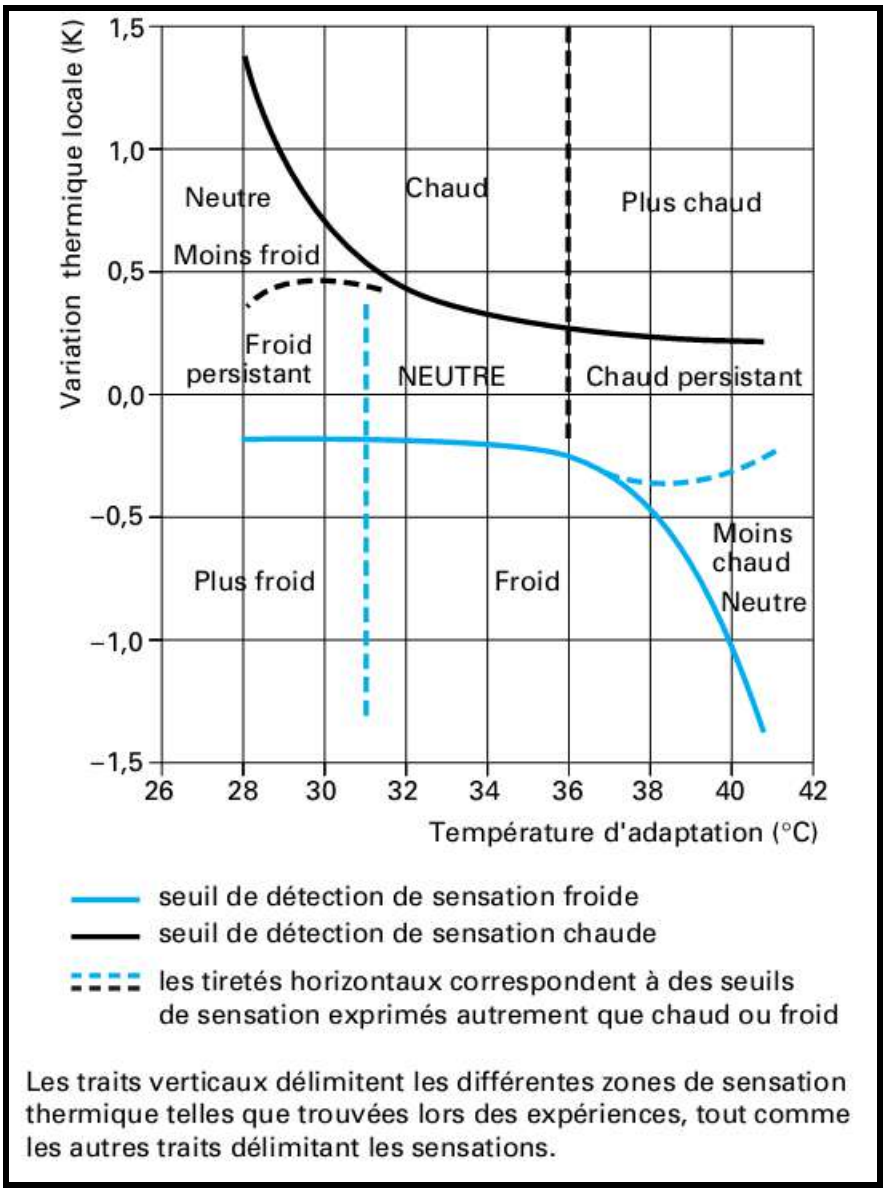


Figure 1. 4 Sensations exprimées sur le bras en fonction de la température, compte tenu de la température d'adaptation préalable) [5]

1.2.1.2 Le contrôleur

Les messages thermo sensoriels à l'origine de l'activité des récepteurs informent à la fois le centre hypothalamique où toutes les informations fusionnent et les aires sensibles corticales où les spécificités demeurent. Cette convergence des signaux au niveau hypothalamique explique pourquoi on ne réagit pas physiologiquement, uniquement là où le stimulus existe, mais globalement. La projection du signal local dans les aires sensibles explique pourquoi on peut sentir une zone froide ou chaude localement sans pour autant induire une réponse à caractère globale [6]. L'hypothalamus est divisé en deux zones : une zone antérieure qui assure la défense contre la chaleur et une zone postérieure qui assure la défense contre le froid.

Si les températures corporelles s'écartent de leurs valeurs de référence, il établit un signal d'erreur et envoie dans les différentes parties du corps une commande dont l'intensité est proportionnelle à ce signa. Si le signal d'écart est positif (le corps se réchauffe), il déclenche les mécanismes de lutte contre la chaleur, et s'il est négatif, (le corps se refroidit) les mécanismes de lutte contre le froid sont mis en œuvre.

1.2.1.3 Perception : expression des sensations

À une température donnée, il faut imaginer que l'ensemble de nos capteurs informant l'hypothalamus (aire pré optique) donne naissance à une information globale permettant de rendre compte, en une seule formulation, de l'état thermique de l'individu : c'est dire que l'intégration centrale est complexe. Néanmoins, il est possible de différencier l'état interne de l'état externe. Aussi, une personne ayant effectué une activité musculaire assez intense pour avoir augmenté sa température interne sera capable d'éprouver des sensations du type : « j'ai chaud », reflet de l'élévation thermique centrale, mais « l'environnement est froid ». De telles expressions sont possibles parce que la différenciation existe entre noyau et périphérie. De même, un individu très chaudement vêtu dans un air à 15°C pourra dire « qu'il a chaud » dans un environnement qu'il juge « froid » : cela parce que la perception globale naît de l'aspect sensoriel intégré, alors que la perception sur l'ambiance se fait par des moyens moins globaux que sont, dans ce cas, les zones découvertes (mains, tête, pieds mais aussi voies respiratoires, muqueuses) [5].

1.2.1.4 Les actionneurs

Plusieurs types d'actions peuvent être mis en jeu pour assurer la régulation de la température du corps [10]. Face au froid, la vasoconstriction (diminution du diamètre des vaisseaux sanguins) est mise en œuvre. Elle permet de réduire le débit sanguin vers la peau réduisant ainsi la température cutanée et par conséquent les échanges thermiques avec le milieu extérieur. Si le froid persiste, l'organisme accroît sa production de chaleur interne par des contractions musculaires (les frissons). Les mêmes types de réactions sont observés face au chaud. Ainsi, face à une température externe élevée, la vasodilatation est d'abord déclenchée (augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins). Elle accroît le débit sanguin vers la peau et augmente la température cutanée favorisant les échanges thermiques avec l'extérieur. Ensuite, le corps procède à la sudation via les glandes sudorales qui sécrètent de la sueur qui refroidit le corps par évaporation.

Alors que la vasomotricité peut être déclenchée en même temps que les contractions musculaires et l'activité des glandes sudorales, ces deux dernières fonctions sont exclusives.

1.2.2 La thermorégulation comportementale

Le système de thermorégulation dispose non seulement d'une régulation végétative, il peut aussi développer des adaptations comportementales qui peuvent affecter considérablement les échanges thermiques avec l'environnement ainsi que l'état thermique du corps humain. Cette thermorégulation comportementale permet de limiter les réactions physiologiques perçues comme désagréable. Ainsi le corps humain peut anticiper les changements dans son environnement thermique par des ajustements comportementaux. Les informations en provenance des différents récepteurs intégrées au niveau cortical, lui permettent de réagir consciemment et de diriger ses comportements pour lutter efficacement contre le froid ou la chaleur : il peut réduire ou augmenter les surfaces exposées au milieu extérieur en changeant sa posture ou sa vêture, il peut contrôler la production de la chaleur en modifiant son activité physique. Certaines de ses réponses adaptatives peuvent devenir involontaires à long terme (acclimatation adaptative) [9].

Complémentaire à l'adaptation comportementale, la régulation technologique est considérée aussi comme un moyen efficace de thermorégulation à travers la conception des constructions offrant des environnements internes adaptés à l'occupation humaine.

L'architecture climatique en est un exemple qui a su adapter les constructions aux conditions climatiques du site pour créer des environnements thermiques favorables à l'occupation.

1.3 Variation physiologique de la température

Bien que relativement stable, la température centrale subit des variations secondaires a différents facteurs. [11]

1.3.1 Rythme nycthéméral

La température centrale augmente en cours de journée pour atteindre son maximum (de plus 0,5 °C) autour de 17 heures. Cette augmentation s'explique par la production de chaleur due à l'activité musculaire. La température minimale s'observe entre 3 et 5 heures du matin, du fait du repos physique et de l'influence du sommeil lent. En effet, les phases de sommeil lent s'accompagnent d'une diminution de la température de référence. Il s'agit de la température vers laquelle tendent les mécanismes de thermorégulation.

1.3.2 Progestérone

Cette hormone agit sur les centres hypothalamiques thermorégulateurs pour aboutir à une augmentation de 0,5°C de la température corporelle. Chez la femme, on observe donc une élévation de la température corporelle avec un pic au moment de l'ovulation, suivi d'un décalage thermique appelé « plateau thermique » au cours de la deuxième partie du cycle ovarien. L'étude de cette courbe ménothermique (température au cours du cycle menstruel) permet de déterminer la date de l'ovulation.

1.3.3 Age

Les mécanismes de thermorégulation diffèrent aux âges extrêmes de la vie.

En raison de l'immaturité du système nerveux central du nouveau-né, la température de ce dernier s'avère très irrégulière. Les mécanismes de thermorégulation manquent d'efficacité par immaturité du système nerveux central, en particulier des centres hypothalamiques thermorégulateurs.

Chez le sujet âgé, la température corporelle diminue par rapport aux sujets plus jeunes, par le bais de différents mécanismes :

- la production de chaleur s'avère en général moindre que pour un sujet plus jeune en raison d'une la diminution de l'activité physique,
- il existe physiologiquement chez le sujet âgé une diminution du débit sanguin entraînant une diminution de la capacité de déperdition de chaleur,
- on note aussi une diminution de l'activité nerveuse sympathique cutanée mise en jeu lors de l'exposition à la chaleur, en comparaison à des sujets plus jeunes (diminution de 61%).

1.3.4 Activité physique

L'énergie musculaire est libérée pour 75% sous forme de chaleur, le quart restant étant converti en travail. En raison de cette production de chaleur, l'organisme doit ajuster ses pertes de chaleur en conséquence, en fonction des conditions ambiantes.

1.3.5 Emotions

Les stimuli émotionnels peuvent entraîner une augmentation de la température de l'organisme allant parfois jusqu'à +2°C, par stimulation du l'activité orthosympathique.

1.4 Echanges thermiques

Pour mieux comprendre les mécanismes intervenant dans le maintien d'une température corporelle constante chez l'homme, nous pouvons utiliser un modèle bicompartimental comportant : [11]

- un noyau central constitue des organes thoraciques, des viscères abdominaux, du système nerveux central et des muscles squelettiques.
- une enveloppe périphérique représentée par la peau et le tissu sous-cutané.

Comme nous l'avons vu, la température du noyau central reste relativement stable autour de 37°C. En revanche, la température de l'enveloppe peut varier de façon importante, d'une amplitude allant de 20°C à 40°C sans conséquence néfaste pour l'organisme.
En général, la température périphérique est inferieure à la température centrale. C'est l'existence de ce gradient qui permet une perte de chaleur de la profondeur à la surface du corps, puis de celle-ci vers le milieu ambiant. En fonction des conditions extérieures notamment en cas de forte chaleur, le gradient peut s'inverser.
Les échanges thermiques de l'organisme avec le milieu ambiant ont lieu selon différentes formes, représentées à la figure 1.5.

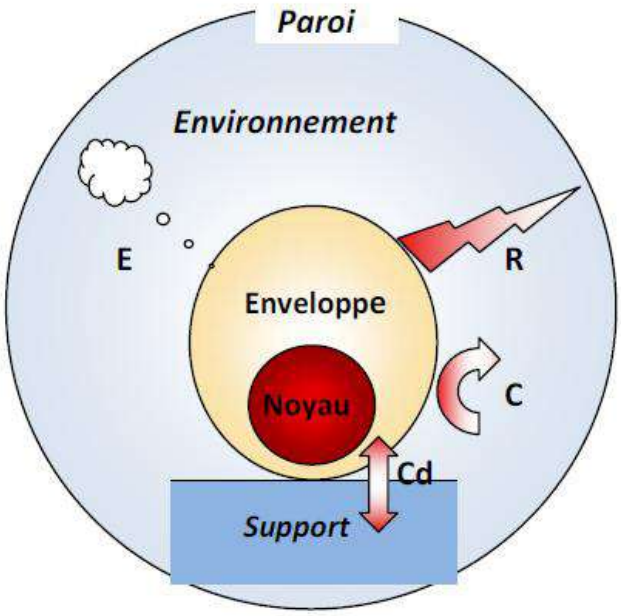


Figure 1. 5 Représentation des modalités d'échanges thermiques entre l'organisme (Constitué d'un noyau central et d'une enveloppe périphérique) et le milieu ambiant (R : radiation, Cv : convection, Cd : conduction, E : évaporation)[11]

1.4.1 Radiation (R)

Les échanges thermiques par radiation s'effectuent entre des surfaces distantes l'une de l'autre et à températures différentes. Il s'agit par exemple de l'absorption des rayons du soleil par l'enveloppe périphérique. Ils dépendent de la surface cutanée exposée aux échanges. Ce mode d'échange représente une part importante des échanges thermiques chez l'homme.

1.4.2 Convection (Cv)

Les échanges par convection s'effectuent entre deux milieux de températures différentes se déplacent l'un par rapport à l'autre. On trouve ce type d'échange entre la surface cutanée et le fluide ambiant dans lequel un sujet évolue (air ou eau). Les échanges entre la paroi des voies aériennes et les gaz y circulant représentent un autre exemple de ce mode de transfert de chaleur. Les échanges thermiques entre le noyau (organes profonds) et l'enveloppe périphérique (Tissus sous-cutanés et peau) se font essentiellement par convection, assurée comme nous l'avons cité précédemment grâce à la circulation sanguine.

1.4.3 Conduction (Cd)

La conduction concerne les échanges thermiques s'effectuant entre deux milieux de température différente, mais sans déplacement de l'un par rapport a l'autre contrairement a la convection. Il s'agit par exemple du transfert de chaleur entre la surface cutanée et les Solides ou les fluides avec lesquels la peau est en contact sans déplacement, tels que le sol ou les vêtements. La part de ce type d'échange reste modérée chez l'homme, car la surface de contact est d'autant plus réduite que la différence de température est importante.

1.4.4 Evaporation (E)

L'évaporation consomme une quantité d'énergie thermique estimée à 2,4 kJ par ml, nécessaire pour le passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Elle se fait par diffusion passive au niveau de la peau, et des muqueuses buccale et respiratoire, et par le phénomène actif de la sudation (ou transpiration).

1.5 Equilibre des échanges thermiques

La thermorégulation représente l'ensemble des processus permettant à l'homme de maintenir sa température interne dans des limites normales quel que soit son niveau métabolique ou la température du milieu ambiant. Elle repose sur un équilibre constant entre les apports et les pertes de chaleur. [11]

1.5.1 Apports de chaleur

Dans des conditions normales, l'organisme dispose de deux possibilités lui permettant d'emmagasiner de la chaleur : la production interne par métabolisme, et l'absorption de chaleur du milieu extérieur. La thermogenèse représente la principale source d'apport de chaleur à l'organisme.

1.5.1.1 Thermogenèse

La production de chaleur est due aux activités métaboliques de l'organisme et l'énergie libérée par la contraction musculaire. Cette production est donc relativement constante dans certains organes tels que le foie ou le cœur (métabolisme stable). En revanche, la quantité de chaleur produite s'avère beaucoup plus variable au niveau des muscles squelettiques, ou elle dépend de l'activité physique. Une action dynamique spécifique permettra donc d'augmenter la production de chaleur, de même que toute tension musculaire, qu'elle soit liée au froid ou a l'émotion. Le phénomène du frisson représente une réponse à la chute de température chez un sujet placé dans une ambiance froide. Il s'agit en effet de contractions musculaires répétées permettant la production de chaleur au niveau des tissus sous-cutanés. Pour un sujet normal, au repos, la production de chaleur s'évalue à environ 40 kcal/m^2/h soit 1700 kcal/j chez un homme et 1500 kcal/j chez une femme. Cette quantité de chaleur peut facilement augmenter jusqu'à 2500 à 3000 kcal/j en cas d'activité physique modérée. Sans perte de chaleur compensatrice, cette production d'énergie thermique entrainerait une augmentation de la température corporelle estimée à 1°C par heure dans des conditions basales, et à 2°C par heure dans une situation d'activité physique moyenne.

1.5.1.2 Apports extérieurs de chaleur

L'organisme peut recevoir l'apport de chaleur extérieure provenant d'objets plus chauds tels que le soleil, les murs d'une pièce chauffée (radiation directe), ou le ciel (radiation réfléchie). La quantité de chaleur apportée par radiation est indépendante de la température de l'air. Comme nous l'avons vu, elle dépend de la surface cutanée exposée. Elle sera donc moindre si le sujet porte des vêtements couvrant une partie importante de son corps. Se positionner à l'ombre représente une autre manière de limiter ces gains de chaleur. Si la température de l'air s'avère supérieure à la température cutanée, l'organisme recevra un apport supplémentaire de chaleur par convection (inversion du gradient habituellement observé entre l'organisme et le milieu ambiant).

En cas de contact entre le corps et un solide dont la température serait plus élevée, on observera un gain de chaleur supplémentaire par conduction.

1.5.2 Pertes de chaleur : Thermolyse

La thermolyse représente les processus de dissipation de l'énergie thermique provenant de l'organisme vers le milieu extérieur. Cette perte de chaleur s'effectue selon les 4 modes d'échanges thermiques décrits précédemment (figure 5).

1.5.2.1 Pertes par radiation

La radiation représente le principal mode de perte de chaleur (environ 60% de la perte de chaleur, dans des conditions ambiantes tempérées). L'organisme émet de la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge vers les objets ou les surfaces plus froids l'entourant. Un sujet avec une température cutanée de 30°C, exposé dans une pièce dont la température des murs avoisine 20°C, verra sa température périphérique diminuer.

1.5.2.2 Pertes par convection et conduction

Les pertes de chaleur entre l'organisme et le milieu extérieur s'effectuent aussi par convection (15% de la chaleur perdue) et par conduction (3%). La quantité perdue dépend de la différence du gradient de température entre la peau et les fluides et solides avec lesquels elle est en contact. La température cutanée dépendant elle-même de l'irrigation sanguine, la variation du calibre des vaisseaux sanguins représente un phénomène important de la thermorégulation. Un milieu froid entraine une vasoconstriction, alors qu'une vasodilatation s'observe en milieu chaud.

1.5.2.3 Pertes par évaporation

Diffusion passive respiratoire et cutanée. Chaque expiration respiratoire induit l'élimination de vapeur d'eau. La quantité diffusée par cette voie dépend de la saturation en eau de l'air inspiré : l'élimination sera nulle si l'air inspiré est déjà saturé en vapeur d'eau. La perte d'eau éliminée par diffusion passive respiratoire représente en moyenne 300 ml par jour, soit une perte de chaleur de 200 kcals.

L'eau éliminée par diffusion passive cutanée, après passage à travers l'épiderme, représente une quantité environ deux fois plus importante : environ 600 à 800 ml par jour, soit une perte de 400 kcals.

- **Sudation**

A l'inverse du phénomène de diffusion passive, la transpiration s'avère un mécanisme actif, permettant une évaporation d'eau importante et ajustable. Elle est efficace si elle est suivie d'une évaporation effective : il ne faut pas éponger la sueur. L'évaporation de la sueur ne pourra pas s'effectuer non plus si l'air est sature en vapeur d'eau. Ceci explique que la chaleur en milieu sec se supporte beaucoup mieux qu'en milieu humide.

Lorsque la température ambiante dépasse la température corporelle, la sudation reste le seul mécanisme permettant une perte de chaleur de l'organisme. Dans des situations de chaleur extérieure importante, elle peut entrainer une perte de 1,7 l d'eau par heure, soit 1000 kcal/h. Cette perte d'eau rapide s'accompagne d'une perte en sel de l'organisme. Il est nécessaire de compenser ces pertes, d'autant plus que la thermorégulation est prioritaire par rapport à la régulation concernant l'eau et le chlorure de sodium. Même en cas de déshydratation importante, la sécrétion de sueur continue si les conditions extérieures l'exigent.

Le phénomène de transpiration met en jeu les glandes sudoripares, dont il existe deux types différents : les glandes encrines et les glandes apocrites. Les glandes encrines sont localisées sur tout le revêtement cutané, avec une représentation plus importante au niveau des paumes et des plantes des pieds, ainsi que de la tète et de la face. Elles secrètent du chlorure de sodium, de l'urée et de l'acide lactique. Ces glandes possèdent la particularité de recevoir une innervation de fibres cholinergiques convoyées par les nerfs du système orthosympathique. Leur sécrétion peut donc être inhibée par l'atropine. Les glandes apocrites sont associées aux follicules pileux. Elles se situent principalement au niveau des aisselles et autour des mamelons. Leur sécrétion est dépendante de l'adrénaline circulante, sans influence de l'atropine sur leur activité. Leur rôle reste auxiliaire par rapport à la sudation provenant des glandes encrines. Différents centres nerveux régulent la transpiration. L'hypothalamus constitue le principal centre de contrôle. Il envoie des fibres dans les racines ventrales de la moelle, faisant relais dans les ganglions sympathiques para vertébraux. Les fibres post-ganglionnaires utilisent les nerfs spinaux pour se distribuer aux glandes sudoripares. Les ganglions T1 et T2 innervent les glandes de la face, T2 a T8 celles des membres supérieurs, T5 a T12 le tronc, et T10 a L3 celles des membres inferieurs.

