

Intégration des paramètres du confort dans un modèle de simulation thermique

Denis Manceau, Christian Marenne, Chantal Nicolas

▶ **To cite this version:**

Denis Manceau, Christian Marenne, Chantal Nicolas. Intégration des paramètres du confort dans un modèle de simulation thermique. [Rapport de recherche] 234/84, Ministère de l'urbanisme et du logement / Secrétariat de la recherche architecturale (SRA); Ministère de l'industrie et de la recherche; Centre de recherches méthodologiques d'architecture (CERMA). 1984. hal-01888551

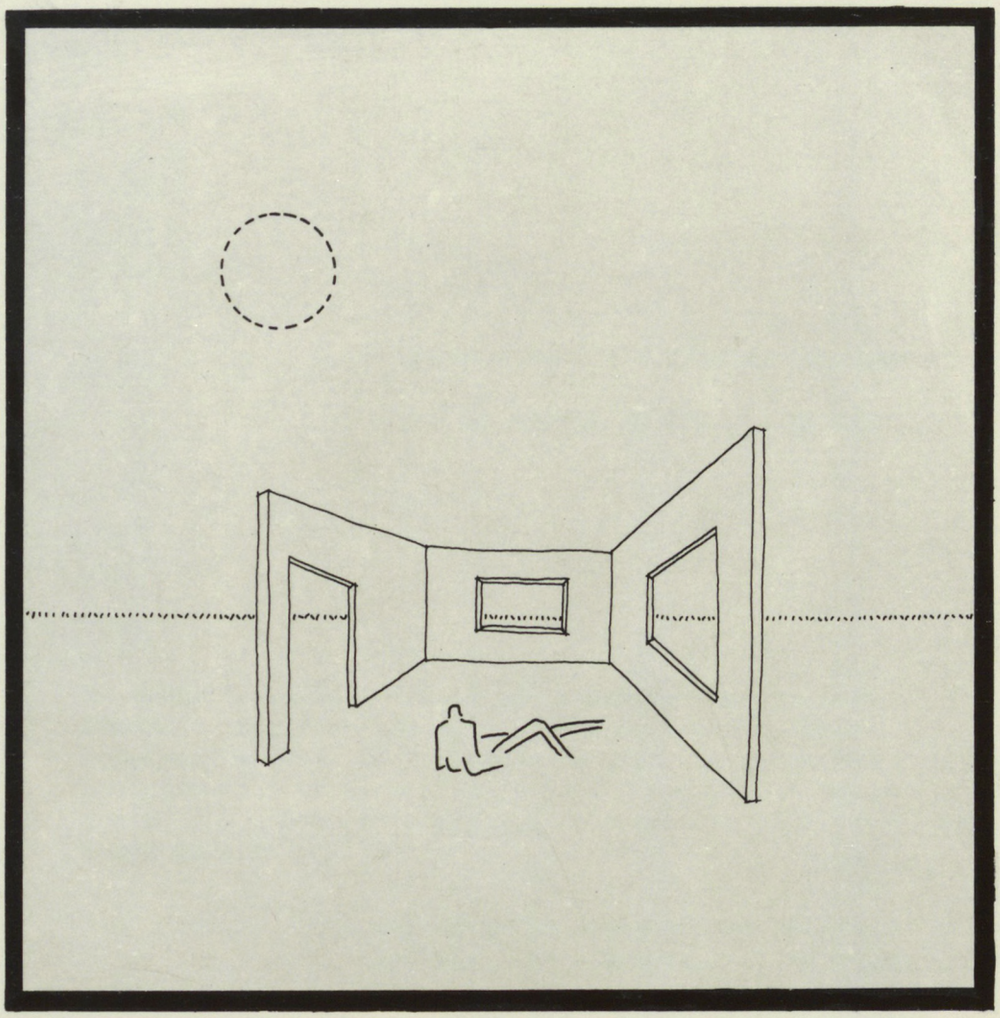
HAL Id: hal-01888551
https://hal.science/hal-01888551

Submitted on 5 Oct 2018

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

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

234



INTEGRATION DES PARAMETRES DU CONFORT DANS UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE

CERMA
CENTRE DE RECHERCHES MÉTHODOLOGIQUES D'ARCHITECTURE ET D'AMÉNAGEMENT / ASSOCIATION DE RECHERCHE AGRÉÉE DE L'UNITÉ PÉDAGOGIQUE D'ARCHITECTURE DE NANTES / RUE MASSENET 44300 NANTES (40) 59.43.24

JUIN 1984

INTEGRATION DES PARAMETRES DU CONFORT

DANS UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE

Le présent document constitue le rapport de fin d'étude d'une recherche remise au Secrétariat de la Recherche Architecturale en exécution du programme général de recherche mené par le Ministère de l'Urbanisme et du Logement avec le Ministère de l'Industrie et de la Recherche. Les jugements et opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que leurs auteurs.

(Contrat n° 83 01315 00 223 75 01
Exercice 1983 - Chapitre 57.57 - Article 45)

RAPPORT CERMA N° 52

C.E.R.M.A. - Association de Recherche agréée
de l'Unité Pédagogique d'Architecture de NANTES
Rue Massenet - 44300 NANTES
Tél. (40) 59.43.24
(40) 59.54.28

Ont participé à cette recherche pour le CERMA :

Denis MANCEAU	Architecte
Christian MARENNE	Architecte
Chantal NICOLAS	Secrétaire-documentaliste

S O M M A I R E

0 - APPROCHE DU CONFORT THERMIQUE
BIBLIOGRAPHIE

1 - LE COMPORTEMENT PHYSIOLOGIQUE DE L'HOMME FACE AU MILIEU THERMIQUE

1.1. Le métabolisme thermique
1.2. Les mécanismes thermorégulateurs
1.3. Niveaux d'effets physiologiques du milieu thermique sur l'homme
1.4. L'acclimatement
1.5. Echanges de chaleur sur l'organisme et le milieu

2 - ELEMENTS D'ECHANGES DE CHALEUR ENTRE L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE

2.1. Expression du bilan thermique
2.2. Les échanges de chaleur radiatifs
2.3. Les échanges de chaleur convectifs
2.3.1. Rôle de la température cutanée
2.3.2. Température de surface des vêtements
2.4. Les échanges de chaleur par conduction
2.5. Les échanges de chaleur par évaporation cutanée
2.5.1. Evaporation de la sueur
2.5.1. Evaporation inéluctable
2.6. Les échanges par convection respiratoire
2.7. Les échanges par évaporation respiratoire
2.8. Diagramme de l'air humide
2.9. Echange de chaleur en espaces extérieurs

3 - MODELISATION DES ECHANGES THERMIQUES

3.1. Présentation du logiciel **CONFOR**

3.2. Sous-programme du logiciel **CONFOR**

3.3. Procédures

3.4. Etude de cas - homéothermie
- influence des paramètres
- variation TMR - Tair

4 - LA SENSATION DE CONFORT

4.1. Influence du paramètre temps

4.2. Confort thermo-hygrométrique subjectif

4.3. Environnement total

4.4. Indices de confort

4.5. Evaluation du confort thermique

4.6. Aspect de l'inconfort

4.7. La sensation de confort et la température moyenne cutanée

5 - CONCLUSION

APPROCHE DU CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique est un phénomène complexe dont la maîtrise requiert la prise en compte de facteurs physiologiques, physiques et psychologiques.

J.J. VOGT (Centre d'Etudes Bioclimatiques - STRASBOURG) définit les conditions ambiantes confortables comme celles pour lesquelles l'homme peut maintenir constantes ses températures corporelles avec une mise en jeu agréable des mécanismes de lutte contre le chaud ou de lutte contre le froid (Réf. 7)

Pour un individu donné, le concept de confort thermique peut donc être caractérisé par l'état de satisfaction (sensation de bien-être) avec les conditions d'environnement thermique. Bien entendu, les gens sont différents, biologiquement et psychiquement, et si des individus se trouvent soumis aux mêmes conditions thermiques, dans une même pièce, il n'est normalement pas possible de les satisfaire tous en même temps. Toutefois, on peut créer un climat optimal dans un local, c'est à dire des conditions dans lesquelles le pourcentage maximal d'individus est dans un état de confort thermique (FANGER opte pour un pourcentage minimum d'occupants satisfaits égal à 80 % pour définir les ambiances de confort) (Réf. 8)

Ce type d'approche nécessite un grand nombre d'expérimentations, sur le terrain ou en chambre climatique, pour analyser ensuite la perception du confort.
Si l'on considère l'aspect physique du confort, on peut assimiler l'être humain à une machine thermique dont on va déterminer la réponse face à un environnement climatique. Le bilan des échanges indique si le sujet est en conditions de stockage ou de perte d'énergie.
Son annulation, permise par le jeu des paramètres les uns par rapport aux autres, aboutit alors à la détermination de situation de confort physique (homéothermie).

Les physiologues, quant à eux, s'intéressent depuis longtemps à la machine thermique humaine, mais c'est pour eux l'aspect médical qui était principalement retenu. Leurs recherches ont été souvent menées dans des conditions particulières d'ambiance et pour des raisons de connaissance des limites de résistance de l'être humain amené à assurer des travaux dans ces ambiances.

Animées par des préoccupations d'ordre énergétique, des équipes de recherche ont élaboré des logiciels visant à évaluer le comportement thermique d'un bâtiment.
Ces méthodes ont pour but d'estimer les puissances à fournir pour la période de chauffage d'une part, mais aussi à dépister, voire à quantifier d'éventuelles périodes de surchauffe (mi-saison ou été) au travers des variations de température dans des dispositifs solaires tels que les serres.
Leur finalité est donc de déterminer les consommations énergétiques tout en maintenant des conditions de confort intérieur sur l'ensemble de l'année ; s'il y a surchauffe, il faut pouvoir estimer si les conditions ainsi créées sont acceptables. Dans tous les cas, le paramètre permettant de juger du confort intérieur est la température.
Cependant, si la température d'air demeure un paramètre important, elle s'avère toutefois insuffisante pour définir une ambiance de confort.

Dans cette étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'aspect physique du confort, sur la base notamment des travaux de J.C. DEVAL et X. BERGER du C.N.R.S. de Strasbourg.