Une stimulation de la sécrétion de sueur par les glandes encrines s'observe dans différentes situations :

- lors d'une augmentation de la température extérieure
- en cas d'état émotionnel
- au cours d'un exercice physique
- lors de nausées, vomissements, lipothymies, hypoglycémies, asphyxie, par stimulation de l'activité sympathique
- lors de l'ingestion de nourriture épicée, par stimulation de terminaisons nerveuses situées dans la muqueuse buccale et stimulation reflexe de la sudation au niveau de la tête et du cou.

La sudation dépend encore du débit sanguin : une vasodilatation s'avère nécessaire pour augmenter le débit de sang cutané permettant la sécrétion de sueur au niveau des glandes sudoripares. La vasodilatation découle d'une action directe de la chaleur extérieure sur les vaisseaux, d'une action reflexe à partir des thermorécepteurs cutanés, et d'une action directe de l'augmentation de la température du sang sur les centres vasomoteurs.

L'organisme parvient donc à maintenir une température centrale constante grâce a une régulation conduisant à un équilibre entre les apports et les pertes de chaleur. Les principaux mécanismes permettant cet équilibre sont synthétises dans la figure1.6.

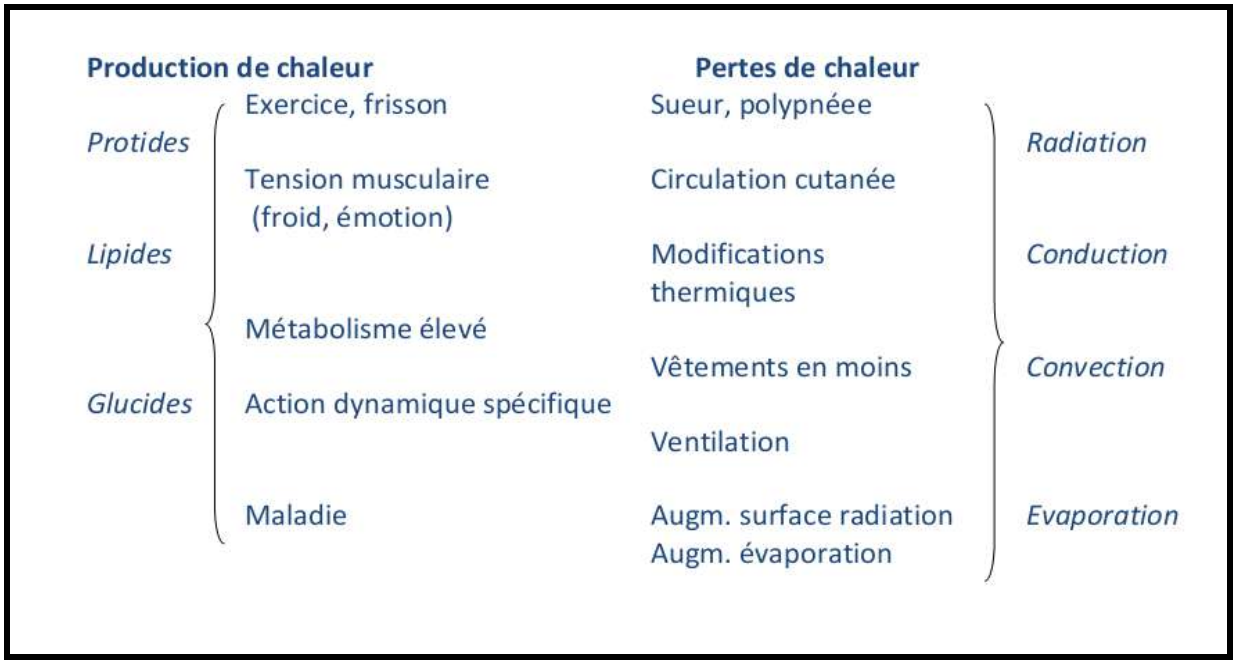


Figure 1. 6 Equilibre entre les apports et les pertes de chaleur [11]

Chapitre II: Méthodes d'analyses des ambiances chaudes et froides

2.1. Introduction

L'ambiance thermique est un facteur jouant un rôle important sur la santé, la sécurité et le confort de l'être humain. Cela concerne aussi bien les situations de chaleur que de froid. Les ambiances physiques d'inconfort sont très courantes en milieu professionnel. On exprime assez facilement et spontanément les sensations éprouvées face à l'ambiance thermique à laquelle on est soumis : sensation de chaleur d'étouffement et de froid, associées à des effets caractéristiques tels que la transpiration, le frissonnement…

Dans ce chapitre nous allons présenter les méthodes normatives existantes d'évaluation du confort thermique dans les ambiances chaudes et froides.

2.2. Lute physiologique contre les ambiances chaude et froides

2.2.1. Réponses de l'organisme au froid

Cette situation, la plus fréquente chez l'homme, entraine la nécessité de produire de la chaleur. Deux phénomènes sont mis en jeu, sous le contrôle du centre de la thermogenèse (hypothalamus postérieur) : une augmentation de la production de chaleur, et une diminution des pertes. Lorsque les mécanismes physiologiques de réponse au froid s'avèrent dépassés, l'organisme se retrouve en hypothermie. [11]

a) Augmentation de la production de chaleur

Comme nous l'avons évoqué dans la figure 6, l'augmentation du métabolisme permet une augmentation de la production de chaleur. Le froid entraine une stimulation de la faim induisant une augmentation des apports alimentaires, donc caloriques. Différentes glandes endocrines et hormones sont mises en jeu pour stimuler le métabolisme. Le froid stimule la sécrétion d'adrénaline par la médullosurrénale, entrainant une augmentation du métabolisme. Les hormones thyroïdiennes sont elles aussi mises en jeu, par l'intermédiaire de la TRH et de la TSH. Il s'ensuit une augmentation de la thermogenèse, une mobilisation du glycogène hépatique, et une augmentation de la néoglucogenèse. Enfin, le froid active les corticosurrénales, et la sécrétion des gluco et mineralo-corticoïdes.

Le deuxième mécanisme permettant l'augmentation de chaleur concerne l'augmentation du tonus musculaire et l'apparition du frisson. Chez le nouveau-né, il n'existe pas de frisson.

La production de chaleur passe par l'intermédiaire d'une activité sympathique au niveau de la graisse brune. Ce type de graisse n'existe dans l'espèce humaine qu'en début de vie. On la trouve principalement chez les mammifères hibernants.

b) Diminution des pertes de chaleur

La vasoconstriction cutanée, initiée par l'activation du système nerveux sympathique, permet de réduire la quantité de chaleur transportée par le sang des organes profonds vers la surface cutanée. Les tissus périphériques se trouvent alors isolés du compartiment central, créant un gradient thermique entre la peau et les viscères profonds.

La lutte contre le froid passe aussi par des adaptations comportementales : le port de vêtements adaptés limite les pertes de chaleur. La mise en place de différentes couches d'isolants thermiques réduit la quantité de chaleur perdue au niveau de la surface cutanée vers le milieu ambiant. De même, se placer dans un milieu ambiant protégé et au mieux chauffé permet de limiter grandement les pertes de chaleur : les adaptations physiologiques alors deviennent inutiles.

Les différentes réponses thermorégulatrices sont déclenchées pour des températures seuils variables : la vasoconstriction représente le premier mécanisme mis en jeu, des 36,8°C. Apparait a partir de 36°C une thermogenèse sans frissons. Ces derniers surviennent en dernier recours, autour de 35,5°C.

c) Hypothermie

En cas d'exposition a un refroidissement excessif, peut survenir une défaillance de la thermorégulation. Chez l'homme, il est question d'hypothermie lorsque la température corporelle chute en dessous de 35°C. Le pronostic vital est mis en jeu autour de 32°C. Une perte de conscience apparait lorsque la température corporelle oscille entre 29 et 31 °C. A partir de 30°C s'observent une diminution du métabolisme glucidique, de la fréquence cardiaque et de la fréquence respiratoire. Le décès est systématique pour des températures inférieures à 25 °C. Les personnes âgées représentent les sujets les plus sensibles à l'hypothermie. Les réponses au froid s'avèrent moins efficientes (notamment la vasoconstriction). De plus, il s'agit d'une population fréquemment exposée aux médicaments, dont certains favorisent l'hypothermie.

Certains médicaments perturbent les mécanismes d'adaptation au froid au niveau central. D'autres médicaments agissent en perturbant la thermorégulation par limitation de la réponse vasoconstrictrice.

Dans certains cas, l'hypothermie est provoquée lors de certaines interventions chirurgicales (cœur, cerveau) afin de diminuer la consommation tissulaire en oxygène.

2.2.2. Réponses de l'organisme à la chaleur

a) Effets de l'exercice musculaire

En cas d'activité physique, l'organisme est soumis à une augmentation de production de chaleur, physiologiquement compensée par l'augmentation des pertes selon 2 mécanismes :

- l'accroissement de la circulation sanguine cutanée entrainant une augmentation de chaleur de la peau et donc un plus grand gradient peau-environnement (favorise les pertes de chaleur par radiation)
- mais surtout une augmentation de la sécrétion et de l'évaporation de la sueur [11].

b) Effets d'une augmentation de la température de l'air

Dans cette situation, les réactions compensatrices observées sont les mêmes que celles survenant au cours de l'exercice physique : vasodilatation cutanée et sudation.

- **Adaptations sanguines et circulatoires :** Dans un premier temps, la vasodilatation cutanée s'accompagne d'une augmentation du débit cardiaque avec diminution de la pression diastolique. Selon l'importance des pertes d'eau et de sel liées à une déshydratation, peuvent survenir secondairement une diminution du volume plasmatique, du débit cardiaque et du débit sanguin cutané. Ceci conduit à une diminution voire un arrêt de la sécrétion de sueur, conduisant à une augmentation dangereuse de la température corporelle.
- **Sudation :** Elle résulte d'une augmentation concomitante de la température interne et de la température cutanée. Elle doit être respectée pour être efficace, puisqu'elle s'avère le seul mécanisme thermorégulateur mis en jeu lorsque la température externe dépasse la température corporelle.
- **Acclimatation :** L'exposition régulière à la chaleur va déclencher une acclimatation du sujet, c'est-à-dire :

- Déclenchement de la sudation plus rapide,
- Débit sudoral important,

- Efficacité thermolitique plus grande.

Ceci a pour conséquence de baisser la température rectal, la fréquence cardiaque et de permettre meilleure performance pour l'opérateur. L'attention sera portée vers les processus de déshydratation, dangereux pour l'opérateur malgré l'acclimatation.

2.3. Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides

2.3.1. Ambiances chaudes

L'exposition à la chaleur peut conduire à des pathologies du fait soit de la mise en jeu des mécanismes de thermorégulation soit du dépassement de leurs capacités. Une transpiration abondante et prolongée peut provoquer une perte de sels minéraux (déficit ionique), une déshydratation ou un épuisement thermique. Le déficit ionique est responsable de crampes de chaleur [12].

a) La déshydratation

Elle est liée à la transpiration. La production horaire de sueur peut atteindre 0,75 litres par heure (l/h) chez un sujet non acclimaté, et 1,2 l/h chez un sujet acclimaté à la chaleur ou physiquement très entraîné. Lorsque ces pertes hydriques ne sont pas compensées par un apport en eau équivalent, un état de déshydratation apparaît. L'accident de déshydratation peut survenir à partir du moment où la perte totale atteint 5 % du volume d'eau total de l'organisme.

b) L'épuisement thermique

L'épuisement correspond à un début de coup de chaleur. La vasodilatation cutanée peut provoquer des altérations dont l'une des manifestations extrêmes est la syncope de chaleur. Celle-ci survient généralement après une longue période d'immobilité dans une ambiance chaude. Elle peut également être observée lors de l'arrêt d'un travail physique dur et prolongé en ambiance chaude. Elle se traduit par une perte de connaissance soudaine et brève, conséquence de la mise en jeu excessive de la dilatation des vaisseaux cutanés avec chute de la tension artérielle et réduction de l'irrigation sanguine du cerveau.

Les effets liés à la décompensation de la thermorégulation sont également importants, en particulier le coup de chaleur. Il est rare mais son pronostic est très grave. Il est la conséquence de l'arrêt de la sudation qui peut survenir lors de toute exposition à une

contrainte thermique sévère ou chez le travailleur portant des vêtements imperméables à la vapeur d'eau.

- **Niveaux de gravité des risques :**

  Les risques pour la santé peuvent être répartis en 4 niveaux de gravité :

Tableau2. 1 Risques pour la santé d'une exposition à la chaleur : symptômes et niveaux de gravitante [12]

Niveau	Effets de la chaleur	Symptômes et conséquences
Niveau 1	*Coup de soleil*	*Rougeur et douleur, œdème, vésicules, fièvre, céphalées*
Niveau 2	*Crampes de chaleur*	*Spasmes douloureux (jambes et abdomen), transpiration*
Niveau 3	*Epuisement*	*Forte transpiration, faiblesse, froideur et pâleur de la peau, pouls faible, température normale*
Niveau 4	*Coup de Chaleur*	*Température corporelle supérieure à 40,6 °C, peau sèche et chaude, pouls rapide et fort, perte de conscience possible. Décès possible par défaillance de la thermorégulation.*

c) Coup de chaleur

Le coup de chaleur est une urgence vitale. Il correspond à une élévation de la température du corps au delà de 40,6 °C. Le coup de chaleur est mortel dans 15 à 25 % des cas. Il doit être pris en charge et soigné rapidement pour qu'il n'entraîne pas de séquelles.

- **Signes d'alerte et principaux symptômes :**

Les signes d'alerte sont les plus importants à connaître et doivent éveiller l'attention afin de pouvoir réagir précocement :

- signes généraux : céphalée, étourdissements, fatigue ;
- signes cutanés : peau sèche et chaude ;
- signes neuro-sensoriels : désorientation, agitation ou confusion, hallucinations, perte de conscience.

Au stade d'apparition des premiers symptômes, il s'agit d'une urgence vitale. La personne souffre d'une hyperthermie et de perte de conscience. Elle est sujette à des vomissements, des nausées, au délire, voire à des convulsions. Sa peau est chaude et sèche (elle ne transpire pas). Ses pupilles sont dilatées. La probabilité de survie et de guérison sans séquelle dépend de la précocité du traitement qui consiste à refroidir la personne le plus rapidement possible.

Tableau2. 2 Coup de chaleur [12]	
Symptômes généraux	- *Hyperthermie : température interne supérieure à 40,6°C* - *Tachycardie : pouls rapide* - *Respiration rapide* - *Céphalées* - *Nausées, vomissements*
Symptômes cutanés	- *Peau sèche, rouge et chaude* - *Absence de transpiration*
Symptômes neurosensoriels	- *Confusion, comportement étrange, délire, voire convulsions* - *Perte de connaissance éventuelle* - *Pupilles dilatées*

2.3.2. Ambiance froides

La pathologie liée au froid peut être locale ou générale, bénigne ou grave, invalidante temporaire ou définitive et quelquefois mortelle. [13]



Figure 2. 1 comment le corps humain réagit dans le froid

a) Gelure

La gelure est une lésion localisée, causée par l'action directe du froid au cours d'une exposition plus ou moins prolongée à une température inférieure à 0 °C. Elle peut cependant

être observée pour des températures basses positives en présence de vent (Wind Chill Index). [13].

La gelure résulte de plusieurs mécanismes : le gel des tissus, la vasoconstriction périphérique de lutte contre le froid et l'hyperviscosité sanguine entraînant une réduction du flux sanguin dans les extrémités et une acidose métabolique locale avec déshydratation cellulaire. Elle est favorisée par l'humidité, le vent, l'hypoxie d'altitude et la déshydratation classiquement observée au froid qui augmente l'hémoconcentration, et enfin l'épuisement au froid (abandon de toute lutte physiologique de lutte contre le froid).

Dans le milieu professionnel, la gelure peut être observée par le contact de la main nue avec un corps métallique froid. Par exemple, un contact avec un corps métallique à –25 °C entraîne une gelure en 10 secondes.

Tableau2. 3 Délai d'apparition de gelure à la main en secondes(s) pour un contact avec un corps métallique à différentes températures en (°C). [13]

Température du métal (°C)	Délai d'apparition de la gelure (s)
-60	2
-48	4
-25	10
-18	22
-10	200

Le développement d'une gelure se fait selon un processus généralement invariable très bien décrit par le malade lui-même. Chronologiquement, il s'agit d'abord d'une sensation de froid, puis d'une perte de la sensibilité cutanée et enfin de douleurs plus ou moins importantes accompagnées d'œdème lors du réchauffement. Si le diagnostic paraît relativement facile, la définition de la gravité est déjà plus délicate et le pronostic encore plus difficile. Cette complexité est particulièrement bien abordée par Foray (1983) qui établit une classification double : diagnostique et évolutive sous traitement.

Ainsi, il est nécessaire d'attendre 4 ou 5 jours pour savoir si une gelure est superficielle ou profonde, mais il faudra 15 à 21 jours pour en définir le degré exact. [14]

Le traitement des gelures superficielles est simple et identique à celui mis en œuvre pour une brûlure du même type (prévenir l'infection et surveillance de l'évolution). Le traitement des gelures profondes est du domaine hospitalier spécialisé : réchauffement local dont les différents modes sont controversés (rapide ou progressif), prévention de l'infection, anti-inflammatoire. Les gestes chirurgicaux sont des gestes simples : nécrectomie, greffes de peau... Quant à une éventuelle amputation, elle ne doit jamais être précoce ; un délai de 45 jours semble nécessaire pour se prononcer.

La prévention reste le domaine le plus important, le plus efficace pour éviter cet accident et facile à mettre en œuvre en sachant que quatre facteurs principaux favorisent l'apparition des gelures: l'humidité qui multiplie par 14 l'action du froid, le vent (Wind Chill Index), l'altitude (hypoxie et hyperviscosité sanguine due à la déshydratation et/ou l'adaptation) et l'épuisement. Compte tenu de ces remarques, les principales mesures préventives sont les suivantes :

- se protéger de l'humidité ;
- se protéger du vent (Wind Chill Index) ;
- emploi de gants et sous-gants régulièrement séchés ;
- port de bottes isolantes sans striction ni compression;
- hygiène : changement régulier de chaussettes (gel de la sueur) ;
- ne pas toucher d'objets métalliques à mains nues ;
- se réchauffer régulièrement les extrémités : poches, aisselles, etc. ;
- assurer une bonne hydratation (prévention de l'hémoconcentration) ;
- éviter le tabac et le café qui sont des vasoconstricteurs périphériques ;
- l'adaptation locale des extrémités au froid (Amélioration de tolérance au froid).

En conclusion, la gelure est une affection locale de mieux en mieux connue et diagnostiquée, mais il reste beaucoup d'incertitude quant à la physiopathologie, ce qui rend le traitement difficile. Il s'agit d'une maladie longue demandant beaucoup de patience de la part du malade et de son médecin et la prévention reste l'élément primordial de lutte contre cette affection.

Tableau2. 4 Gelures superficielles [13]

Classification diagnostique	Classification évolutive
Pâleur puis érythème au réchauffement Cyanose éventuelle régressive Œdème modéré Sensibilité conservée Phlyctènes claires	• 1er degré Guérison rapide en 3 à 4 jours Pas ou peu de séquelles • 2e degré Guérison en 10 à 15 jours Séquelles possibles

Tableau2. 5 Gelures profonde [13]	
Classification diagnostique	Classification évolutive
Cyanose fréquente Érythème au réchauffement Anesthésie Grosses phlyctènes sérohématiques Pouls périphériques ±	• 2e degré profond Nécrose limitée au derme Guérison en 21 jours environ Séquelles fréquentes • 3e degré Nécrose profonde Guérison longue Séquelles inévitables

b) Hypothermie

L'hypothermie est le résultat d'un déséquilibre thermique (pertes supérieures aux gains de chaleur) du fait d'une insuffisance (moyens dépassés) et/ou d'une défaillance de l'appareil thermorégulateur donc des moyens de lutte contre le froid. La fréquence de l'hypothermie a souvent été sous estimée ou ignorée jusqu'à l'époque de la Seconde Guerre mondiale : par exemple, l'action du froid lors du naufrage du Titanic le 14 avril 1912, ne fut aucunement évoquée dans les rapports sur l'accident bien que la température de l'eau fût proche

de 0 °C ; la cause de la mort fut attribuée à la « noyade » ! Pourtant, dès 1812, Larrey, alors chirurgien de la grande armée, avait déjà décrit lors de la retraite de Russie, des « morts bleues » chez des sujets qui luttaient activement contre le froid avant de sombrer dans le coma et des « morts blanches » chez les hommes endormis au froid et glissant progressivement vers l'hypothermie donc la mort. C'est Molnar 5 en 1946 qui mit en évidence l'importance de l'hypothermie (notamment l'hypothermie d'immersion) en publiant des abaques de temps de survie en eau froide. Il estimait ainsi qu'un naufragé vêtu placé dans de l'eau à 10 °C n'avait que 50 % de chance de survie après 1 heure d'immersion. Par la suite, plusieurs exemples tragiques sont venus confirmer la gravité de cet accident : lors du naufrage du Lakonia en 1963, 113 personnes sur 200 (57 %) sont mortes d'hypothermie au cours des 3 heures qui ont suivi le naufrage alors que la mer était calme et la température de l'eau proche de 18 °C. En 1987, le naufrage du Herald of Free Enterprise dans le port de Zeebrugge et celui de l'Estonie en septembre 1994 firent respectivement 193 et 200 victimes par hypothermie.

L'hypothermie se définit comme un abaissement non intentionnel de la température interne (noyau) généralement mesurée au niveau du rectum (température rectale : Tre). Il s'agit de l'hypothermie classiquement appelée « accidentelle » par opposition à l'hypothermie « provoquée », notamment par l'anesthésie générale. D'autres sites de mesure peuvent être utilisés comme la température œsophagienne ou la température tympanique. L'hypothermie légère correspond à une température rectale entre 33 et 35 °C. Le sujet est conscient mais présente un ralentissement psychomoteur (viscosité mentale), une sensation de froid intense avec un frisson généralisé, des douleurs musculaires (myalgies) prédominant au niveau de la nuque, une respiration rapide et superficielle.

L'hypothermie moyenne correspond à une température rectale entre 26 et 33 °C. Le tableau clinique s'assombrit : sujet stuporeux, inconscient, disparition du frisson, rigidité musculaire, anesthésie à la douleur, aréflexie, respiration lente et risque de fibrillation ventriculaire mortelle.

L'hypothermie profonde correspond à une température rectale inférieure à 26 °C. Le tableau clinique est proche de la mort apparente : sujet rigide qui peut devenir flasque, inerte, peau pâle, livide (coma marmoréen), pouls et respiration non perceptibles, pression artérielle imprenable, disparition des réflexes tendineux. C'est dans ce cas que le diagnostic différentiel avec la mort se pose. Il est classique de dire qu'on ne déclare une mort par hypothermie qu'après l'échec de tous les moyens de réanimation.

Le traitement de l'hypothermie doit être mis en œuvre le plus précocement possible et de manière maximale quelle que soit la profondeur de l'hypothermie.

L'hospitalisation est nécessaire et obligatoire.

Classiquement, on distingue le traitement de la période initiale pré hospitalière (sur le terrain) et le traitement hospitalier proprement dit. Il faut noter qu'une réanimation entreprise doit toujours pouvoir être continuée, toute interruption du réchauffement présente un caractère néfaste.

Le traitement de la période initiale pré hospitalière fait appel au bon sens et à des gestes simples :

- Retirer la victime de l'environnement responsable de l'hypothermie ;
- Envelopper le sujet dans une couverture imperméable (couverture métallisée de survie) de manière à conserver le peu de chaleur endogène produite par le sujet ;
- Limiter les manipulations corporelles ou de segments de membre : risque de fibrillation ventriculaire ;

- Entreprendre un réchauffement externe passif : couvertures. Il faut cependant savoir qu'un réchauffement anarchique, brutal et trop intense peut entraîner un « after drop ». Il s'agit d'une chute brutale secondaire de la température rectale liée au réchauffement trop intensif entraînant une vasodilatation périphérique, donc une mobilisation sanguine de la réserve de froid stockée au niveau de la peau. L'after drop peut conduire à une fibrillation ventriculaire rapide ;

L'oxygénothérapie reste de principe. La perfusion de macromolécules est parfois nécessaire pour corriger une hypo volémie. Dans ce cas, il faut éviter les perfusions par des liquides froids ; C en cas d'arrêt cardiaque (toujours difficile à diagnostiquer) l'intubation et le massage cardiaque externe lent sont quelquefois nécessaires.

Le traitement hospitalier, en service de réanimation, fait appel à plusieurs techniques. Ce traitement est toujours approprié et le pronostic immédiat très aléatoire :

- le réchauffement externe passif par des couvertures s'inscrit dans la continuité du traitement préhospitalier. Il est de règle pour les hypothermies dont la température rectale est supérieure à 32 °C. Un réchauffement contrôlé de 0,5 à 1 °C/h est recommandé et le pronostic excellent ;
- le réchauffement actif externe est réalisé pour les hypothermies moyennes. Il demande une surveillance accrue afin d'éviter l'after drop et la fibrillation ventriculaire. La vitesse de réchauffement est contrôlée de 1 à 4 °C/h et réalisée par des bouillottes, des lampes à infrarouge, couvertures chauffantes. Le pronostic est réservé ;
- le réchauffement actif interne est réservé et entrepris pour les hypothermies profondes : ventilation artificielle avec inhalation de gaz réchauffés, dialyse péritonéale à 40 °C, réchauffement gastrique (1,5 °C/h). La circulation extracorporelle lorsqu'elle est possible reste la plus efficace (8 °C/h).

Quel que soit le réchauffement actif interne mis en œuvre, le pronostic reste sombre et incertain.

En conclusion, l'hypothermie n'est sans doute pas la pathologie la plus fréquemment observée dans le monde du travail en climat froid. Cependant, les hypothermies légères ne sont pas rares et il faut savoir être attentif aux signes précoces

c) Urticaire au froid

Elle ne touche pratiquement que les zones cutanées exposées au froid (air froid, pluie froide, neige...) et se manifeste par l'apparition d'un érythème avec œdème et prurit. Le test du glaçon (glaçon appliqué directement sur une zone cutanée) permet de détecter 90 % des urticaires qui sont le plus souvent idiopathiques (72 à 87 % des cas). Ainsi, les urticaires au froid secondaires sont rares (généralement d'origine infectieuse)

d) Aspect psychologique : sensation et confort thermique

L'aspect psychologique concerne la sensation et le comportement de l'individu dans un environnement thermique. Hensel suggère que l'activité thermo sensorielle qui amène à donner des jugements sensoriels est qualitative, elle dépend de l'expérience sensorielle et ne peut pas être basée uniquement sur la physique et la physiologie [15].

2.4. Sensation thermique

La sensation thermique correspond à l'aspect qualitatif (chaud ou froid, localisation) et quantitatif (intensité) de la perception de l'état thermique personnel. Elle est liée aux messages sensoriels des différents thermorécepteurs informant l'hypothalamus qui les intègre en une information globale capable de donner information de l'état thermique de l'individu [9]. Néanmoins, il est possible de différencier l'état interne de l'état externe. De telle différence existe parce que la perception globale naît de l'aspect sensoriel intégré, alors que la perception sur l'ambiance se fait par des moyens moins globaux que sont, dans ce cas, les zones découvertes (mains, tête, pieds, etc.) [6].

Il est important de distinguer la sensation thermique du jugement affectif qui dépend de l'agrément et la préférence. Par exemple, le retour dans un intérieur chauffé de quelqu'un qui vient d'être exposé de façon prolongée au froid lui donnera une perception tiède ou chaude, mais sa sensation thermique sera toujours froide ou fraîche du fait de son exposition préalable. Ainsi, l'ambiance sera jugée agréable mais pas l'état thermique personnel. Il apparaît donc important de faire la part entre l'état thermique du sujet qui l'amène à donner une expression de sa sensation personnelle, l'état thermique de l'ambiance qui est jugée à travers la perception sensorielle du climat, et le sentiment de confort qui prend aussi en compte la relation entre le sujet et son environnement.

Si la sensation thermique dépend uniquement de l'état thermique personnel (l'activité des thermorécepteurs) et non pas de l'environnement thermique, la psychophysique a montré

la possibilité d'évaluer la sensation thermique en fonction du stimulus physique telle que la température. Les différents travaux de recherche ont montré que la sensation du froid dépend de la température cutanée, et la sensation de la chaleur dépend de la température cutanée au départ puis de la température interne. Alors que le désagrément dû à la chaleur est lié à la mouillure cutanée [15]. Pour évaluer la sensation thermique, différentes échelles ont été développées. Les plus largement utilisées sont l'échelle de Bedford et l'échelle de l'ASHRAE (Tableau 1.6). L'échelle de l'ASHRAE est souvent utilisée en affectant à la sensation neutre la valeur zéro (sensation chaude = +3, sensation froide = -3 et ainsi de suite) [AFNOR, 1995]. L'échelle de l'ASHRAE est préférée à celle de Bedford qui confond la sensation et l'agrément. Enfin, il est important de ne pas confondre entre l'équilibre et la neutralité thermique. L'équilibre thermique du corps humain peut être assuré dans une large zone de conditions d'ambiance grâce aux mécanismes de thermorégulation, la neutralité thermique correspond en revanche à une bande plus étroite pour laquelle les phénomènes de thermorégulation décrits précédemment ne sont pas (ou peu) mis en jeu.

Tableau2. 6 les échelles de la sensation thermique

L'échelle de Bedford		L'échelle de l'ASHRAE	
7	Très chaud	7 (+3)	Très chaud
6	Chaud	6 (+2)	Chaud
5	Confortablement chaud	5 (+1)	Légèrement chaud
4	Confortable	4 (0)	Neutre
3	Confortablement froid	3 (-1)	Légèrement froid
2	Froid	2 (-2)	Froid
1	Très froid	1 (-3)	Très froid

2.5. Confort thermique

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. Citons par exemple :

- Conditions pour lesquelles les mécanismes d'autorégulation sont à un niveau d'activité minimale [16]
- Etat d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique [ASHRAE, 1997, AFNOR, 1995]

La majorité des définitions renvoie à l'aspect physiologique du confort thermique, la neutralité thermique, l'absence des tensions ou même l'agrément. L'agrément est souvent

associé à la stimulation qui tend à ramener la température interne du sujet vers la température de consigne et donc à réduire les mécanismes de thermorégulation. Au contraire, une stimulation qui tend à éloigner la température interne de la température de consigne et donc à augmenter les mécanismes de thermorégulation, est jugée désagréable [8]. Mais au-delà de l'aspect physiologique du confort thermique, la relation entre le sujet et son entourage (la façon dont il le perçoit), son humeur, ses expériences thermiques sont des facteurs psychologiques qui affectent la perception thermique et amène le sujet à agir sur son environnement pour garantir son confort.

La figure 2.2 montre une schématisation de la relation entre une personne et son environnement, la relation avec l'ambiance thermique y faisant partie [17]. Cette schématisation montre que le confort thermique n'est pas seulement lié aux conditions thermiques et aux variables physiologiques. Selon les caractéristiques personnelles (psychologiques), les expériences thermiques et la culture, des attentes se forment chez les personnes quant à la qualité de leurs ambiances thermiques, et les amène à anticiper les conditions ou le changement dans les conditions thermiques. Si les conditions actuelles ne correspondent pas à ce qu'ils ont anticipé, la réponse va être différente selon la personne, l'importance et la nature des écarts (plus ou moins favorables), les conséquences prévues, et l'opportunité à changer les conditions.

L'interaction sensorielle (visuelle, ou acoustique) peut aussi avoir une influence sur le confort thermique. Si par exemple le confort thermique est assuré dans un local par ouverture des fenêtres (en été ou mi-saison), la présence d'un bruit extérieur peut encombrer le confort thermique. La présence d'une contrainte pour l'une des composantes du confort sensoriel, constitue une entrave pour les autres [17].

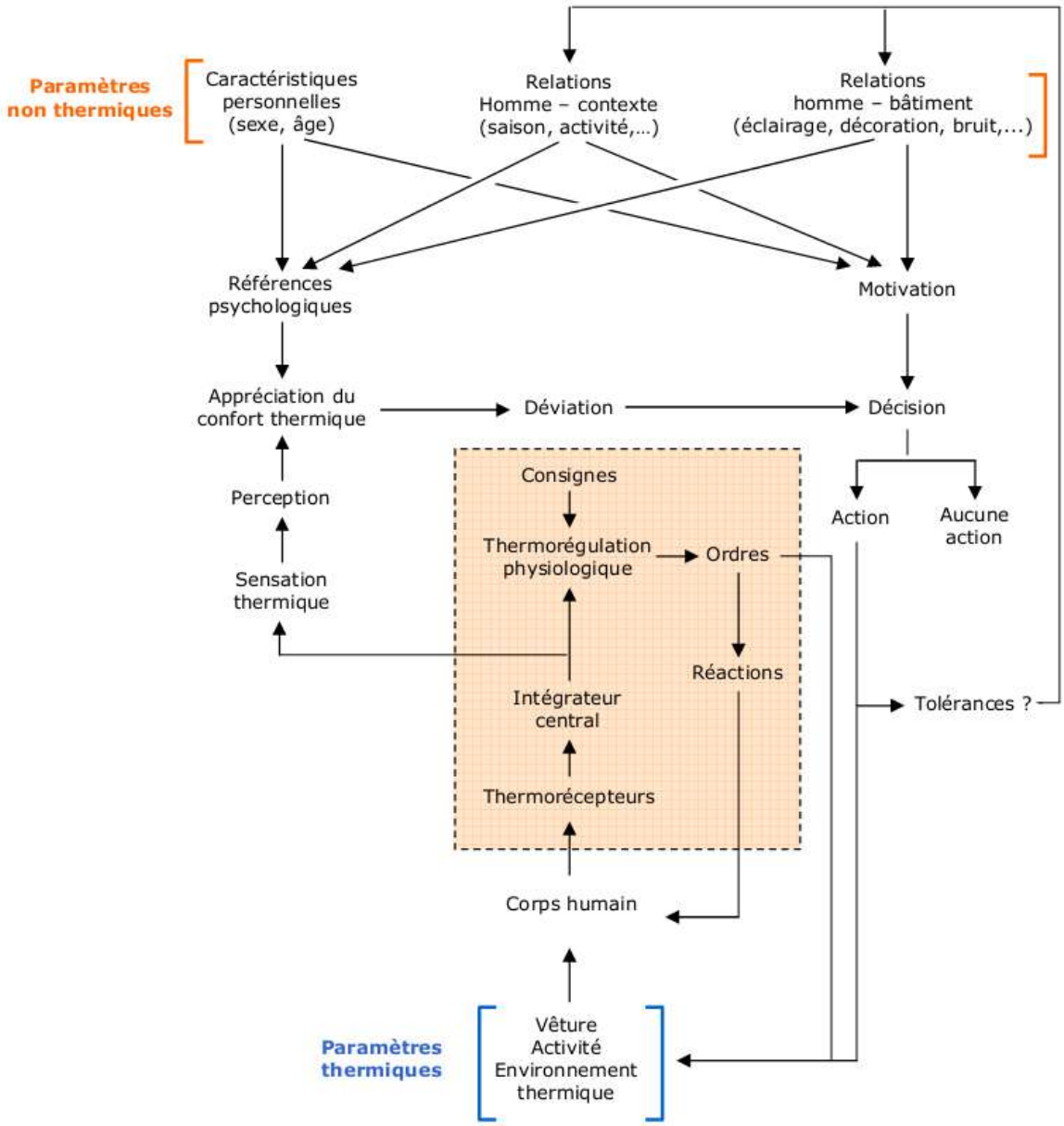


Figure 2. 2 La relation globale entre une personne et son environnement [7].

Le confort thermique n'est donc pas défini dans l'absolu. Il dépend du contexte et des caractéristiques individuelles. Il peut être conçu comme un processus adaptatif dynamique qui intègre les différents mécanismes physiques, physiologiques et psychologiques.

Enfin, compte tenu de l'aspect subjectif du confort thermique apparaissant comme un jugement affectif, son évaluation nécessite l'utilisation de trois échelles essentielles : l'une relative à la sensation, l'autre à l'agrément, et la troisième à la préférence. La norme internationale ISO 10551 précise les méthodes d'évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs (Tableau 2.7).

Tableau2. 7 Echelles de jugements subjectifs sur les conditions thermiques [AFNOR, 2001].

Echelle de jugements perceptifs (sensation)		*Echelle de jugements évaluatifs*		*Echelle de préférence thermique*	
+3	Très chaud	4	Acceptable	+3	Beaucoup plus chaud
+2	Chaud	3	Légèrement inacceptable	+2	Plus chaud
+1	Légèrement chaud	2	Inacceptable	+1	Un peu plus chaud
0	Neutre	1	Très inacceptable	0	Ni plus chaud ni plus froid
-1	L2gèrement froid			-1	Un peu plus froid
-2	Froid			-2	Plus froid
-3	Très froid			-3	Beaucoup plus froid

2.6. Neutralité thermique

La neutralité thermique correspond pour le physiologiste à une zone de températures ambiantes pour laquelle, compte tenu de l'activité et de l'isolement thermique du vêtement, le métabolisme passe par un minimum, c'est-à-dire qu'aucune augmentation de métabolisme n'est exigée, ni pour compenser un bilan thermique négatif (besoin de frissons), ni pour compenser un bilan thermique positif (besoin de sudation). Dans cette zone, seule une régulation vaso-motrice cutanée suffit à maintenir un équilibre de la production et des échanges thermiques externes et à assurer ainsi un état thermique (du noyau du corps) conforme à la valeur de consigne (environ 37 °C). [4]

Cette vasomotricité permet d'ajuster de façon précise le bilan thermique grâce aux variations de la température cutanée qu'elle engendre, et grâce à la modulation des échanges de chaleur par convection et par rayonnement qui en découlent. Les valeurs de température cutanée et leurs fluctuations peuvent à leur tour déterminer une sensation thermique.

Pour le psychologue, la neutralité thermique désigne une zone de températures ambiantes dans laquelle le sujet ne ressent ni une sensation de chaud ni une sensation de froid : il ne sait pas dire s'il souhaiterait augmenter ou diminuer la température ambiante. La neutralité thermique se détermine pour le psychologue de façon indépendante sur la base d'une échelle discriminative des sensations thermiques. La zone de neutralité thermo sensorielle peut se situer à l'intérieur de la zone de neutralité des physiologistes.

2.7. L’acclimatement

Sous l’effet d’expositions répétées ou prolongées, l’homme développe spontanément des ajustements adaptatifs lui permettant une meilleure tolérance à la chaleur. Cet acclimatement est généralement obtenu en 9 à 12 jours. Toutefois, n’est que transitoire

puisqu'il s'atténue puis disparait totalement ç l'arrêt de l'exposition. Une période de vacance supprime en général complètement les adaptations liées à l'acclimatement. Un sujet acclimaté présenté : [18]

- Une meilleure efficacité de la sudation : avec un déclenchement plus précoce, une sudation plus abondante pour une même température centrale, une redistribution de la sudation du tronc vers les membres.
- Une réduction de l'astreinte cardio-vasculaire. Le seuil de déclenchement de la vasodilatation est abaissé. Le débit sanguin périphérique diminue du fait de températures centrale et cutanée plus adaptées. L'augmentation de la fc est moins importante. Le volume de sang circulant au niveau des muscles est augmenté. Le transfert de chaleur par gradient thermique est plus efficace.
- Une réduction du risque de troubles ioniques par diminution de la teneur en NaCl de la sueur (réabsorption accrue).

La figure2.3 présente les variations de la température rectale, de la fc et du débit sudoral au cours de l'acclimatement. Des programmes d'acclimatement artificiel ont été réalisés notamment chez les militaires. (parsons 1993). A travail et condition climatiques égales, chez le sujet acclimaté, l'élévation de la température centrale est réduite de l'ordre de 0,3°C à 1°C et celle de la fréquence cardiaque de travail est réduite de l'ordre de 10 à 40 battements par minute selon la sévérité des conditions d'exposition. [18]

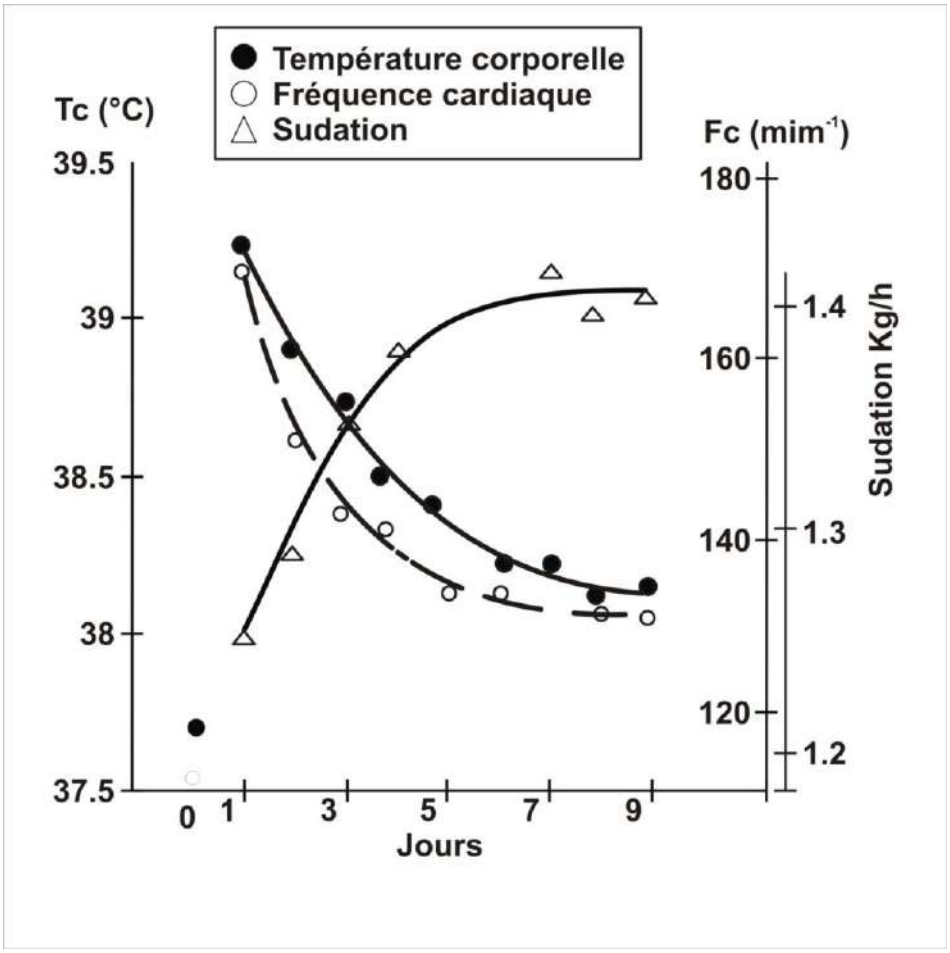


Figure 2. 3 Variation de la température corporelle, de la fréquence cardiaque et du débit sudoral d'un groupe d'homme pendant la phase d'acclimatement (d'après Parson1993) [18]