Certains paramètres tels que la température d'air, la température radiante ou la vitesse d'air seront déduits directement du programme de simulation thermique mis au point au C.E.R.M.A. ; ces paramètres considérés alors comme connus à un instant donné, nous nous attacherons à calculer les échanges thermiques sur un sujet, afin de voir si, à cet environnement thermique, on peut adjoindre le critère de "physiquement confortable" (bilan nul) et, si tel n'est pas le cas, à voir quels sont les paramètres sur lesquels on peut jouer et leur valeur pour aboutir à une situation d'homéothermie.

Les bornes des paramètres sont choisies pour correspondre au climat tempéré (latitudes voisines de 47° N).
Une extension du programme aux climats chauds nécessiterait des modifications au niveau des échanges par évaporation cutanée, en introduisant notamment la notion de mouillure.

L'analyse bibliographique effectuée en première partie de l'étude présente les approches de différentes équipes de recherche : MILLER-CHAGAS, GIVONI, OLGYAY, DEVAL, COLLOT, FANGER, GRIVEL, Mc INTYRE, etc.
Les recalages effectués à chaque étape de l'élaboration du modèle montrent les concordances entre les résultats obtenus et ceux publiés.

BIBLIOGRAPHIE

1 - CONTROLE DE L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE
P. MILLER-CHAGAS - 1975-1976

2 - L'HOMME, L'ARCHITECTURE ET LE CLIMAT
B. GIVONI - 1969

3 - DESIGN WITH CLIMATE Victor OLGYAY - 1967

4 - LE CONFORT DANS LES ESPACES EXTERIEURS - ANALYSE MICROCLIMATIQUE
C. SACRE - 1983 - C.S.T.B.

5 - LE CONFORT THERMIQUE EN CLIMAT TEMPERE
J.C. DEVAL - 1983 - C.N.R.S.

6 - MESURE D'UNE AMBIANCE THERMIQUE ET DE SES EFFETS SUR L'ETRE HUMAIN
G. COLLOT - 1983 - SFT

7 - BASES PHYSIOLOGIQUES DE LA ZONE DE CONFORT THERMIQUE
J.J. VOGT - C.E.S. STRASBOURG

8 - LES EXIGENCES DU CONFORT THERMIQUE
P.O. FANGER

9 - AMBIANCES DE CONFORT DEVAL ET BERGER - 1983 - L.E.S. VALBONNE

10 - ASPECTS PSYCHOLOGIQUES DU CONFORT THERMO-HYGROMETRIQUE CHEZ L'HOMME EVEILLE M.F. GRIVEL - 1973

11 - NEUTRALITE THERMIQUE ET CONFORT THERMIQUE
Y. HOUDAS - 1973

12 - LA NOTION DE CONFORT - ISOLATION THERMIQUE ET REGULATION
M. WOLF - 1972

13 - CONFORT THERMIQUE ET TRAVAIL M. CABANAC - 1976

14 - ASPECTS ACTUELS DES PROBLEMES DE CONFORT D'ETE

M. BONHOMME - 1976

15 - EVALUATION DU CONFORT THERMIQUE DECLARE EN SITUATION REELLE

F. GRIVEL - CEB - STRASBOURG - 1980

16 - INDOOR CLIMATE

Mc INTYRE - 1980

1 - LE COMPORTEMENT PHYSIOLOGIQUE DE L'HOMME FACE AU MILIEU THERMIQUE

1.1 Le métabolisme thermique

1.2 Les mécanismes thermorégulateurs

1.3 Niveaux d'effets physiologiques du milieu thermique sur l'homme

1.4 L'acclimatement

1.5 Echanges de chaleur entre l'organisme et le milieu

1 - LE COMPORTEMENT PHYSIOLOGIQUE DE L'HOMME FACE AU MILIEU THERMIQUE

Parmi les différentes contraintes auxquelles l'environnement physique soumet l'individu, la contrainte thermique est l'une des principales. En effet, qu'il s'agisse d'un être vivant ou d'un objet inanimé, les lois d'échanges de chaleur s'appliquent de manière identique ; la seule différence en ce domaine entre l'être vivant, ici l'homme, et l'objet inanimé est que le premier est capable de modifier certains des paramètres de sa chaleur thermique de manière à maintenir sa température centrale dans un domaine très étroit (de 36° C à 38° C environ), condition essentielle d'une efficacité tant physique que psychique normale.

"L'étude des rapports entre l'homme et le milieu thermique doit tenir compte de deux données essentielles :

- *d'une part, l'homme est un animal homéotherme, c'est-à-dire, qu'il a faculté de maintenir constante sa température interne dans des conditions climatiques très variées. Cela lui permet d'assurer ses fonctions vitales en partie à l'abri des conditions du milieu ;*

- *d'autre part, comme tout corps, l'organisme humain maintient des échanges de chaleur avec le milieu où il séjourne. Ces échanges ont une incidence importante dans le maintien de la température interne à un niveau constant.*

On appelle "noyau central" (cerveau et vicères) la partie du corps dont la température est maintenue constante - aux environs de 37° C - dans des conditions de santé. L'enveloppe du corps, comprennant notamment les membres, se trouve à des températures variables, pouvant varier localement de 20 à 40° C." (Réf. 1)

Les échanges de chaleur entre l'organisme humain et le milieu se font au niveau de cette enveloppe qui constitue un volant thermique par rapport à la production interne de chaleur et aux variations climatiques du milieu.