Chapitre III : Bilan énergétique de l'homme dans Ses échanges avec l'environnement

3.1. L'aspect physique : Bilan thermique

Le maintien de l'homéothermie implique qu'il y ait égalité entre, d'une part, le flux thermique produit par les oxydations cellulaires augmentées des éventuels apports de chaleur d'origine extrême et, d'autre part, la quantité de chaleur que l'homme peut céder à l'environnement. Toute inégalité entraine une variation de température et doit par conséquent être corrigé par une réaction adéquate de l'organisme. [10]

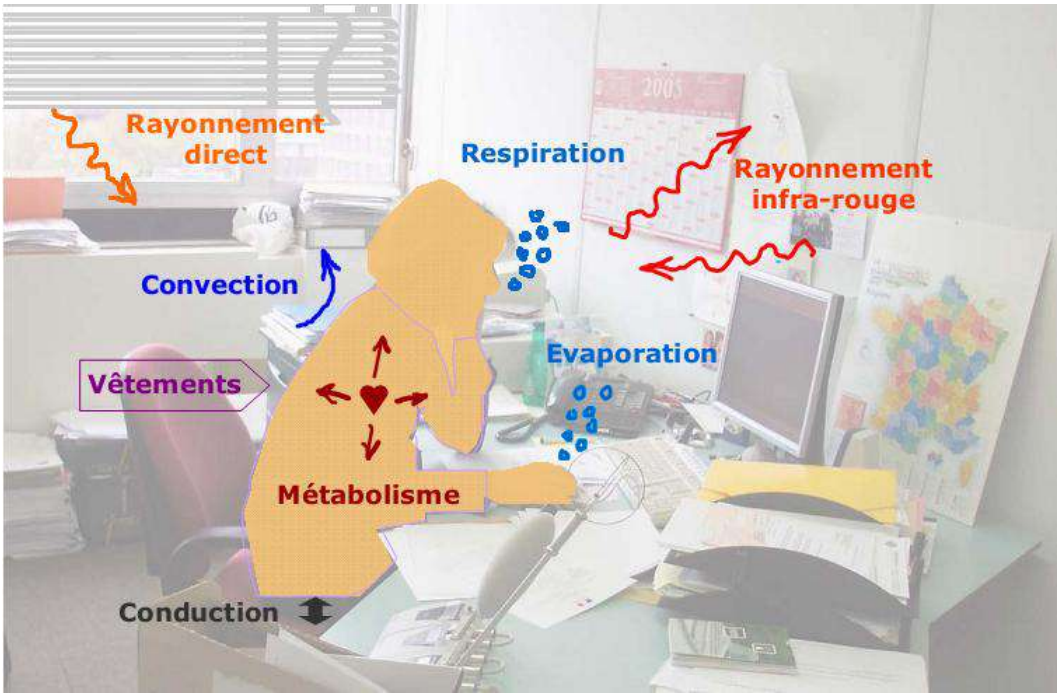


Figure3. 1 L'interaction thermique entre le corps humain et son environnement [7]

La chaleur métabolique produite dans le corps peut être stockée dans celui-ci, induisant une élévation de la température interne, ou dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire (figure 2.1). Le bilan thermique du corps s'écrit de la façon suivante [10]

$$M - W = Q_{res} + Q_{sk} + S$$

$$= (C_{res} + E_{res}) + (C + R + K + E_{sk}) + S_{sk} + S_{cr} \qquad (2.1)$$

Avec

M taux du métabolisme, W/m²

W travail externe, W/m²

Q_{res} flux de chaleur échangé par voie respiratoire, W/m²

Q_{sk} flux de chaleur échangé à la surface cutanée, W/m²

S taux de chaleur stocké, ou bilan thermique W/m²

C_{res} flux de chaleur échangé par convection respiratoire, W/m²

E_{res} flux de chaleur échangé par évaporation respiratoire, W/m²

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

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

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

E_{sk} flux de chaleur latente échangé par évaporation à la surface de la peau, W/m²

S_{cr} taux de chaleur stockée à l'intérieur du corps, W/m²

S_{sk} taux de chaleur stockée dans la peau, W/m²

Tant que le bilan thermique est nul, l'homéothermie est assurée. Lorsqu'il est différent de 0, les températures corporelles (cutanée et centrale) diminuent (S<0) ou augmente (S>0). Ces variations des températures corporelles entrainent à leur tour une mise en jeu des mécanismes de lutte contre le chaud ou contre le froid.

La chaleur produite par le corps est dissipée dans l'environnement à travers la surface cutanée et par voie respiratoire sous forme de chaleur sensible et latente. La convection, le rayonnement et la conduction sont les trois modes d'échange de chaleur sensible à la surface cutanée, la chaleur latente est reprise par évaporation de la sueur à la surface de la peau. La ventilation respiratoire dissipe la chaleur du corps par convection (chaleur sensible) et par évaporation (chaleur latente).

Les flux de chaleur à la surface de la peau sont exprimés en fonction des variables de l'environnement thermique, de la température cutanée et de la mouillure cutanée. Ils sont souvent calculés par unité de surface corporelle (elle est prise égale à 1,8 m² pour une personne standard [15]). Les variables de l'environnement thermique sont la température d'air, la température de rayonnement, la vitesse d'air et l'humidité relative.

L'individu est caractérisé par deux variables personnelles : l'activité et la vêture. La vêture est représentée par l'isolation thermique et la perméabilité à la vapeur des vêtements.

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 [10].

$$S_{cr} = \frac{(1-\alpha)mc_{p,b}}{A_D}\frac{dt_{cr}}{d\theta} \quad (2.2)$$

$$S_{sk} = \frac{\alpha mc_{p,b}}{A_D}\frac{dt_{sk}}{d\theta} \quad (2.3)$$

Avec

α	fraction de la masse corporelle concentrée dans la peau
m	masse corporelle, kg
$c_{p,b}$	chaleur spécifique du corps, kJ/kg.K
θ	temps, s

- **La charge thermique**

On peut définir la charge thermique (L") appliquée au corps humain par un simple bilan:

$$L'' = (Q'')_{\text{à dissiper}} - (Q'')_{\text{dissipable}} \quad (2.4)$$

Où Q" à dissiper est fonction de l'activité, en condition confortables et Q" dissipable dépend des échanges thermiques à la surface de la peau en conditions confortables.

L" mesure donc l'état de déséquilibre thermique du corps humain en figeant la thermorégulation comme si l'ambiance était confortable. En fait, on sait que si L" est différent de 0, il y aura une correction thermorégulatrice, mais que celle-ci s'accompagne d'un certain risque d'inconfort. C'est ce risque que nous tenterons d'évaluer. [19]

3.2. Production de chaleur métabolique

La production de chaleur métabolique est le reflet de la vie cellulaire qui résulte de la consommation d'oxygène (M_{O2}) et du dégagement du gaz carbonique (M_{CO2}) dont les quantités varient en fonction du substrat énergétique dégradé (glucides, lipides, protides).
Une partie du métabolisme est utilisée par les muscles pour le travail externe (convertie en travail mécanique utile), noté W, qui est défini en fonction du métabolisme par un facteur η, appelé rendement mécanique ($W = \eta.M$; η n'excède pas 20% et pour les activités classiques de bureau il est pratiquement nul). La chaleur métabolique est alors obtenue en déduisant le travail externe W du taux de métabolisme M. [29]

$$H = M - W \quad (2.5)$$

En première approche, on peut considérer une « combustion » des aliments (essentiellement du carbone) grâce à l'oxygène fourni par la respiration. Ramenée à l'unité d'aire de la peau l'équation précédente peut aussi s'écrire [19] :

$$H'' = M'' (1 - \eta) \tag{2.6}$$

où

H'' la chaleur à dissipée, W/m² de peau

η rendement mécanique.

En état stable, la quantité de chaleur métabolique produite se déduit de la consommation d'oxygène calculée à partir des débits d'air ventilé et de la différence de concentration entre l'air inspiré et l'air expiré. En conditions normales, lorsque l'organisme est au repos et en équilibre nutritionnel, le quotient respiratoire global $\frac{MCO2}{MO2}$ de l'organisme est de 0,83. Pour une telle valeur, la consommation de chaque litre d'oxygène par heure produit en moyenne 5,57 W. Or, l'Homme au repos consomme 0,31 L d'oxygène à la minute, soit 18,6 L/h ; il dégage donc 104 W (58 $W \cdot m^{-2}$ pour l'Homme standard de 1,8 m^2) : c'est le métabolisme de repos (sujet assis, vêtu à la thermo neutralité) correspondant à la chaleur métabolique puisque aucun travail n'est fourni à l'extérieur du corps humain. Le métabolisme est exprimé souvent en Met, l'unité de Met est égale à 58.15 W/m² et correspond au métabolisme d'un individu assis au repos. La norme ISO 8996 propose plusieurs méthodes pour déterminer le métabolisme. Ces méthodes sont classées en quatre niveaux selon le degré de précision. Le tableau 2.1 correspond l'estimation du métabolisme par chaque méthode.

La production de chaleur métabolique M en (W/m²) peut être mesurée par la consommation d'oxygène :

$$M = (0{,}23\ QR + 0{,}77)\ (5{,}87)\ (V_{o2})\ (60/A_{DU}) \tag{2.7}$$

A_{DU} (m²) surface cutanée,

QR quotient respiratoire, c'est-à-dire le rapport entre Vco2 et V_{o2} (QR est compris entre 0,83 au repos et 1,00 lors d'un travail très intense)

V_{o2} (L/min) consommation d'oxygène à 0°C et 101 KPa

V_{co2} (L/min) production métabolique de gaz carbonique à 0°C et 101 kPa

5,87 (Wh/L) équivalent énergétique d'un litre d'oxygène lorsque le quotient respiratoire est égal à 1

Tableau 3. 1 Niveaux de détermination du métabolisme énergétique [ISO 8996]

Niveau	Méthode	Précision	Étude du poste de travail
1 Typologies	1A: Classification en fonction de la profession	Information grossière Risque d'erreur très important	Pas nécessaire, mais information requise sur l'équipement technique et l'organisation du travail
	1B: Classification en fonction de l'activité		
2 Observation	2A: Tableaux d'estimation par les composantes	Risque d'erreur élevé Précision : ± 20 %	Étude des temps et des mouvements nécessaire
	2B: Tableaux par activités spécifiques		
3 Analyse	Mesurage de la fréquence cardiaque dans des conditions définies	Risque d'erreur modéré Précision : ± 10 %	Étude requise pour déterminer une période représentative
4 Expertise	4A: Mesurage de la consommation d'oxygène	Erreurs dans les limites de précision de la mesure ou de l'étude des temps Précision : ± 5 %	Inspection du lieu de travail nécessaire
	4B: Méthode de l'eau doublement marquée		Inspection du lieu de travail pas nécessaire, mais estimation des activités de loisirs requise
	4C: Calorimétrie directe		Pas nécessaire

Lorsque la consommation d'oxygène ne peut pas être mesurée, il est possible d'estimer M au moyen d'une analyse simplifiée du travail décomposant M en trois composantes [29] :

$$M = M_B + M_P + M_W + M_M \quad (2.8)$$

B_M métabolisme basal, W/m²

M_P composante posturale, W/m²

M_W composante d'activité, W/m²

M_M composante de déplacement du corps en fonction de la vitesse, W/m²

Le métabolisme basal est le métabolisme d'une personne couchée au repos dans des conditions définies. C'est la production de chaleur minimale nécessaire aux fonctions vitales de l'organisme. Il dépend du poids, de la taille, de l'âge et du sexe [ISO8996]. Ces facteurs ont une influence faible. Des valeurs de 44 W/m² (hommes) et 41 W/m² (femmes) peuvent être utilisées avec une bonne approximation. Ces valeurs sont définies pour une personne standard (1.7m, 70 kg et 35 ans pour les hommes, et 1.6m, 60 kg et 35 ans pour les femmes).

Les augmentations de métabolisme dues à la posture sont de 10W/m² en posture assise, de 20W/m² en posture agenouillée ou accroupie, de 23 W/m² en posture debout et de 20W/m² en posture debout penchée. Le métabolisme peut être influencé énormément par la thermorégulation. Les frissons peuvent multiplier sa valeur jusqu'à 4 à 5 fois par rapport à

une personne qui ne frissonne pas. En plus, la thermorégulation comportementale peut avoir des effets non négligeables dans les conditions chaudes et froides.

Dans les situations chaudes, les individus peuvent s'adapter en réduisant la vitesse de leurs mouvements, ceci se traduit par une réduction du métabolisme de près 10 %. Les augmentations de métabolisme dues à l'activité sont données dans le tableau suivant :

Tableau 3. 2 Niveaux de détermination du métabolisme énergétique [ISO 8996]

Activity	Met Units	Metabolic Rate W/m²
Resting		
Sleeping	0.7	40
Reclining	0.8	45
Seated, quiet	1.0	60
Standing, relawed	1.2	70
Walking (on level surface)		
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220
Office activities		
Seated, reading, or writing	1.0	60
Typing	1.1	65
Filing, seated	1.2	70
Filing, standing	1.4	80
Walking about	1.7	100
Lifting/ packing	2.1	120
Driving/ Flying		
Automobile	1.0-2.0	60-115
Aircraft, routine	1.2	70
Heavy vehicle	3.2	185
Miscellaneous occupational activities		
Cooking	1.6-2.0	95-115
House cleaning	2.0-3.4	115-200
Seated, heavy limb movement	2.2	130
Machine work		
Sawing (table saw)	1.8	105
Light (electrical industry)	2.0-2.4	115-140
Heavy	4.0	235
Handling 50 kg	4.0	235
Miscellaneous leisure activities		
Dancing	2.4-4.4	140-255
Calisthenics/ exercise	3.0-4.0	175-235

Tennis	3.6-4.0	210-270
Basketball	5.0-7.6	290-440
Wrestling	7.0-8.7	410-505

3.3. Echange de chaleur sèche (chaleur sensible)

L'homme produit et échange de la chaleur. Sa production de chaleur interne se répartit dans sa masse corporelle tandis que ses échanges thermiques externes se font à la surface cutanée (AD : surface de DuBois, DuBois Area). L'échange de chaleur sensible à la surface cutanée passe à travers les vêtements. Cet échange de chaleur peut être considéré en série : l'échange de chaleur de la surface cutanée à la surface externe des vêtements à travers l'épaisseur des vêtements, et l'échange de chaleur de la surface externe des vêtements à l'environnement.

La surface cutanée (en m²) se calcule à partir du poids P (kg) et de la taille T (en m) selon la formule : [30]

$$A_D = 0{,}202\ P^{\,0{,}425}\ T^{\,0{,}725} \qquad (2.9)$$

En conditions urbaines, on considérera une personne "standard" définie par une hauteur 1.75 m et un poids de 75 kg. Dans ces conditions, l'aire cutanée est égale à 1.78 m2. En général, toutes les équations d'échange thermique entre homme et environnement seront définies en termes de flux énergétique par m^2 de peau (W/m^2).

Les trois modes d'échange de chaleur sensible sont la conduction, la convection et le rayonnement :

3.3.1. Effet dû à la conduction

Les échanges de chaleur par conduction thermique ne sont généralement pas pris en compte. En effet, d'une part seule une très petite fraction de la surface corporelle participe aux échanges par conduction (mains, pieds) ; d'autre part, lorsque les températures des solides sont très différentes des températures cutanée, une couche isolante sépare les deux faces ; enfin, lorsque les surfaces d'échange sont grandes (sujets assis, adossée), les éléments solides ont tendance à se mettre en équilibre avec l'ambiance, devenant une résistance thermique additionnelle analogue au vêtement. McCollough a mesuré les valeurs d'isolement thermique dû à la chaise. Il a trouvé des valeurs entre 0.1 et 0.3 clo selon le type de la chaise. L'isolement est d'autant plus important que la surface de contact entre le corps et la chaise est plus grande [7].

3.3.2. Effet dû à la convection

La convection correspond aux échanges de chaleur entre le corps et l'air entourant. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement, en cas de convection naturelle.

La température de l'air est un paramètre très important parce qu'elle participe activement et de façon permanente à notre déperdition calorique du fait de sa part active dans les échanges convectifs. Son impact est d'autant plus grand que les vitesses de l'air et des courants qui sont également influentes dans cette modalité d'échange.

Les échanges de chaleur par convection **C** sont décris par :

$$C = h_c f_{cl} (T_{cl} - T_a) \qquad (2.10)$$

Avec

C flux de chaleur convectif, W/m²

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

f_{cl} facteur d'habillement

T_a température d'air, °C

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

Le coefficient d'échange convectif h_c dépend du mouvement de l'air effectif autour du corps. Il dépend aussi de la posture et de l'activité. ASHRAE [ASHRAE, 1997] propose plusieurs expressions empiriques pour calculer h_c selon différentes configurations (personne assise, debout, en marche dans un air calme ou en mouvement), avec les limites d'application exprimées en termes de vitesse d'air.

$h_c = 2{,}38(T_{sk}-T_a)^{0,25}$ pour $V_a < 0{,}2$ m/s (convection naturelle)

$h_c = 3{,}5 + 5{,}2\ V_{ar}$ pour $V_a \leq 1$m/s

$h_c = 8{,}7\ V_{ar}^{0,6}$ pour $V_a \geq 1$m/s

avec

V_a vitesse de l'air ambiant

V_{ar} vitesse relative de l'air, c'est-à-dire la résultante de la vitesse de l'air V_a par Rapport à un objet immobile et de la vitesse du corps par rapport au sol ;

V_{ar} peut être estimé par :

$$V_{ar} = V_a + 0{,}0052\ (M - 58) \qquad (2.11)$$

Avec M activité métabolique (en W/m^2), telle que décrite précédemment avec une condition supplémentaire de sorte que, si M>200 alors M est pris égal à 200 W/m^2, afin de limiter le second terme du membre de droite de l'équation à 0,7.

3.3.3. Effet dû au rayonnement

L'échange radiatif est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. On distingue deux catégories selon la bande d'émission : les échanges de courts longueurs d'onde (rayonnement solaire) et les échanges grandes longueurs d'onde (rayonnement infrarouge) avec les parois qui entourent le sujet. A la température ambiante, toutes les surfaces émettent des radiations principalement dans l'infrarouge dont la puissance est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue de la surface. Ainsi, le corps humain émet en permanence une chaleur radiative liée à sa température cutanée et son émissivité, de même que les parois qui l'entourent. Le flux radiatif échangé par le corps correspond à la différence entre le rayonnement émis par celui-ci et le rayonnement reçu de son environnement [7]. Si le rayonnement reçu par le corps est supérieur à sa propre émission, le corps se réchauffe, et se refroidit dans le cas inverse.

Pour simplifier le calcul du flux radiatif, la température moyenne de rayonnement est utilisée à condition que l'environnement thermique soit homogène. Elle est une moyenne pondérée des températures de surface des parois du local en fonction de leur émissivité et de leurs positions relatives par rapport au sujet. En plus, une approximation linéaire est utilisée pour écrire l'équation du flux radiatif en raison des faibles écarts de température.

L'expression est la suivante [10] :

$$R = h_r \, f_{cl} \, (T_{cl} - T_r) \qquad (2.12)$$

avec

$$h_r = \sigma \varepsilon_{sk} \, A_r / A_{DU} \, \frac{(T_{sk}^4 - T_r^4)}{T_{sk} - T_r} \qquad (2.13)$$

ou encore :

$$h_r = 4\sigma\varepsilon_{sk} \frac{A_r}{A_D \left[273 + \frac{T_{sk} + T_r}{2}\right]^3} \qquad (2.14)$$

avec

R flux de chaleur radiatif, W/m²

h_r coefficient d'échange radiatif W/m². K

T_r température moyenne radiante, °C

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

A_r surface cutanée qui rayonne, m²

f_{cl} facteur d'habillement

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

ε_{sk} émissivité cutanée de 0,97

$\frac{A_r}{A_{\square}}$ 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 : [21]

$$T_{sk} = 30+0.093T_a+ 0.045T_r -0.571V_a+ 0.0254PaH_2O +0.00128M – 3.575\ I_{cl} \quad (2.15)$$

avec

PaH_2O pression partielle de vapeur d'eau ambiant, kPa

I_{cl} isolement thermique du vêtement, k. m² /W

La température moyenne de rayonnement se déduit des mesures de température de globe noir (défini dans la norme ISO 7726) Tg, de la température de l'air et de la vitesse d'air selon la formule :

$$\bar{T}_r = \left[(T_g)^4 + 2,5 \times 10^8 V_a^{0,6} (T_{\square} - T_a)\right]^{\frac{1}{4}}$$

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

$$\bar{T}_r = T_g + 1,8\sqrt{V_a}\ (T_g - T_a) \quad (2.16)$$

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 T_o et le coefficient d'échange de chaleur sensible h [10].

$$(C + R) = f_{cl}.h. (T_{cl}–T_o) \quad (2.17)$$

h = hr+ hc

$$T_o = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c}$$

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 :

$$T_o = \frac{T_r + T_a}{2}$$

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 T_{sk} et la surface du tissu à température T_{cl}, les transferts de chaleur sensible peuvent être écrits de la façon suivante.

$$(C+R) = \frac{T_{sk} - T_{cl}}{R_{cl}} \quad (2.18)$$

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 T_{cl} on obtient :

$$(C+R) = \frac{T_{sk} - T_o}{R_{cl} + 1/F_{cl} h} \quad (2.19)$$

3.4. Echanges de chaleur latente due à l'humidité

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 [7].

$$E_{sk} = \frac{\omega \left(P_{sk,s} - P_a \right)}{R_{e,cl} + \left(1 / {}_{\square_{cl}} h_e \right)} \qquad (2.20)$$

E_{sk} échange de chaleur évaporatoire cutanée, W/m²

h_e coefficient d'échange de chaleur par évaporation, W/m²kPa

f_{cl} facteur d'habillement

P_a pression partielle de vapeur d'eau ambiante, kPa

$P_{SK,S}$ pression saturante de vapeur d'eau à la température cutanée moyenne T_{sk}.