1.1. Le métabolisme thermique

Le métabolisme est le processus par lequel la nourriture absorbée par le corps se combine avec l'oxygène pour générer l'énergie requise pour le fonctionnement des divers organes du corps, tels que la contraction des muscles pendant le travail et l'activité involontaire des organes internes, circulation du sang, respiration, sécrétion interne des glandes et formation de la sueur, etc... et pour la fabrication des tissus du corps. Son taux est environ proportionnel au poids du corps.

La valeur maintenue à l'arrêt complet dans une position couchée est prise comme le métabolisme de base bien que la valeur du métabolisme la plus basse soit enregistrée pendant le sommeil. GIVONI définit le métabolisme basal par la quantité de chaleur que produit, heure par heure, et par mètre carré de la surface du corps, un sujet à jeun et au repos.

Madame P. MILLER CHAGAS distingue le métabolisme de base qui est l'énergie nécessaire au maintien de la vie végétative et le métabolisme de repos qui est, lui, la production minimale d'énergie pour le corps humain en position assise, s'alimentant normalement et n'ayant à lutter ni contre le chaud ni contre le froid.

Le corps produit de l'énergie à partir des aliments consommés, selon un taux qui dépend de son activité. Lorsque le corps accomplit un travail, seule une faible partie de l'énergie est utilisée pour le travail mécanique et le reste est transformé en chaleur. Cette production de chaleur interne compense les pertes et les gains de chaleur vers et en provenance de l'environnement, si la température intérieure du corps est maintenue stable. Lorsque cet équilibre n'est pas obtenu, la température des parties internes du corps augmente ou diminue, selon que la perte de chaleur est plus petite ou plus forte que la production de chaleur, jusqu'à ce qu'un équilibre s'établisse à un niveau différent ou jusqu'à ce qu'une défaillance se manifeste.

Si le comburant est l'oxygène respiré, l'un des produits formés est l'eau qu'il convient d'éliminer.

Le métabolisme énergétique de l'être humain provient principalement de la réaction d'oxydation du glucose.

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

Il apparaît que la mesure de la consommation d'oxygène permet d'évaluer la quantité de chaleur métabolique MT, c'est à dire le métabolisme énergétique total.

Selon NISHI Y. :

$$MT = 352\ (0.23\ Q + 0.77)\ (VO2/ADU)$$

MT : métabolisme, W/M2 de surface de peau

Q : quotient respiratoire - au repos Q = 0.83
- lors d'un travail modéré Q = 1

VO2 : consommation d'oxigène, en litre par minute, dans les conditions normales de température et de pression

ADU : surface du corps nu

ADU est aussi appelée surface de "Du Bois"

$ADU = 0.203\ W^{0.425}\ h^{0.725}$ W est le poids du sujet en kg
h est la taille du sujet en M

la surface totale d'un individu "standard" est approximée à 1.86 m2 pour 70 kg de poids (GIVONI)

Lorsqu'un travail est accompli, le métabolisme est en augmentation, de manière à fournir l'énergie nécessaire à ce travail ; comme le rendement du corps, considéré comme une machine, est faible, la quantité d'énergie produite est beaucoup plus importante que celle qui serait strictement nécessaire pour un travail mécanique équivalent et l'excès est transformé en chaleur.

H	=	MT	-	W
production de chaleur interne ou métabolisme thermique		métabolisme énergétique total mis en jeu par l'organisme		travail mécanique utile

d'où le rendement mécanique :

$$r = W/MT$$

Si pour la plupart des cas, le rendement est négligeable, pour certaines activités, r peut atteindre 0.2 à 0.25.

L'unité adoptée est le "MET"

Un MET correspond au métabolisme d'un individu assis au repos.

Soit 1 MET = 58.15 W/M2 = MB métabolisme basal

ce qui permet de définir le paramètre "activité" :

$$ACT = \frac{MT}{58.15}$$

Le tableau suivant donne le métabolisme total mis en jeu pour différentes activités :

sommeil	40 W/m2 soit	0.7 MET
couché	45	0.8
assis	60	1.0
travail mental assis - activité sédentaire (bureau, appartement, école, laboratoire)	65	1.1
debout	70	1.2
activité légère, debout (magasin, industrie légère)	93	1.6
activité moyenne (vendeur, travail domestique ou posté)	116	2.0
marche à 4 km/h	130	2.2
activité forte (travail posté intense, mécanique auto)	174	3.0
marche (4 km/h) et charge de 20 kg	220	3.8
course à pied à 10 km/h	440	7.6
course à pied à 17.5 km/h	830	14.3
course à pied à 25 km/h	2500	43.0
course à pied à 30 km/h	6100	104.8
nage à 1.6 km/h	315	5.4
nage à 3.5 km/h	760	13.1
football	600	10.3

D'après DEVAL (Réf. 5)

L'échange de chaleur entre le corps et son environnement se produit avec l'air ambiant et les surfaces environnantes respectivement par

convection et par rayonnement. De plus, la chaleur se dissipe du corps par l'évaporation de la transpiration et de l'eau contenue par les poumons. Ces modes d'échanges de chaleur sont gouvernés par des lois physiques mais il existe aussi des mécanismes physiologiques qui permettent au corps de réguler le taux de production de chaleur et les procédés de perte de chaleur de telle manière que l'équilibre puisse être maintenu.

Divers mécanismes de thermo-régulation (vaso-constriction au niveau des extrémités et frissons lors d'une exposition au froid, ralentissement de l'activité et sudation accrue lors d'une exposition à la chaleur) maintiennent la température centrale du corps humain (tronc et abdomen) à 37° C en agissant sur certains postes du bilan thermique global ; celui-ci reste donc toujours équilibré sauf sur de très courtes périodes, lors précisément d'une variation d'un des paramètres.

Lorsque le corps est soumis à une excitation thermique, des modifications apparaissent dans les valeurs des divers paramètres physiologiques : température cutanée, température intérieure, rythme cardiaque, taux de sudation, qui ont pour but de faciliter l'établissement de l'équilibre thermique sous ces conditions d'excitation.

Nous empruntons à Ph. MILLER-CHAGAS les éléments qui suivent sur les phénomènes régulateurs extraits du "Contrôle de l'environnement thermique" (Réf. 1)

1.2. Les mécanismes thermorégulateurs

"S'il ne peut pas modifier les lois physiques qui règlent les échanges, l'organisme humain peut cependant, par ses mécanismes d'adaptation, appelés mécanismes thermorégulateurs, contrôler ses échanges de chaleur avec le milieu, en modifiant les conditions dans lesquelles ils se produisent (modifications de la température de la surface corporelle, de la production interne de chaleur ou de la quantité de sueur).

> *"Le changement de position est une autre forme d'intervention sur les échanges de chaleur sensible : par conduction, en réduisant ou augmentant les surfaces en contact avec l'ambiance, par convection et rayonnement, s'approchant ou s'éloignant des sources de chaleur, par convection en se positionnant selon la distribution des vitesses de l'air."*

Le milieu thermique est perçu par l'organisme à travers ses "formations thermosensibles", qui sont des récepteurs du chaud et du froid situés dans la peau et dans des muqueuses et liés au système nerveux central. Ce sont ces récepteurs qui sollicitent la mise en jeu des mécanismes thermorégulateurs, dont le rôle essentiel est d'assurer le maintien de la température du noyau central dans une plage de valeurs compatibles avec la santé, ou, à la limite, avec sa survie.

La bonne marche de certaines fonctions, en particulier nerveuses, n'est possible que dans une marge étroite de températures centrales, entre les limites extrêmes de 35 et 40° C avec un optimum aux alentours de 37.5° C (METZ - L'homme et l'environnement thermique, 1961).

1.2.1. Mécanismes vasculaires

Ces mécanismes règlent le débit sanguin de la surface du corps, duquel dépend la température superficielle de la peau. Cela est dû au fait que la température de l'enveloppe corporelle varie en fonction directe du volume et de la rapidité de circulation du sang qu'elle contient.

Règlant la température de la peau, ces mécanismes contrôlent ainsi les échanges de chaleur sensible - par conduction, convection et rayonnement - entre le corps humain et l'ambiance.

La température de l'enveloppe externe du corps varie avec le milieu ambiant, elle baisse quand le milieu refroidit, ce qui lui permet de réduire ses déperditions ; elle augmente avec l'élévation de la température ambiante, augmentant ainsi ses déperditions. En ambiance froide, quand les vaisseaux sanguins sont contractés au maximum, le coefficient d'échange superficiel de la peau est de l'ordre de 3 cal/m2.h ; en ambiance chaude, quand les vaisseaux sanguins sont dilatés au maximum, ce coefficient est de l'ordre de 5.55 cal/m2.h.

1.2.2. Mécanismes sécrétoires

Ce sont ces mécanismes qui règlent le débit des glandes sudorales. Réglant la sudation, ces mécanismes interviennent dans les pertes de chaleur latente par évaporation, dans la mesure où les conditions ambiantes et vestimentaires permettent le passage de la sueur à l'état de vapeur.

Quand la somme des flux de chaleur échangés entre le corps humain et l'ambiance est positive, l'organisme tend à compenser ces apports par des déperditions de chaleur par évaporation de même valeur absolue.

Les pertes par évaporation comprennent, en plus de celles de la sueur, les pertes par diffusion de vapeur au niveau des voies respiratoires et les pertes dues à l'eau diffusée directement des pores vers l'air ("perspiration insensible"). Au contraire de la sudation, l'évaporation pulmonaire et la perspiration insensible constituent des processus inéluctables, non réglés par les mécanismes thermorégulateurs.

On appelle "évaporation requise" les déperditions de l'organisme par évaporation de la sueur qui annulent le bilan de ses échanges thermiques (ou, en d'autres thermes, ce sont les pertes de chaleur par évaporation de la sueur nécessaires pour le maintien de l'homéothermie).

Le passage de la sueur à l'état de vapeur représente pour l'organisme une perte de chaleur d'environ 0,6 kcal par gramme quand le changement d'état se produit des fines couches de sueur déposées sur la surface de la peau vers l'air directe-

ment (ou diffusant à travers les vêtements) et lorsque l'évaporation est plus rapide que la secrétion de la sueur. Quand la production de sueur est plus rapide que l'évaporation et qu'il y a formation de gouttes ou de couche de sueur à la surface corporelle ou sur les vêtements, une partie de la chaleur latente de vaporisation nécessaire au changement d'état peut être fournie par l'air ambiant, ce qui réduit considérablement le refroidissement de l'organisme (expériences de GIVONI et BELDING, "L'indice de contrainte thermique", Haïfa, 1966).