$R_{e,cl}$ résistance vestimentaire à l'évaporation, m²kPa/W (similaire à R_{cl})

ω mouillure cutanée

Le coefficient d'évaporation h_e peut être calculé à partir du coefficient d'échange convectif h_c moyennant la relation de Lewis (h_e/h_c = LR, où LR est le « Lewis ratio », il est approximativement 16,7 K/kPa pour des conditions intérieures typiques) [10].

Où:

h_e (W/m2. kPa) = K h_c (W/m2. K)

K = 16,7 K. kPa^{-1}

La mouillure cutanée est le rapport entre la surface mouillée de la peau A_e et la surface totale A_D ω = A_e / A_D. Elle représente la fraction équivalente de peau mouillée pour obtenir l'évaporation observée (pour ω =1 la peau est complètement mouillée) [8]. 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 3.2).

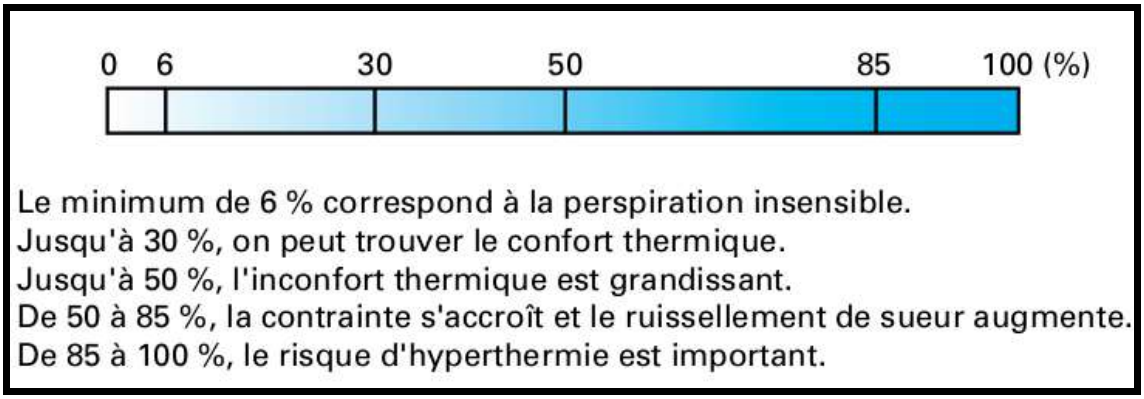


Figure3. 2 niveaux de mouillure et intensité de l'astreinte thermique [30]

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

$E_{sk} = \omega E_{max}$

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

$$E_{max} = h_e F_{pcl} (P_{sk,s} - P_a) \qquad (2.21)$$

Avec

F_{pcl} facteur de réduction des échanges de chaleur latente par les vêtements

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

$$E_{req} = M - W - C_{res} - E_{res} - C - R - S \qquad (2.22)$$

Toutefois, cet équilibre ne pourra être atteint que si E_{req} reste inférieur à E_{max} possible dans l'ambiance considérée. Le rapport entre E_{req} et E_{max} définit la mouillure cutanée requise (ω_{req}) pour assurer l'équilibre thermique. Plus E_{req} est proche de E_{max} 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 (S_w), c'est-à-dire le rendement évaporatoire (r) de la sudation diminue donc.

La sudation requise (Sw_{req}) pour que l'évaporation requise soit réalisée est donnée par :

$$Sw_{req} = E_{req} / r \quad (2.23)$$

$$r = 1 - 0{,}5\exp\left[-6{,}6\,(1 - \omega_{req})\right] \quad (2.24)$$

3.5. 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 inspiré. 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. Le flux de respiration est calculable directement comme un débit d'enthalpie, mais il est intéressant ici d'en distinguer les deux composantes : « sèche » (C_{res}) et « évaporée » (E_{res}), respectivement fonction de t et de p de l'air. L'ASHRAE donne l'équation suivante pour calculer les échanges respiratoires [10].

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \quad (2.25)$$

La perte de chaleur sensible est fonction de la température d'air expiré et de la température de l'air ambiant.

$$C_{res} = \dot{M}_{air} \times c \times \left(T_{exp} - T\right) \quad (2.26)$$

avec

c chaleur massique de l'air = 10^3 J/kg K

T_{exp} température de l'air expiré, de l'ordre de 34°C selon Fanger

T température de l'air ambiant, °C

La perte de chaleur latente est fonction de la différence entre l'humidité spécifique de l'air expiré et de celle l'air ambiant.

$$E_{res} = \dot{M}_{air} \times L \times (w_{ex} - w) \quad (2.27)$$

avec

$w_{e=}$ humidité spécifique (contenu en eau) de l'air expiré Selon une corrélation expérimentale de Fanger, l'air inspiré est saturé à 35.8°, donc légèrement sursaturé à 34°C, kg eau / kg air sec

w humidité spécifique de l'air ambiant, kg eau / kg air sec

La ventilation pulmonaire en Kg/s est principalement fonction du métabolisme. D'après Fanger, on peut considérer qu'il est égal à :

$$\dot{M}_{air} = 1.4 \times 10^{-6} M^{*} A \qquad (2.28)$$

On sait par ailleurs que l'humidité de l'air expiré dépend dans une certaine mesure des conditions de l'air inspiré. La différence d'humidité spécifique entre air expiré et inspiré s'écrit:

$$w_{ex} - w = 0.0277 + 0.000065\,T - 0.80w \qquad (2.29)$$
$$w_{ex} - w = 0.029 - 0.80w \text{ kg eau/ kg air sec}$$

En remplaçant la ventilation pulmonaire dans C_{res} et les humidités spécifiques par les pressions partielles correspondantes dans E_{res} on obtient ainsi: [10]

$$C_{res} + E_{res} = 0{,}0014.M.\,(T_{exp} - T_a) + 0{,}0173.M.\,(P_{exp} - P_a) \qquad (2.30)$$

Avec

C_{res} flux de chaleur par convection respiratoire, W/m²

E_{res} flux de chaleur par évaporation respiratoire, W/m²

M production de chaleur métabolique, W/m²

T_{exp} température de l'air expiré, °C (~ 34°C)

T_a température de l'air ambiant, °C

P_{exp} pression de vapeur d'eau dans l'air expiré, kPa (5,87kPa à 34°C)

P_a pression de vapeur d'eau dans l'air, kPa

3.6. Isolement vestimentaire

Le vêtement ne modifie pas les principes physiques des échanges de chaleur mais influence ces échanges en modifiant les coefficients de convection, de rayonnement et d'évaporation. Un vêtement noir absorbe davantage la chaleur de rayonnement qu'un vêtement blanc. Plus un vêtement est réfléchissant (tenue métallisée par exemple) plus il renvoie l'énergie calorique à l'extérieur.

A proximité de la surface cutanée couverte, le vêtement crée un microclimat caractérisé par une température, une pression et une vitesse d'air qui dépendent de la ventilation naturelle sous le vêtement (effet de "pompage"). Ces paramètres caractérisent l'isolement thermique du vêtement en modifiant les échanges de chaleur. Ces facteurs tiennent compte de l'isolement thermique du vêtement, de son pouvoir de réflexion du rayonnement incident et de son influence sur la diffusion de la vapeur d'eau de la peau vers l'extérieur.

L'influence du vêtement sur les échanges de chaleur est très complexe mais peut être analysé de manière plus simple au prix d'approximations. Les facteurs de correction à utiliser vont dépendre du type de vêtement : vêtements légers et poreux, vêtements de protection contre le rayonnement, vêtements entravant la diffusion de la vapeur d'eau.

Pour évaluer les propriétés thermiques des vêtements, un modèle simple du comportement thermique des vêtements est utilisé afin de quantifier les valeurs des éléments nécessaires pour le calcul des échanges thermiques entre l'homme et l'environnement, notamment l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation. Le modèle simple considère les vêtements comme une seule couche à travers laquelle les transferts de chaleur se font uniquement par conduction entre la peau et la surface du tissu. La tenue vestimentaire est ainsi représentée par l'isolement thermique intrinsèque du vêtement I_{cl}, en m². °C/W, qui est l'isolement entre la peau et la surface de vêtement. La définition de l'isolement thermique d'une tenue vestimentaire inclut également les parties non recouvertes du corps comme la tête et les mains. Pour cela, il est approprié d'utiliser l'unité clo pour l'expression de l'isolement thermique (1 clo = 0,155 m². °C/W). L'unité de clo correspond à l'isolement nécessaire au maintien de la balance thermique de l'homme sédentaire à 21 °C en air calme. Pour tenir compte de l'accroissement de surface dû aux vêtements, le facteur f_{cl} a été introduit. Il peut être calculé à partir des valeurs d'I_{cl}. L'isolement thermique des vêtements peut être mesuré expérimentalement sur un mannequin. En pratique, il est estimé à partir de tableaux de valeurs mesurées sur un mannequin thermique. La norme ISO 9920 permet le calcul d'I_{cl} à partir des valeurs clo des pièces unitaires ou à partir des exemples de tenues citées [ISO 9920]. Le modèle simple à un seul paramètre, qui est l'isolement thermique, représente une approximation du comportement thermique des vêtements dans les ambiances modérées où les conditions sont homogènes et confortables, et les sujets exercent une activité légère. Il est souvent utilisé dans la pratique pour la plupart des applications, surtout dans les bâtiments. Par contre, il présente des limitations comme il ne prend pas en compte le transfert de masse à travers les vêtements qui joue un rôle important dans le cas de transpiration pour les sujets en activité intense ou dans les ambiances chaudes.

Un autre modèle simple consiste à prendre en compte séparément les transferts de chaleur et de masse à travers les vêtements, considérés alors comme deux mécanismes indépendants (figure 10). C'est un modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation.

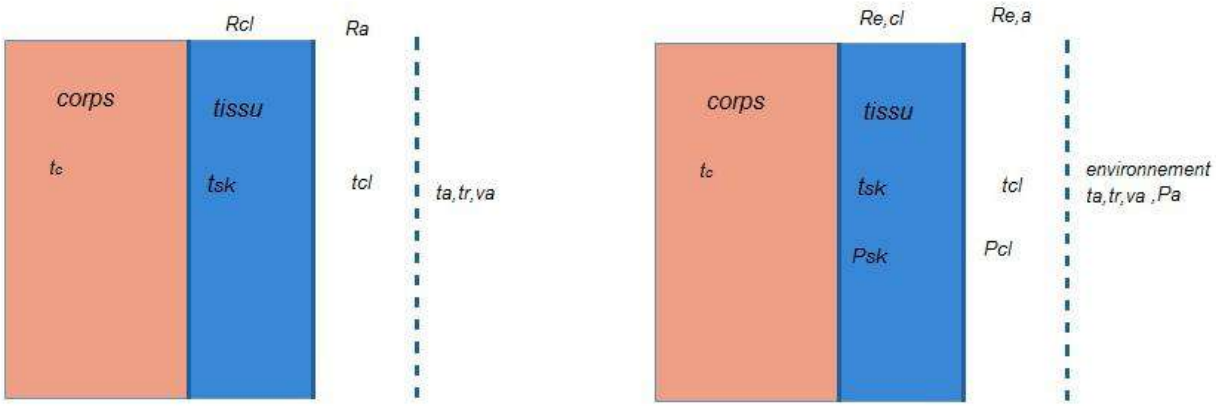


Figure3. 3 Les modèles simples du comportement thermique des vêtements. (à gauche le modèle à un seul paramètre : l'isolement thermique et à droite le modèle à deux paramètres : l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation)

3.6.1 L'unité clo

Les climats des régions de l'hémisphère nord ne nous permettent pas de vivre en équilibre thermique sans protection vestimentaire. [5]

Supposons en effet qu'à 21°C de température ambiante en air calme, l'Homme ait une température cutanée moyenne de 33,4°C. Il existerait donc un écart thermique de 12,4 K entre sa peau et l'environnement. Or, l'équilibre thermique de l'individu au repos assis suppose qu'il ne perde, par convection et rayonnement, pas plus que son métabolisme, ici de l'ordre de 44 $W \cdot m^{-2}$ quand on a déduit, des 58 $W \cdot m^{-2}$ du repos, les pertes convective et évaporatoire liées à la respiration et qui représentent 14 $W \cdot m^{-2}$.

La résistance totale à produire pour ne perdre que ces 44 $W \cdot m^{-2}$ restant à éliminer est donc $\frac{12,4}{44}$ de soit 0,28 $K \cdot m^{2} \cdot W^{-1}$.

Cet isolement de 0,28 $K \cdot m^{2} \cdot W^{-1}$ correspond à l'isolement total I_t , qui est la somme de deux isolements : l'isolement de la couche limite d'air (I_a) et l'isolement vestimentaire (I_{cl}). La poursuite du calcul implique la connaissance des coefficients d'échange de chaleur sensible par convection et par rayonnement En air calme, le coefficient h_{co} est de 3,8 $W \cdot m^{-2} \cdot K_{-1}$ et le coefficient h_r est, pour l'homme assis, de 4,2 $W \cdot m^{-2} \cdot K{-}1$.

I_a vaut donc :

$$I_a = \frac{1}{h_{co} + h_r} = \frac{1}{3,8 + 4,2} = \frac{1}{8} = 0,125 \text{ k. m}^2\text{. W}^{-1}$$

A l'équilibre supposant la valeur de I_t égale à 0,28 $K \cdot m^2 \cdot W^{-1}$, on déduit que l'isolement vestimentaire nécessaire est :

$$I_{cl} = I_t - I_a = 0,28 - 0,125 = 0,155 \text{ K.m}^2\text{.W}^{-1}$$

3.6.2 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, E_{max} sont réduits. Les facteurs de réductions sont fonction, d'une part, des coefficients de convection thermique h_c et de rayonnement thermique h_r et, d'autre part, de l'isolement thermique effectif du vêtement I_{cle} :

$$F_{cl} = 1 / [1 + (h_c + h_r)\, I_{cle}] \qquad (2.31)$$

$$F_{pcl} = 1 / [1 + 0,92\, h_c\, I_{cle}]$$

$$I_{cle} = I_{cl} - [(1 - 1/f_{cl}) / (h_c + h_r)]$$

Ou encore :

$$F_{cl} = 1 / [1 + 0,155(h_c + h_r)\, I_{cl}]$$

$$F_{pcl} = 1 / \left[1 + 0,155 h_e \frac{I_{cl}}{i_m}\right]$$

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}/A_D)). Le facteur f_{cl} est en première approximation fonction d'I_{cl} :

$f_{cl} = 1 + 1,290\, I_{cl}$ si $I_{cl} \leq 0,078$ m².K/W

$f_{cl} = 1 + 0,645\, I_{cl}$ si $I_{cl} > 0,078$ m².K/W

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 3.3), soit sur la base des isolements thermiques intrinsèques I_{cli} , de divers éléments vestimentaires (tableau 3.4). Ces deux tableaux sont extraits de la norme ISO 7730. I_{cl} est obtenu par somation $\sum I_{cli}$ des isolements élémentaires au moyen de l'équation :

$$I_{cl} = 0{,}82 \sum I_{cli} \qquad (2.32)$$

3.6.3 Resistance vestimentaire à l'évaporation

Actuellement, l'ISO 7933 et l'ISO 9920 se réfèrent à deux méthodes pour la détermination de la résistance évaporatoire des vêtements :

- L'utilisation de F_{pcl}, facteur de réduction des échanges évaporatoires par les vetements
- L'utilisation de i_m, l'indice de perméabilité vestimentaire qui fourni une relation entre les résistances évaporatoire et de chaleur sèche des habillements [22]

Tableau 3. 3 Isolements thermiques intrinsèques d'ensembles vestimentaires caractéristiques lcl (en m-. K/W). [4]

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 3. 4 Isolements thermiques intrinsèques d'éléments vestimentaires lcil (en m2. K/W) [4]

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

a) L'utilisation de F_{pcl}

L'ISO 7933 suggère l'utilisation de Fpcl pour le calcul de la résistance à l'évaporation des vêtements Re,cl, comme un facteur réducteur des échanges de chaleur latente pour une personne vêtu comparé au cas d'une personne nu :

$$R_{e,cl} = \frac{1}{(h_e \cdot F_{p\square l})} \qquad (2.33)$$

avec

$h_e = 16{,}7 . h_c$ (définit précédemment)

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 2,22 h_c \left(I_{cl} - \frac{\left(1 - \frac{1}{f_{cl}}\right)}{(h_c + h_r)} \right)} \quad (2.34)$$

Comme l'isolement thermique I_{cl} reste constant dans la description courant des vêtements, F_{pcl} dépend essentiellement du coefficient convectif qui change évidement quand la personne commence a bouger ou quand il y a courant d'air. Le tableau, quelque exemple de calcul sont présentés, montrant la relation entre F_{pcl} et $R_{e,cl}$.

Le tableau montre que en prenant une valeur constant de I_{cl} et une augmentation de la vitesse du vent le résultat est une décroissance de F_{pcl}. Comme on s'attend à l'augmentation du transfert de la chaleur latente avec le vent c'est en accord avec la définition du F_{pcl} (facteur réducteur de transfert de chaleur latente) contrairement aux attentes. Uniquement due à la forte augmentation de h_e, la valeur de $R_{e,cl}$ diminue avec le vent.

Prenant la définition générale de F_{pcl} :

$$F_{pcl} = \frac{R_{e,cl}}{R_a + R_{cl}} = \frac{\text{Ξ}_a}{R_{e,cl}} \quad (2.35)$$

avec

R_a résistance à la vapeur à la limite de la couche d'air

Tableau 3. 5 détermination de Fpcl et Re,cl selon ISO 7933, avec variation du vent Va [22]

v_a (m/s)	h_c (W/m².°C)	h_r (W/m².°C)	I_{cl} (m².°C/W)	I_T (m².°C/W)	f_{cl}	F_{cl}	h_e (W/m²kPa)	$R_{e,cl}$ (m²kPa/W)
0.2	4.54	5.0	0.16	0.24	1.3	0.431	75.8	0.031
0.5	6.10	5.0	0.16	0.23	1.3	0.355	101.9	0.028
2.0	13.19	5.0	0.16	0.20	1.3	0.194	220.2	0.023
4.0	19.99	5.0	0.16	0.19	1.3	0.134	333.5	0.022

b) L'approche par i_m

Dans l'ISO 9920 la dérivation de $R_{e,cl}$ à l'aide de l'indice de perméabilité i_m est décrit :

$$R_{e,cl} = \frac{I_T}{i_m \cdot L} = 0,\frac{06}{i_m}\left(\frac{I_a}{f_{cl}} + I_{cl}\right) \quad (2.36)$$

avec

I_T isolement thermique total incluant la couche d'air avoisinante, clo

L nombre de Lewis L=16.7 °C.kPa^{-1}

I_{cl} isolement vestimentaire intrinsèque, clo

I_a isolation de la couche d'air adjacente

f_{cl} facteur d'habillement

ISO 9920 fournit également des valeurs de i_m pour certaines vêtements. En utilisant cette approche pour la détermination de la R_T dans la norme ISO 7933, des changements dans la résistance thermique des vêtements seraient directement traduit par une variation équivalente en R_T. Pour l'exemple présenté dans le tableau 10, la réduction de la résistance à la chaleur sèche (I_T) de 21% se traduirait par une réduction de 21% en R_T.

$$\mathbf{i_m = \frac{I_t}{R_T . L} = \frac{h_e}{\square . h_{tot}}} \qquad (2.37)$$

I_m est donné par Woodcock :

$$i_m = \frac{h_e}{L . h_c} \qquad (2.38)$$

Avec

h_e coefficient de transfert de chaleur evaporatif

Chapitre IV : Modélisation du confort thermique

4.1. Introduction

En se rendant compte de l'importance de l'effet du confort thermique sur la santé et la productivité des hommes, de nombreux travaux de recherche ont été menés dans ce domaine dès le début du siècle dernier. Ces travaux sont effectués dans des chambres climatiques ou in situ, sur des mannequins ou avec des êtres humains. Ils visent à identifier les conditions de confort et d'acceptabilité des ambiances thermiques sans chercher à comprendre les mécanismes mis en jeu. A la suite de ces travaux, plusieurs indices de confort thermique ont été développés en se basant sur des modèles du confort thermique.

Dans ce chapitre, nous procédons à étudier l'effet des paramètres de base les plus importants (environnementaux et physiologiques) qui participent au bilan thermique de l'homme et caractérisent l'état de confort thermique à savoir :

- Le niveau d'activité du sujet (métabolisme)
- La résistance thermique vestimentaire (habillement)
- La température ambiante
- La vitesse relative de l'air
- La température moyenne radiante
- Le degré hygrométrique de l'air (humidité relative)

On va donc isoler chacun de ces paramètres pour voir l'influence qu'il a sur le modèle de confort retenus. L'analyse se fera au niveau théorique, c'est-à-dire à partir des équations définissant ce modèle. On prendra l'indice de Fanger comme modèle de référence car c'est le plus abouti et qu'il est défini par rapport au confort physiologique. 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 [38]

4.2. Modèle de Fanger

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 [23]. Elle a servi pour développer la norme française et internationale 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 [10].