Le débit de la sudation peut varier de quelques grammes à une valeur maximale de l'ordre de 1 200 g/h pendant plusieurs heures d'exposition à la chaleur. Les mécanismes sécrétoires règlent la production de la sueur, mais ne règlent pas directement les déperditions par évaporation, qui dépendent des conditions thermo-hygrométriques du milieu (pression partielle de vapeur d'eau, vitesse de l'air). Par contre, la température de la peau, dont dépend aussi le passage de la sueur à l'état de vapeur, est,elle,contrôlée par les mécanismes thermo-régulateurs."

1.3. Niveaux d'effets physiologiques du milieu thermique sur l'homme

"Les limites et l'efficacité de l'intervention des mécanismes thermo-régulateurs dépendent des conditions physiques du milieu. On estime que les contraintes thermiques exercées par le milieu physique sur l'organisme peuvent être compensées par les mécanismes de régulation lorsqu'elles demeurent dans une marge d'apports et de déperditions de l'ordre de $\pm$ 300 kcal/h.m2.

> *"Dans les ambiances froides, quand le bilan des échanges avec le milieu est négatif, une des réponses régulatrices est l'augmentation de la production interne de chaleur par le frisson (contractions musculaires dont l'énergie est transformée en chaleur). Un individu en bonne santé, s'il ne dispose pas d'une protection vestimentaire suffisante, peut choisir l'autre possibilité d'augmentation du métabolisme qui est l'activité motrice. En cas d'hypothermie généralisée, la mise en jeu du frisson reste insuffisante pour compenser les déperditions et il se produit un abaissement progressif de la température centrale."*

Selon le degré de sollicitation, la mise en jeu de ces mécanismes peut avoir des incidences plus ou moins graves sur la santé de l'organisme.

Des réponses physiologiques au milieu telles que le frisson, les variations du métabolisme, l'augmentation de la sudation et les modifications de la température corporelle, si elles sont sollicitées de manière prolongée, il en résulte un affaiblissement ou une détérioration de certaines fonctions. On sait, par exemple, que dans les ambiances chaudes un débit sudoral intense et prolongé entraîne une déshydratation et un déficit minéral ; que dans la lutte contre le froid la température cutanée peut descendre au-dessous du point de congélation des tissus et provoquer la gelure.

Dans des conditions moins extrêmes, le degré d'intervention des mécanismes de régulation peut avoir des répercussions défavorables sur les activités intellectuelles et motrices.

> *"On appelle neutralité thermique la condition de l'organisme définie par la mise en jeu minimale des mécanismes de thermo-régulation.*

L'incidence du milieu thermique sur l'organisme humain, dans la mesure où il sollicite plus ou moins l'intervention de ces mécanismes, peut être caractérisée par les trois niveaux suivants : nuisance, gêne, et "confort". Ce dernier correspond à la condition de neutralité thermique. En conséquence, d'un point de vue purement physiologique, les milieux thermiques dits "confortables" seraient ceux qui permettent à l'organisme de maintenir constante sa température interne sans mettre en jeu de manière perceptible ses mécanismes de lutte contre le froid ou de lutte contre la chaleur. (Réf. 1)

Y. HOUDAS (11) indique plusieurs facteurs de neutralité thermique :

- facteurs physiologiques : métabolisme thermique, surface corporelle, posture, émittance cutanée, etc...

- facteurs vestimentaires : isolation thermique du vêtement, émittance de la surface vestimentaire, surface cutanée couverte par le vêtement, etc...

- facteurs d'ambiance : température de l'air, température radiante, émittance des objets environnants, pression partielle de vapeur d'eau de l'air, etc...

- facteurs dépendant à la fois du sujet et de l'environnement : vitesse relative de l'air, facteur géométrique de radiation, etc...

1.4. L'acclimatement

> *"On convient d'appeler acclimatement l'état résultant d'un processus physiologique d'adaptation qui accroît la tolérance et les performances d'un sujet lorsqu'il a été exposé pendant une durée suffisante à un certain climat" (B. METZ - "Ambiances thermiques")*

"Pour expliciter les mécanismes de l'acclimatement, il est utile de définir les concepts de contrainte et d'astreinte physiologiques. La contrainte thermique ("stress" en anglais ; "belastung" en allemand) désigne l'ensemble des effets physiques imposés à l'Homme par le milieu (on distingue la contrainte thermique métabolique, qui est la composante énergétique du travail musculaire et la contrainte thermique ambiante, qui correspond à la charge de chaleur globale apportée par l'environnement physique).

Les astreintes physiologiques désignent les divers ajustements physiologiques requis par une contrainte thermique (mise en jeu des mécanismes thermo-régulateurs). En d'autres termes la contrainte thermique désigne l'action thermique du milieu et du travail musculaire sur l'homme et l'astreinte, la réponse physiologique de l'organisme à cette contrainte.

Par rapport à un sujet non acclimaté, un sujet acclimaté présente une astreinte physiologique moins importante pour une même contrainte thermique (même travail musculaire dans une même ambiance thermique). On constate que le sujet acclimaté se distingue du sujet non acclimaté par les caractéristiques suivantes :

- sudation plus importante ;
- température centrale plus basse ;
- accélération cardiaque moindre.

L'augmentation de la sudation résulte de trois particularités : mise en jeu plus précoce de la sudation, débits de sueur possibles plus élevés, apparition plus tardive de la fatigue sudorale.