La méthode de Fanger consiste à déterminer de façon analytique les échanges de chaleur entre le sujet et l'environnement [33] 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 une échelle à 7 points de sensation thermique de l'ASHRAE [34]

+3 : Très chaud **+2 : Chaud** **+1 : Légèrement chaud**

0 : Neutre, ni chaud ni froid

-1 : Légèrement froid **+2 : Froid** **+3 : Très froid**

Le PMV peut être calculé à partir des six paramètres de base du confort thermique (les quatre grandeurs physiques de l'ambiance thermique, avec l'activité et la vêture des sujets). Comme le PMV a été déterminé dans des conditions stationnaires (chambres climatiques), son application reste limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas, ou peu, dans le temps. Si une ou plusieurs variables fluctuent faiblement, le PMV peut être utilisé à condition de considérer leurs moyennes pondérées en fonction du temps pendant la période de 1 h précédente.

$$PMV = [0{,}303\exp(-0{,}036M) + 0{,}028]\,[(M - W) - 3{,}05 \times 10^{-3}\,\{5733 - 6{,}99(M - W) - P_{a_{H=0}}\} - 0{,}42\,\{(M - W) - 58{,}15\} - 1{,}7 \times 10^{-5}\,M\,(5867 - P_{a_{H=0}}) - 0{,}0014\,M\,(34 - T_a) - 3{,}96 \times 10^{-8}\,f_{cl}\,(T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) - f_{cl}\,h_c\,(T_{cl} - T_a)] \quad (4.1)$$

Ou T_{cl}, température du vêtement, est approchée par le calcul itératif suivant :

$$T_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028\,(M\text{-}W) - 0{,}155\,I_{cl}\,[3{,}96 \times 10^{-8}\,f_{cl}\,(T_{cl}^4 - \bar{T}_r^4) + f_{cl}\,h_c\,(T_{cl} - T_a)] \quad (4.2)$$

Avec :

$$h_c = \begin{cases} 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} & for \quad 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12{,}1.\sqrt{v_{ar}} \\ 12{,}1.\sqrt{v_{ar}} & for \quad 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12{,}1.\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$f_{cl} = 1{,}00 + 0{,}2\,I_{cl} \quad \text{pour } I_{cl} \leq 0{,}5 \text{ clo}, \quad (4.4)$$

$$f_{cl} = 1{,}05 + 0{,}1\,I_{cl} \quad \text{pour } I_{cl} > 0{,}5 \text{ clo}$$

Pour déterminer l'état thermique du corps humain et la zone de confort, on a utilisé la deuxième relation du model de Fanger. 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.

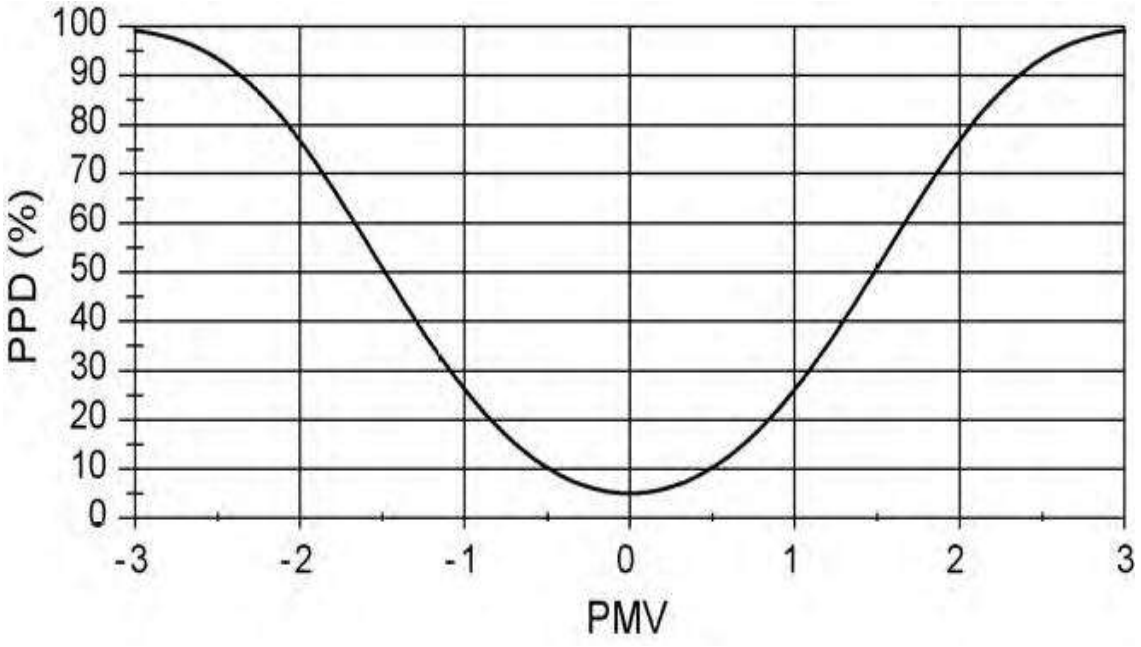


Figure 4. 1 Pourcentage prédit d'insatisfaits(PPD) en fonction du Vote moyen prédit (PMV).

$$PMV = [0{,}303.\exp(-0{,}036.M) + 0{,}028].L \quad (4.5)$$

$$L = M - W - E_{dif} - E_{rsw,req} - E_{res} - C_{res} - R - C \quad (4.6)$$

$$PPD = 100 - 95.\exp[-(0,\ 03353.PMV^4 + 0,\ 2179.PMV^2)] \quad (4.7)$$

Avec

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

PMV vote moyen prévisible à l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE

PPD pourcentage prévu des insatisfaits, %

Cet indice n'est utilisable que sous certaines conditions de métabolisme, d'isolement vestimentaire, de température d'air, de rayonnement et de vitesse d'air :

- **M** : [46-232] W/m²
- **Icl** : [0-0,31] m². °C/W
- **Ta** : [10-30] °C
- **Tr** : [10-40] °C
- **Va** : [0-1] m/s

Ce modèle est applicable seulement pour des situations statiques.

$$L = M - W - Edif - E_{rsw} - Eres - Cres - (R + C) \quad (4.8)$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation, par diffusion à travers la peau [W/m²]:

$$E_{dif} = 3.05 \,.\, 10^{-3} \,.\, [5.733 - 6.\square 9.(M - W) - P_a] \quad (4.9)$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation respiratoire [W/m²]:

$$E_{res} = 1.7.10^{-5}.M.(\square 867 - P_a) \quad (4.10)$$

Flux de chaleur échangé par convection respiratoire [W/m²]:

$$C_{res} = 0.0014.M.(34 - T_a) \quad (4.11)$$

Flux de chaleur latente échangé par évaporation due à la sudation régulatrice [W/m²]:

$$E_{rsw} = 0.42.[(M - \square) - 58.15] \quad (4.12)$$

Flux de chaleur échangé par rayonnement [W/m²] :

$$R = 3.96.10^{-8}.f_{cl}[(T_{cl}+273)^4 - (T_r+273)^4] \quad (4.13)$$

Flux de chaleur échangé par convection [W/m²]:

$$C = f_{cl}.h_c.(T_{c\square} - T_a) \quad (4.14)$$

$$C + R = I \quad (4.15)$$

La température moyenne superficielle du vêtement [°C] :

$$T_{cl} = 35.7 - 0.028(M - \square) - I_{cl} \times I \ . \quad (4.16)$$

Le facteur d'habillement : Rapport de la surface du corps habillé à la surface du corps nu :

$I_{cl} = 0.155.$ clo

$$f_{cl} = 1 + 0.2.I_{cl} \quad \text{si } I_{cl} < 0.078$$

(4.17)

$$f_{cl} = 1 + 0.1.I_{cl} \quad \text{si } I_{cl} > 0.078$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection [W/m². °C]

$$h_{cn} = 2.38\left[(T_{cl} - \square_a)^{0}.25\right) \quad \text{si } V_a < 0.1\frac{\square}{s} \quad (4.18)$$

$$h_{cf} = 12.1\sqrt{V_a} \quad \text{si } V_a > \square.1$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} & pour \quad 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} > 12,1.\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1.\sqrt{v_{ar}} & pour \quad 2.38.|T_{cl} - T_a|^{0,25} < 12,1.\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (4.19)$$

La pression saturante de vapeur d'eau [kPa] :

$$Ps = \exp[16.65 - 4030.18/(Ta+235)] \quad (4.20)$$

La pression partielle de vapeur d'eau [Pa] :

$$Pa = RH.10.Ps \quad (4.21)$$

4.3. Influence des différents paramètres

4.3.1. Effet métabolique

Le niveau d'activité influence le confort thermique individuel à travers la production de chaleur métabolique interne. La figure (4.1) (a) et (b) montre l'effet du métabolisme sur les indices de confort de Fanger (PMV et PPD). Comme le montre la figure, une augmentation de l'activité conduit directement à une production métabolique plus importante et induit indirectement une augmentation de la vitesse relative de l'air (par déplacement). Dans ces conditions, pour assurer le confort, on se doit d'abaisser la température ambiante ou d'abaisser le « clo » en se découvrant, ceci afin de permettre une évacuation du surcroît d'énergie produite par l'activité métabolique.

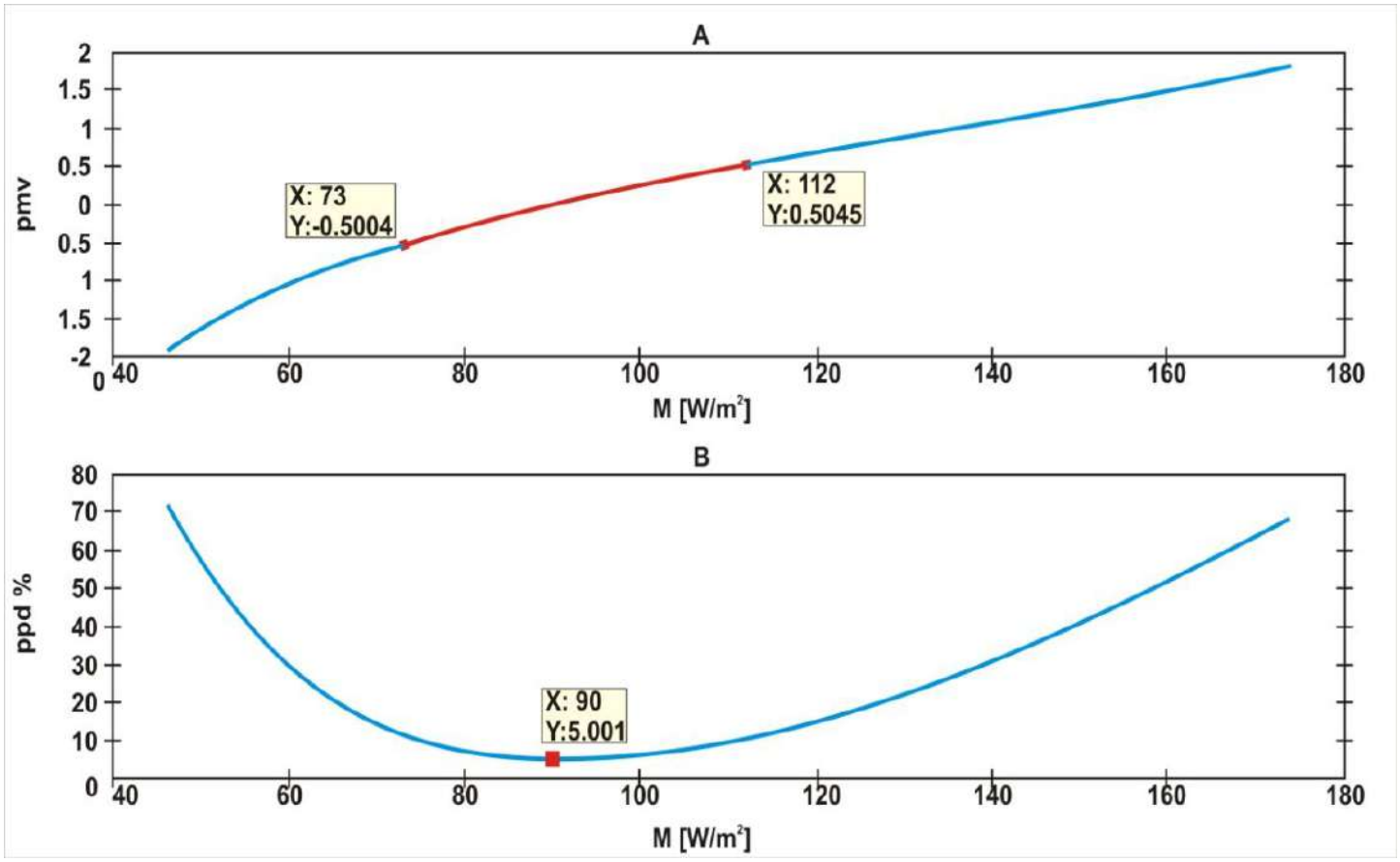


Figure 4. 2 Variation de PMV et PPD en fonction du métabolisme (Icl=0.7clo, ta=28°C, HR=50%, va=0.2m/s, w=0)

4.3.2. Effet de l'isolement vestimentaire (clo)

Le vêtement à une importance capitale dans la notion de confort et son action est souvent multiple. Il peut nous protéger du froid et du chaud par son pouvoir isolant et du rayonnement trop fort du soleil en pays chaud. On a vu que celui-ci influençait différentes équations (échange convectif et radiatif notamment). La figure (IV.2) (a) et (b) montre l'effet de l'isolement vestimentaire sur les indices de confort de Fanger (PMV et PPD). On peut à partir de ces graphes définir quel est l'habillement idéal dans ces conditions. C'est l'abscisse du point d'intersection entre la courbe considérée et la droite y = 0 du PMV correspondant à une valeur de PPD minimale. Ainsi pour Ta=28°C, l'habillement adapté est de 0,15. Toutefois, le fait de diminuer l'habillement pour une température élevée n'est pas suffisant pour atteindre une sensation de confort.

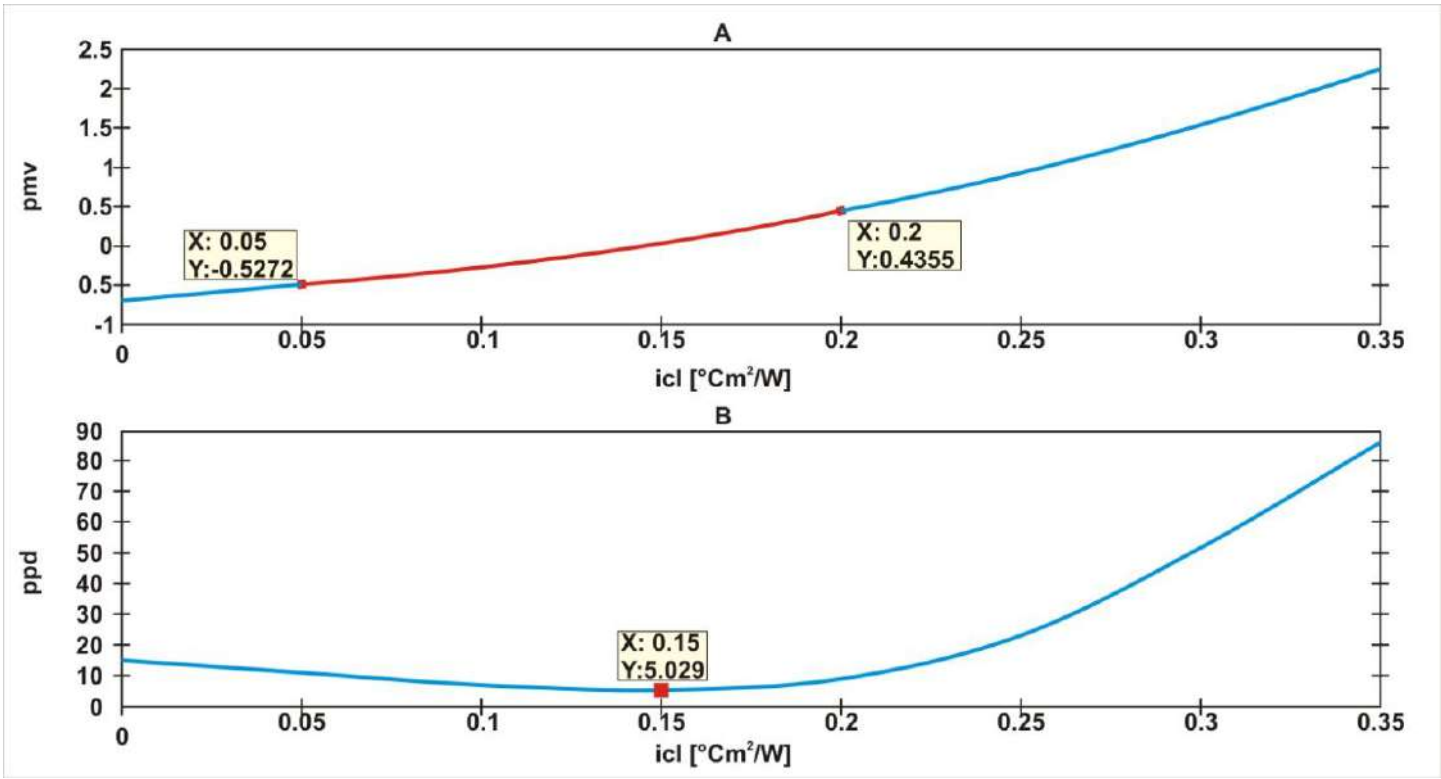


Figure 4. 3 Variation de PMV et PPD en fonction du Icl
(M=1.2 met, ta=24°C, va=0.2m/s, w=0, HR=50%)

4.3.3. La vitesse relative de l'air

La vitesse de l'air (et plus précisément la vitesse relative de l'air par rapport à l'individu) est un paramètre à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau. Comme la température de peau est presque toujours plus haute que la température extérieure, le terme convectif est un terme négatif, c'est-à-dire de refroidissement. Ainsi elle entraine un effet de froid. C'est pourquoi la sensation de température est d'autant plus élevée que la vitesse d'air est lente, et inversement, quand la vitesse d'air est plus conséquente, la température d'air perçue est plus faible. Ainsi quand la température est élevée, ce rafraichissement améliore le confort alors que quand la température est faible, il le dégrade. D'après la figure (IV.3) (a) et (b), la vitesse optimale de confort est autour de 0,2 m/s pour Ta=28°C. En pratique, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne devraient pas dépasser cette valeur. En effet, l'individu commence à ressentir le mouvement de l'air à cette vitesse, et les concepteurs de systèmes de ventilation mécanique essayent donc de ne pas la dépasser.