La moindre élévation de la température centrale résulte de la mise en jeu précoce de la sudation et de la plus grande sensibilité des mécanismes sécrétoires à l'élévation de la température interne.

La moindre accélération cardiaque résulte surtout de la moindre élévation de la température centrale.

L'appréciation du degré d'acclimatement d'un sujet revient à apprécier sa tolérance à une charge de chaleur choisie, de manière à éprouver ses mécanismes de déperdition de la chaleur. (Réf. 1)

L'acclimatation est le processus qui conduit à l'acclimatement.

1.5. Echanges de chaleur entre l'organisme et le milieu

Les échanges de chaleur entre le corps humain et le milieu se font entre la surface du corps (peau et/ou vêtements, voies respiratoires) et les éléments de l'ambiance (air et solides surtout) ; ces échanges sont dûs :

- soit à la différence de température entre la surface du corps et le milieu (échanges par conduction, convection, rayonnement),

- soit à la différence de tension de vapeur d'eau au niveau de la surface du corps et dans l'air ambiant (échanges par évaporation).

"Ces échanges sont régis par des lois physiques connues, cependant leur estimation quantitative précise présente des difficultés en raison, d'une part, de facteurs du milieu (manque de données concernant certains éléments , complexité dans l'intégration des différents éléments) ; d'autre part, de facteurs caractéristiques du corps humain", principalement :

a) configuration géométrique,
b) variabilité de la température de sa surface,
c) variabilité de l'humidité de sa surface,
d) variabilité des positions relatives de ses parties et de sa posture générale." (Réf. 1)

Ces échanges entre l'organisme et le milieu font l'objet de la deuxième partie de cette étude.

2 - ELEMENTS D'ECHANGES DE CHALEUR ENTRE L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE

2.1 Expression du bilan thermique

2.2 Les échanges de chaleur radiatifs

2.3 Les échanges de chaleur convectifs
- 2.3.1 Rôle de la température cutanée
- 2.3.2 Température de surface des vêtements

2.4 Les échanges de chaleur par conduction

2.5 Les échanges de chaleur par évaporation cutanée
- 2.5.1 Evaporation de la sueur
- 2.5.2 Evaporation inéluctable (perspiration insensible)

2.6 Les échanges par convection respiratoire

2.7 Les échanges par évaporation respiratoire

2.8. Diagramme de l'air humide

2.9. Echanges de chaleur en espaces extérieurs

2 - ELEMENTS D'ECHANGES DE CHALEUR ENTRE L'HOMME ET L'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'une des principales exigences pour la santé, le bien-être et le confort. Cela implique de conserver la température des tissus constituant le corps à l'intérieur d'un domaine étroit, indépendamment des variations relativement larges de l'environnement extérieur. Les conditions dans lesquelles on obtient cet équilibre, et l'état du corps lorsqu'il atteint l'équilibre avec l'environnement, dépendent de la conjugaison de nombreux facteurs. Certains de ces facteurs sont d'ordre individuel comme l'activité, l'acclimatement, le vêtement, etc... et d'autres sont des facteurs de l'environnement tels que la température d'air, le rayonnement, l'humidité et les mouvements d'air.

L'homme est un être homéotherme ; on a vu précédemment qu'il dispose d'une stratégie métabolique complexe lui permettant de déclencher tout un processus de régulation qui facilite son adaptation au milieu.

Pour que l'homme soit dans un état de confort thermique, il faut que le débit de stockage dans l'organisme soit nul, c'est à dire qu'il puisse évacuer l'énergie produite par son activité métabolique ; l'homéothermie conduit ainsi à considérer la neutralité thermique de l'homme en équilibre avec l'ambiance.

Cette hypothèse ne fait pas état des processus transitoires ; l'individu est considéré en équilibre thermique avec son environnement ; cela impose un régime établi et un sujet acclimaté, non en situation d'adaptation ou de défense à des contraintes thermiques.

Le corps humain est décomposé en trois parties qui participent différemment aux échanges : la partie du corps habillé, la tête et les mains, selon les rapports respectifs : 094, 002 et 004.

GIVONI décrit l'échange thermique entre le corps et son environnement par la formule générale (Réf. 2) :

$$M \pm R \pm C - E = Q$$

M est le métabolisme

R, C et E sont respectivement les échanges de chaleur par rayonnement, convection et évaporation.

Q est la modification du contenu calorifique du corps qui reflète les variations de la température moyenne du corps.

R, C et E sont fonction des facteurs de l'environnement extérieur tels que la température, la vitesse et la tension de vapeur d'eau de l'air et la température moyenne radiante, et d'autre part de la température et de la tension de vapeur d'eau de la peau.

Dès lors que le sujet est vêtu, l'échange thermique entre le corps et son environnement est modifié par les propriétés des vêtements qui constituent un environnement secondaire auquel la plus grande partie du corps se trouve exposée. La dépendance entre cet environnement secondaire et les conditions externes est très complexe ; le régime de ces relations est aussi affecté par d'autres facteurs tels que les propriétés des matériaux des vêtements, leur forme, etc...