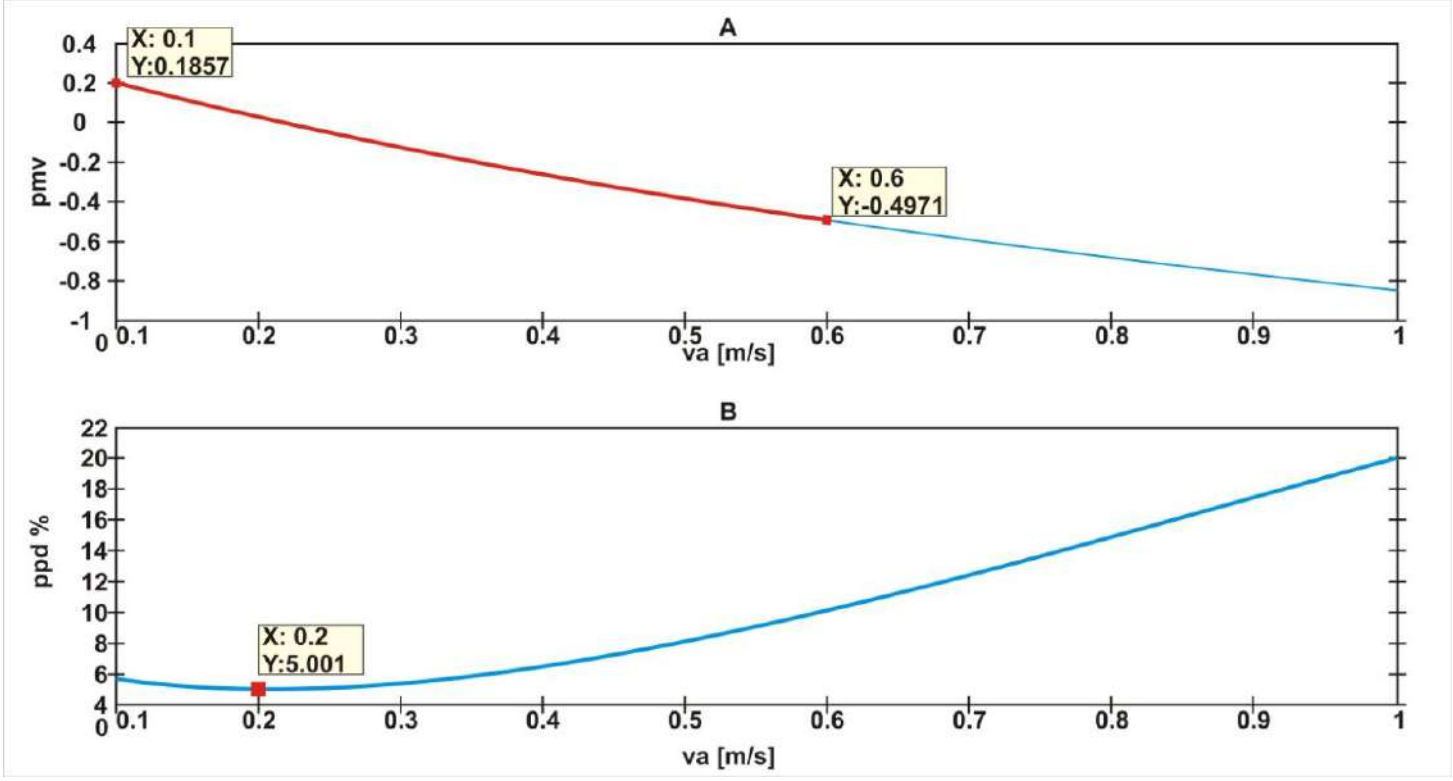


Figure 4. 4 Variation de PMV et PPD en fonction de la vitesse de l air (Icl =0.7 clo, M=1.2met, ta=24°C, w=0, HR=50%)

4.3.4. Effet de la température ambiante

La température de l'air est un paramètre très important parce qu'elle participe activement et de façon permanente aux déperditions caloriques du corps humain du fait de sa part active dans les échanges convectifs mais, seule, elle ne reflète pas parfaitement la sensation de confort. Son impact est d'autant plus grand que les vitesses de l'air et des courants sont également influentes dans cette modalité d'échange. La figure (IV.4) (a) et (b) montre l'effet de la température ambiante sur les indices de confort de Fanger (PMV et PPD). Dans ces conditions, la sensation de confort est obtenue à Ta= 28°C ce qui le cas d'un individu assis au repos, en tenue de sport par exemple

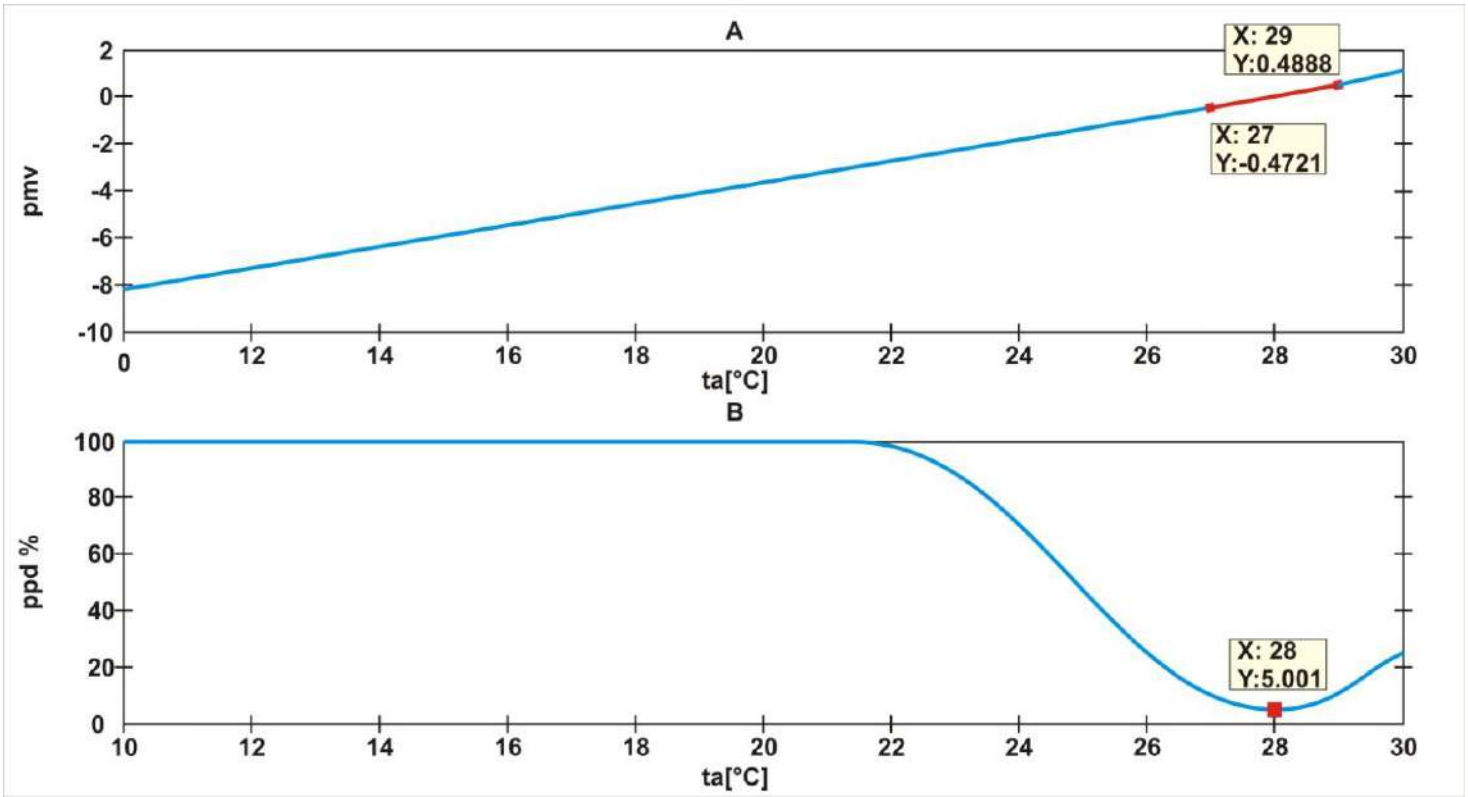


Figure 4. 5 Variation de PMV et PPD en fonction du Température ambiante (Ta)
(Icl =0.7clo, M=1.2met, va=0.2m/s,rh=50%,w=0)

4.3.5. Effet de la température moyenne radiante

La température de rayonnement correspond à la température des surfaces avec lesquelles le corps humain échange de la chaleur. Ce paramètre a une influence considérable sur le niveau de confort thermique en particulier dans les espaces ouverts urbains. D'après la figure (4.5) (A) et (B), la zone de confort est conçue pour une température moyenne radiante égale à la température ambiante (28°C). C'est le cas de Tg=Ta (pas de rayonnement). En réalité, la zone de confort optimal est principalement localisée dans l'espace Tmr > Ta ce qui implique que l'être humain est fait pour vivre dans une ambiance radiative : le soleil lui est nécessaire, ainsi que la vie en extérieur : en témoigne la vie actuelle trop sédentaire qui conduit à un attrait indéniable vers les régions ensoleillées.

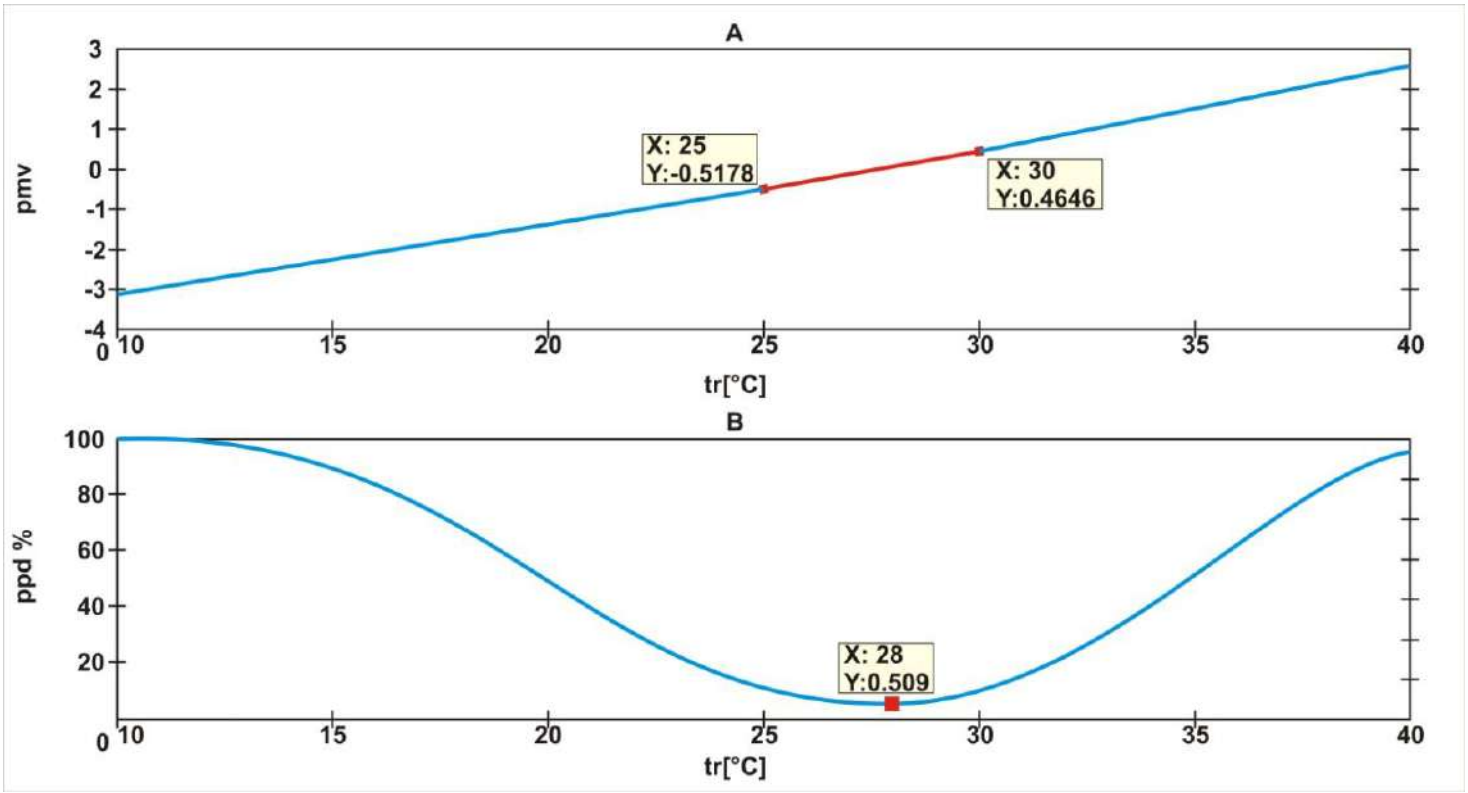


Figure 4. 6 Variation de PMV et PPD en fonction du La température moyenne radiante (Icl=0.7clo, M=1.2met, w=0, ta=28°C, HR=50 %)

4.3.6. L’effet du degré hygrométrique de l’air

L’influence de l’hygrométrie est principalement le pouvoir évaporateur de l’ambiance, caractérisé par l’écart entre la pression partielle de vapeur d’eau dans l’air et la pression de vapeur saturante au niveau cutané. Un air trop humide ne permet pas une évaporation suffisante de la sueur et dans certains cas, l’énergie excédentaire stockée ne pouvant pas être évacuée normalement par le métabolisme, il peut s’en suivre une hyperthermie. La sensation d'inconfort liée à l'humidité est aussi fonction de la température ambiante Ta puisque la puissance échangée sous forme latente croît avec cette température. La figure (4.6) (A) et (B) montre la variation des indices de Fanger pour des valeurs d’humidité comprises entre 30 et 80%. On remarque que l’humidité a relativement peu d’impact sur la sensation de confort, à condition toutefois qu’elle soit dans des limites supportables par le système respiratoire. La limite inférieure d’humidité corresponde généralement à 10 mm Hg de pression partielle de vapeur d’eau en dessous de laquelle apparaît une sensation de sécheresse des muqueuses bucco pharyngiennes. Par ailleurs, la limite supérieure est fixée à 80 % d’humidité relative au-dessus de laquelle le désagrément est dû aux condensations provoquées à ces niveaux d’humidité.

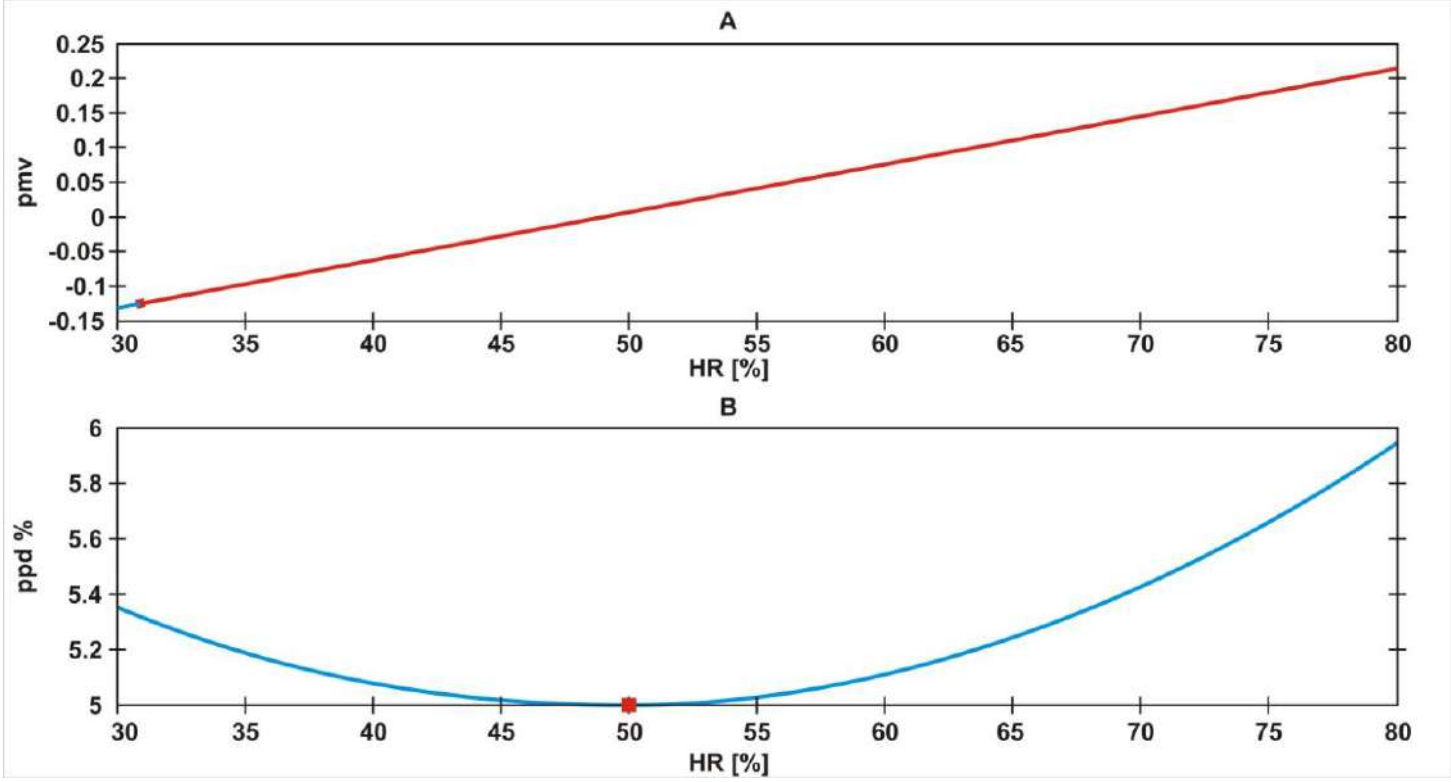


Figure 4. 7 Variation de PMV et PPD en fonction du degré hygrométrique de l’air

(Icl=0.7clo, M=1.2met, va=0.2m/s, ta=28°C, w=0)

Conclusion

Le confort thermique constitue actuellement un enjeu majeur pour l'être humain tant pour la qualité des ambiances intérieures que pour les impacts énergétiques et environnementaux dont il est responsable. Cette étude a mis en avant le fait que la sensation de confort est complexe à définir car elle dépend d'un grand nombre de facteurs qu'ils soient inhérents à la personne au sens physiologique ou psychologique ou ceux traduisant l'ambiance de la zone dans laquelle il se situe. Il est alors normal de trouver un grand nombre d'indices définis de telle manière à caractériser la sensation de confort. Après ce constat l'étude s'est alors centrée sur deux d'entre eux, les indices (PMV et PPD) de Fanger. Ces indices ont été calculés à partir des six paramètres de base du confort thermique (les quatre grandeurs physiques de l'ambiance thermique, avec l'activité et la vêture des sujets).

Bien que les résultats soient satisfaisants, l'approche analytique de Fanger simplifie empiriquement la complexité pluridisciplinaire de la notion de confort, et négligent les interactions possibles entre l'occupant et son cadre bâti. Son application reste donc limitée aux ambiances stationnaires et homogènes où les conditions ne varient pas, ou peu, dans le temps. Si une ou plusieurs variables fluctuent faiblement. En raison de ces interactions, importantes lors de conditions climatiques changeantes ou extrêmes, l'investigation systémique du confort conduit à proposer l'étude des interactions entre deux sous-systèmes complexes aux finalités différentes que sont l'occupant et le bâtiment. Cette approche fournit une nouvelle lecture du confort et des échanges de flux d'énergie, de matières et d'informations. Les différents points de vue permettent d'identifier les composants pluridisciplinaires, les variables de flux et les variables d'état, pour la construction d'un modèle dynamique du confort.

Enfin, au-delà des paramètres physiques et biologiques, l'impression de confort appartient au domaine du ressenti. Elle peut varier d'après des facteurs d'ordre psychologique ou culturel. Des études ont aussi montré que les personnes ressentent un niveau de confort thermique plus faible si elles sont gênées par des nuisances d'un autre type, comme le bruit ou l'éblouissement. En plus de ces adaptations physiologiques, l'être humain modifie son comportement face aux conditions climatiques. En situation de froid, il s'habille plus chaudement, augmente son activité (marche plus rapide) ou prend une attitude de prostration

(repli des membres sur le corps). Si au contraire le climat devient trop étouffant, il change de type de vêtement et adopte une posture corporelle plus étendue.

Références Bibliographiques

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

[2]Lin Z, Deng S. *A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—developing a thermal comfort model for sleeping environments. Building and Environment 2008*

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

[4]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*

[5]CANDAS VICTOR. *Confort thermique. In: Génie énergétique. Vol. BE 4. Paris: Techniques de l'ingénieur, 1998, p. BE 9085.*

[6]Victor CANDAS, *Directeur de recherche au Centre d'étude de physiologie appliquée (CEPA) Centre national de la recherche scientifique (UPS 858)-Strasbourg, Technique de l'ingénieur, confort thermique, 1998.*

[7]Bassam MOUJALLED, *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés, L'aspect physiologique : la thermorégulation. L'Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.*

[8]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.*

[9]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.

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

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

[12]Travailler par de fortes chaleurs en été, *disponible sure* **:** <http://www.inrs.fr/INRSPUB/inrs01.nsf/inrs01_dossier_view_view/24B79FED64472B82C1256E910059ADA7/$FILE/print.html#ancregeneralites>

[13] J. Bittel (Médecin général, ancien directeur adjoint et ancien chef de département des facteurs humains), **G. Savourey** (Médecin en chef, chef du pôle de compétence «tolérance climatique et vêtement »)**.** *Travail au froid. Centre de recherches du service de santé des Armées (CRSSA), France.2004*

[14]PARSONS KEN. *Human thermal environment. 2nd Edition. London: Taylor & Francis, 2003.*

[15]FORAY J. *Les gelures de montagne. Soins 1983.*

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

[17]BERGER Xavier. *Thermal comfort, study and code - PASCOOL report. Athènes: University of Athens, 1995.*

[18]Corinne Martinet, Jean Pierre Meyer. *Travail à la chaleur et confort thermique. INRS institut national de la recherche et la sécurité, Nancy.1999*

[19]Jacques Teller, *notion du confort thermique, Confort Thermique,Université de Liège*

[20]ANSI/ASHRAE Standard 55. *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy; 2004.*

[21]JEROME CHOUDIN, Cédric MORICE, Nadjia KECHICH, *Ambiance thermique, notion de confort thermique, Université de la Méditerranée.*

[22]G. HAVENITH, I. HOLMEÂ, E. A. DEN HARTOG et K. C. PARSONS. *Clothing Evaporative Heat Resistance -Proposal for Improved Representation in Standards and Models. Loughborough University, Department of Human Sciences, Loughborough Great Britain, 1999*

[23]Fanger PO. *Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.*

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

[25]HAMMEL (H.T.), JACKSON (D.C.), STOLWIJK (J.A.J.), HARDY (J.D.) et STROMME (S.B.). *– Temperature regulation by hypothalamic proportional control with an adjustable set-point. (1963).*

[26]OLESEN B.W et PARSONS K.C. *introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO77.* Energy and buildings, 2002.

[27]Kenneth C. Parsons. *L'ÉVALUATION DE LA CONTRAINTE THERMIQUE ET LES INDICES DE CONTRAINTE THERMIQUE. International Labour Organization. Disponible sur :* <http://www.ilo.org/safework_bookshelf/french?content&nd=857170516>

[28]Guidenr Haute Qualité Environnementale, L'information HQE. *Les modèles du confort thermique > Les modèles analytiques. Disponible sur :* <http://www.hqe.guidenr.fr/cible-8-hqe/modele-analytique-confort-thermique.php>

[29]Guidenr Haute Qualité Environmentale, L'information HQE. *La notion de confort hygrothermique > Le bilan thermique. Disponible sur : <* http://www.hqe.guidenr.fr/cible-8-hqe/confort-thermique-bilan-thermique.php *>*

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

[31]PARSONS KEN. *Heat Stress Standard ISO 7243 and its Global Application Human thermal environment. 2nd Edition. London: Taylor & Francis.Review article. Industrial Health.2006.*

[32]HENSEL (H.). *– Temperature reception and thermal comfort. In Prévision quantitative des effets physiologiques et psychologiques de l'environnement thermique chez l'Homme (éd. CNRS), Strasbourg.(1973).*

[33]FANGER (P.O.). *– Thermal Comfort, Mac Graw- Hill Book Company, New York (1973).*

[34]ASHRAE handbook, *thermal comfort. In: ASHRAE fundamentals handbook (SI). Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers (ASHRAE); 2005*

[35]Han J, Zhang G, Zhang Q, Zhang J, Liu J, Tian L, et al. *Field study on occupants' thermal comfort and residential thermal environment in a hot-humid climate of China. Building and Environment 2007*

[36] PMC, Global Health Action, *Climate change and occupational heat stress: methods for assessment, Published online 2010 November 29. Disponible sur;* http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2997731

[37] Stéphane THIERS, *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive, Thèse. Ecole nationale supérieure des mines de Paris, 2008.*

[38] AFNOR. NF EN ISO 7730 : *Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. Paris: AFNOR, 1995, 27p.*

Les normes:

[1] 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*

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

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

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

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

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

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

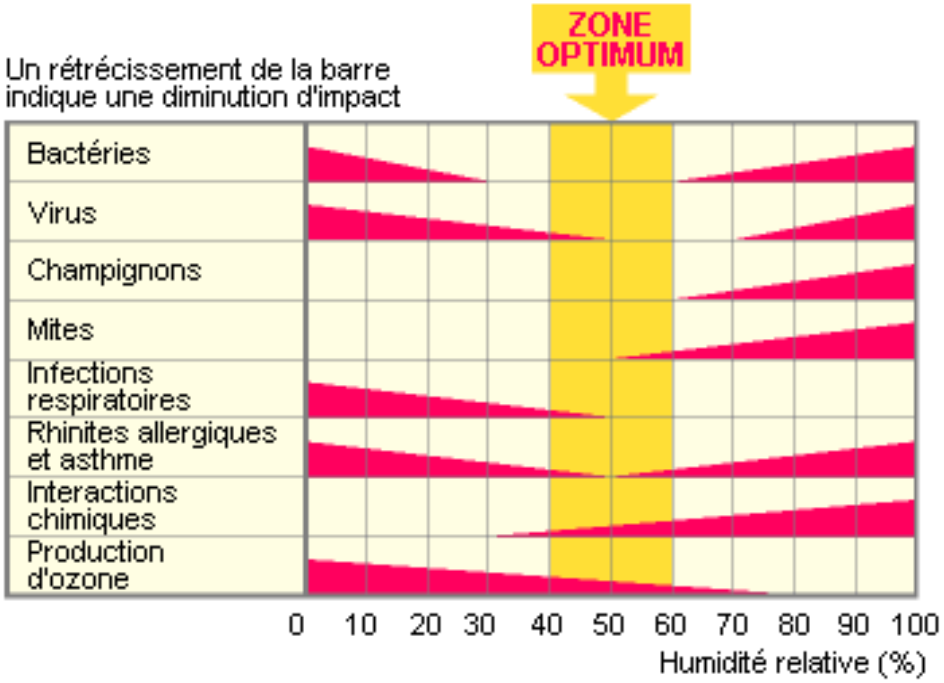
ANNEXE N°1 : Plage de taux d'humidité optimal

De faibles niveaux d'humidité (<30 %) donnent lieu à certains problèmes :

- Augmentation de l'électricité statique
- Augmentation de la concentration en poussières dans l'air, ce qui serait susceptible d'induire une augmentation de la fréquence de maladies respiratoires en hiver lorsque l'humidité de l'air est faible.

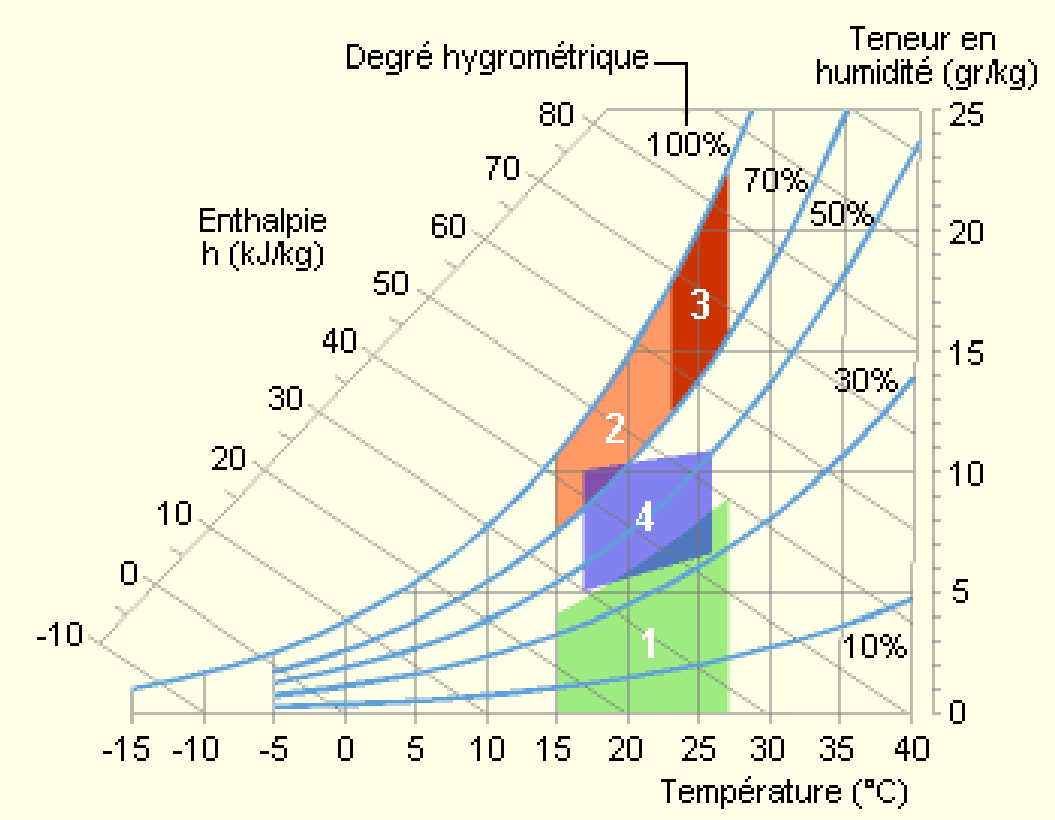
De hauts niveaux d'humidité (>70 %) donnent lieu à une croissance microbienne importante et à des condensations sur les surfaces froides.

Le diagramme ci-dessous indique, la plage de taux d'humidité ambiante optimale d'un point de vue hygiénique (D'après Scofield et Sterling) (Doc.Dri-Steem/Pacare).



ANNEXE N°2 : Plage de confort hygrothermique

Le diagramme suivant permet de déterminer la plage de confort hygrothermique (l'air humide). [37]



1. Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.

2. et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.

3. Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.

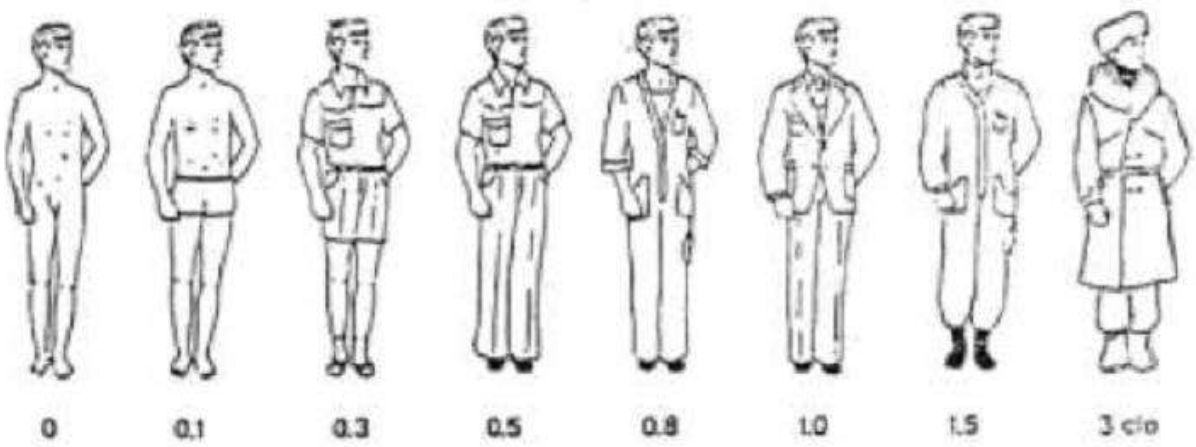
4. Polygone de confort Hygrothermique

ANNEXE N°3 : L'unité de résistance thermique des vêtements (Clo)

Le clo est l'unité de résistance thermique des vêtements. Par définition, les vêtements avec une résistance thermique de 1 clo maintiennent le confort thermique d'une personne assise dans un environnement où la température ambiante est de 21°C et la vitesse de mouvement de l'air est de 0,1 m/s.

1 clo = 0,1555 m². °C/W

Tenue Vestimentaire	Niveau d'habillement (Clo)
Nu	0
Short	0.1
Tenue tropicale	0.3
Tenue légère d'été	0.5
Tenue de travail	0.7
Tenue pour l'hiver d'intérieur	1.0
Tenue de ville traditionnelle	1.5



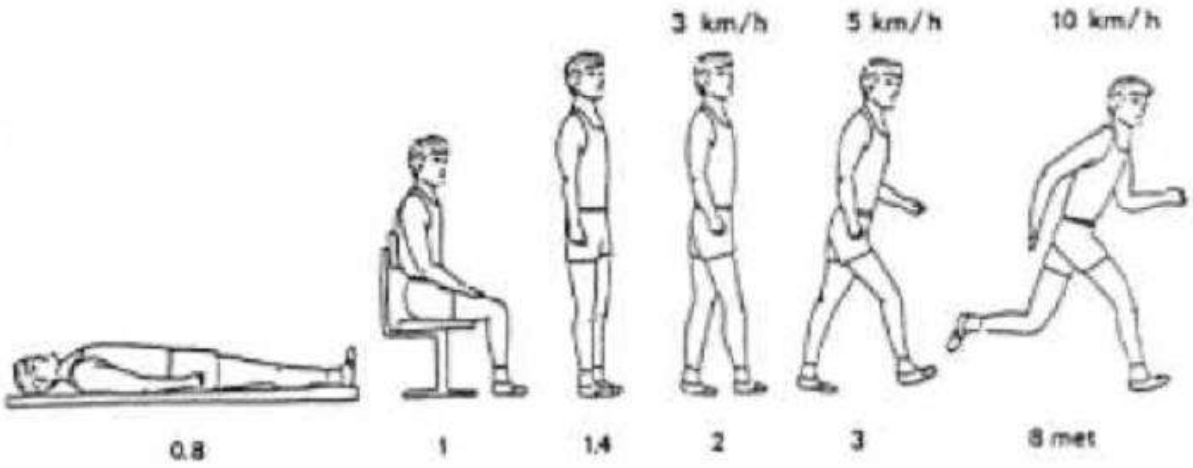
ANNEXE N°4 : L'unité d'énergie métabolique (Met)

Le met est l'unité d'énergie métabolique. Le métabolisme, est la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7°C.

$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$$

(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°5 : La pression saturante et partielle de vapeur d'eau

La pression de vapeur saturante ou tension de vapeur est la pression à laquelle la phase gazeuse de cette substance est en équilibre avec sa phase liquide ou solide. Elle dépend de la température. Certains utilisent le terme " pression de vapeur ", mais celui-ci est ambigu car il évoque la pression partielle de la vapeur.

$$\ln P_s = 13.7 - \frac{5120}{T}$$

Ou

Ps = exp[16.65-4030.18/(Ta+235)] par [ASHRAE 2004]

Dans un mélange, c'est la pression d'un des composants du mélange ; elle est égale à la pression qu'aurait ce composant s'il occupait seul, dans les mêmes conditions, tout le volume occupé par le mélange. La pression du mélange est la somme des pressions partielles de chacun des composants.

Pour l'air humide, la pression atmosphérique est la somme des pressions partielles de l'air sec et de la vapeur d'eau.

A saturation, on a la pression partielle de vapeur saturante Ps

Pv = Ps. HR. 10

PRESSION DE SATURATION (EAU) EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE

Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]	Température [°C]	Pr. de vapeur saturante [Pa]
- 29	42,17	- 9	283,93	11	1312,7	31	4495,9
- 28	46,73	- 8	309,98	12	1402,6	32	4758,5
- 27	51,74	- 7	338,19	13	1497,8	33	5034,3
- 26	57,25	- 6	368,74	14	1598,75	34	5323,9
- 25	63,29	- 5	401,76	15	1705,5	35	5627,8
- 24	69,91	- 4	437,47	16	1818,4	36	5946,6
- 23	77,16	- 3	476,06	17	1938,0	37	6281,0
- 22	85,10	- 2	517,72	18	2064,3	38	6631,5
- 21	93,78	- 1	562,67	19	2197,8	39	6998,7
- 20	**103,26**	**0**	**611,15**	**20**	**2338,8**	**40**	**7383,5**
- 19	113,62	1	657,1	21	2487,7	41	7786,3
- 18	124,92	2	706,0	22	2644,8	42	8208,0
- 17	137,25	3	758,0	23	2810,4	43	8649,2
- 16	150,68	4	813,5	24	2985,1	44	9110,7
- 15	165,30	5	872,5	25	3169,2	45	9593,2
- 14	181,22	6	935,3	26	3363,1	46	10097,6
- 13	198,52	7	1002,0	27	3567,3	47	10624,6
- 12	217,32	8	1072,8	28	3782,2	48	11175,1
- 11	237,74	9	1148,1	29	4008,3	49	11750,0
- 10	**259,90**	**10**	**1228,0**	**30**	**4246,0**	**50**	**12349,9**

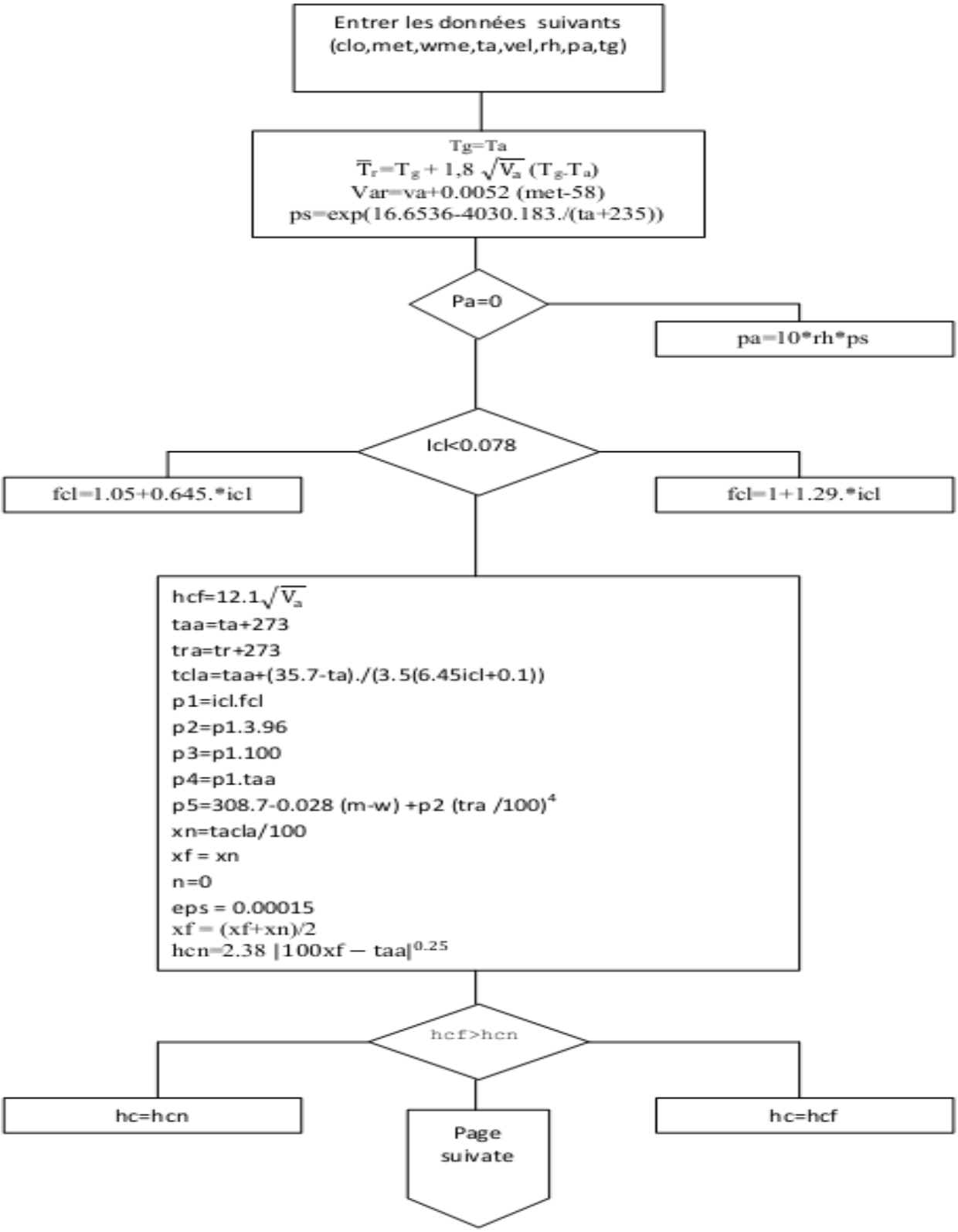
ANNEXE N°6 : La température de globe noire

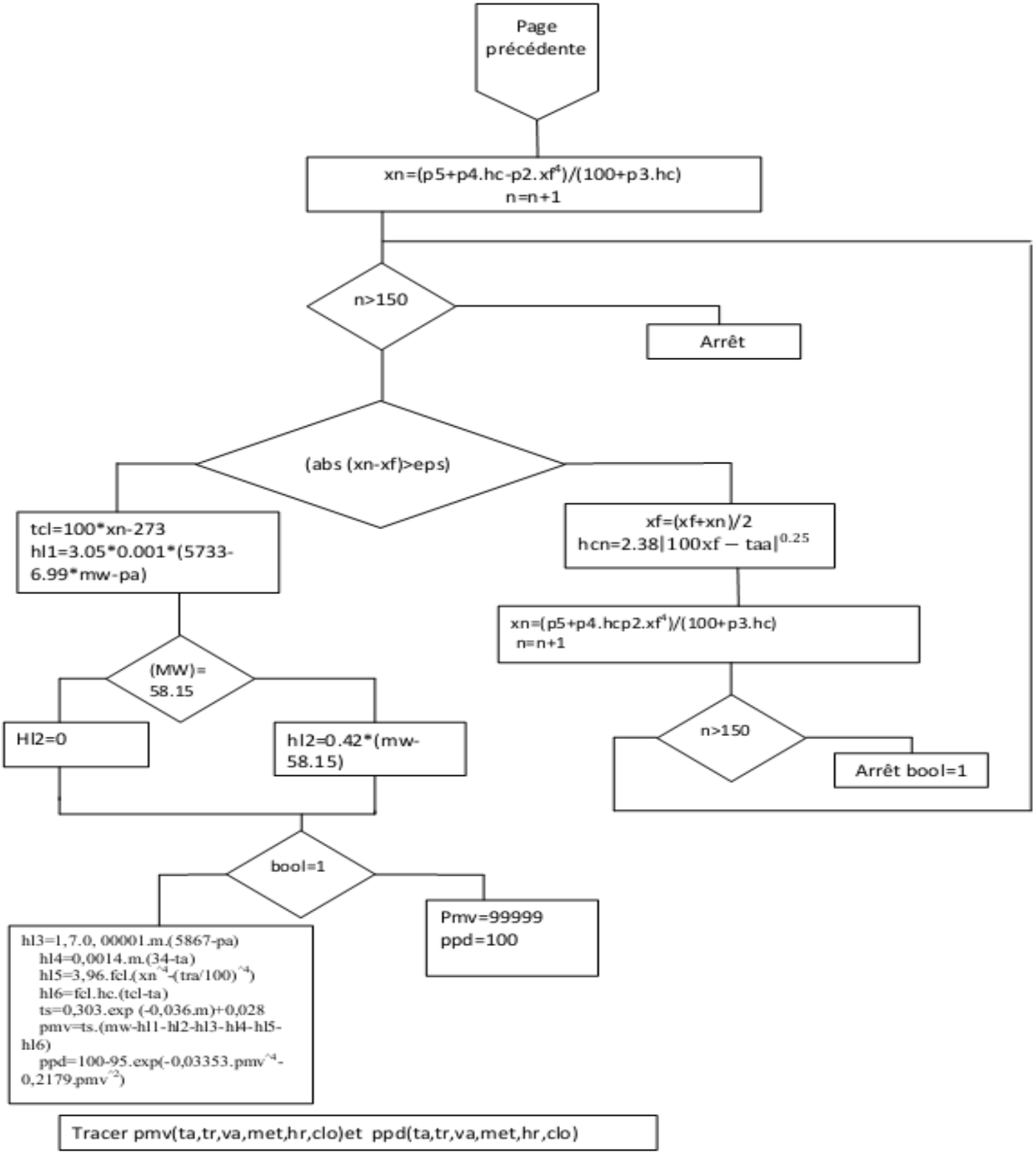
En pratique, on mesure la température du globe noir (tg °C) au moyen du thermomètre à globe noir. L'élément sensible du thermomètre est placé au centre d'une sphère complètement fermée, dans un matériau conduisant bien la chaleur (en cuivre) et peinte en noir mat, de manière à capter le plus possible le rayonnement thermique venant de l'environnement. La température de ce globe est influencée par la température de l'air, le rayonnement et la vitesse de l'air. Après 20 à 30 minutes (selon la capacité thermique de l'ensemble), le globe et le thermomètre atteignent une température d'équilibre, la température du globe noir tg.

Cette température est donc fonction du rayonnement, mai aussi des paramètres t_a et va également du diamètre du globe.



ANNEXE N°7: Algorithme de calcul




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
Hl2=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)