GIVONI (Réf. 2) divise les facteurs affectant l'échange de chaleur des corps vêtus en facteurs primaires ou indépendants et en facteurs secondaires ou dépendants :

Facteurs primaires	Facteurs secondaires
Métabolisme	Température des vêtements
Température de l'air	Mouvements d'air sous les vêtements
Température moyenne radiante	Température de la peau
Mouvements de l'air	Taux de sudation
Tension de vapeur d'eau	Humidité de la peau et des vêtements
Type de vêtements et matériaux	Capacité de refroidissement de la transpiration

Chacun des facteurs primaires peut varier indépendamment des autres ; ces variations peuvent provoquer des modifications dans plusieurs facteurs secondaires ; par exemple, une modification de la vitesse de l'air peut affecter les mouvements de l'air à travers et sous les vêtements, la température de la peau, la température de la transpiration.

2.1. Expression du bilan thermique

De nombreuses expressions ont été proposées pour décrire le bilan des échanges thermiques entre l'homme et son environnement ; toutes reprennent, sous des formes ou des décompositions différentes, six paramètres principaux qui caractérisent l'état de confort thermique ; ceux-ci sont liés non seulement à l'environnement mais aussi à l'individu lui-même :

- paramètres relatifs à l'environnement :

  . la température de l'air : Tair
  . la vitesse relative de l'air : Vair
  . la température moyenne radiante : TMR
  . le degré hygrométrique de l'air : PHI

- paramètres propres à l'individu :

  . le niveau d'activité du sujet : Act (correspondant à une production interne de chaleur dans le corps)
  . la résistance thermique des vêtements : Rclo

Nous adopterons ici l'expression proposée par DEVAL et BERGER ("Le confort thermique en climat tempéré" - Laboratoire d'Eco-thermique solaire, VALBONNE, C.N.R.S.) en essayant, à chaque fois qu'il est nécessaire, d'effectuer la corrélation avec les autres recherches (GIVONI, MILLER-CHAGAS, FANGER, GRIVEL, VOGT, etc...)

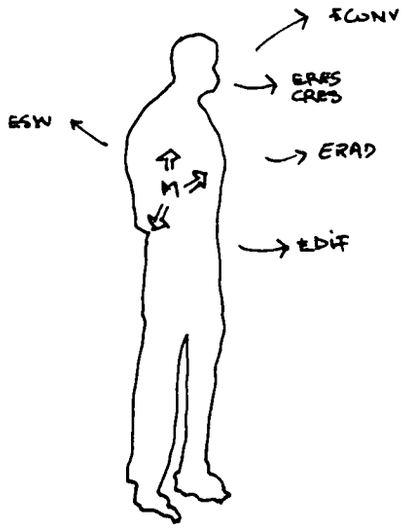
DEVAL et BERGER exposent dans cette communication un modèle de calcul mettant en relation les six variables du bilan thermique.

- Expression du bilan thermique

$$S = H + ERAD + ECONV + ECOND + ESW + EDIF + ERES + CRES$$

S : stockage dans l'organisme (W/M2)
H : production de chaleur interne (surfacique) (W/M2)
ERAD : échanges par rayonnement (W)
ECONV : échanges par convection (W)
ECOND : échanges par conduction (W)
ESW : échanges par évaporation de la sueur (W)
EDIF : échanges par diffusion de la vapeur d'eau (W)
ERES : échanges par évaporation respiratoire (W)
CRES : échanges par convection respiratoire (respiration sèche) (W)

D'après J.C. DEVAL (Réf.5)



D'après G. COLLOT (Réf. 6)

INTERVENTION DES PARAMETRES SUR LES ECHANGES THERMIQUES

ECHANGES THERMIQUES	CARACTERISTIQUES DU SUJET : ADU (surface de DU BOIS) Formule p. 10	PARAMETRES PROPRES A L'INDIVIDU		PARAMETRES RELATIFS A L'ENVIRONNEMENT			
		Act *	Rclo *	Tair*	Vair*	PHI*	TMR*
ERAD	X	X	X	X	X		X
ECONV	X	X	X	X	X		
CRES	X	X		X		X	
EDIF	X	X		X		X	
ERES	X	X		X		X	
ESW	X	X					

* Act : Activité - Rclo : Résistance thermique des vêtements - Tair : Température d'air - Vair : Vitesse relative de l'air - PHI : Humidité de l'air - TMR : Température moyenne radiante.

- S positif signifie que la production de chaleur métabolique est supérieure à la somme des échanges thermiques avec l'environnement
  → stockage dans l'organisme
  → "le sujet a chaud"

- S = 0
  → production de chaleur métabolique : échanges thermiques avec l'environnement
  → le sujet est en état d'homéothermie

- S négatif signifie que la production de chaleur métabolique est inférieure à la somme des échanges thermiques avec l'environnement
  → perte de l'organisme
  → "le sujet a froid"

Bornes des paramètres pour l'étude du confort en intérieur

Activité, Act :	sommeil, couché	0.7 - 0.8	Met
	assis	1	
	travail mental) (activité sédentaire)	1.1 - 1.2	
	debout, activité légère	1.3 - 1.6	
	activité moyenne	1.7 - 2.0	

Résistance des vêtements : Rclo

nu à tenue d'été lègère	0 - 0.5	clo
tenue travail légère	0.6 - 0.7	
costume d'été	0.8 - 0.9	
costume de travail	1 - 1.2	
costume + pardessus	1.3 - 1.5	

Température d'air : Tair et Température moyenne radiante : TMR

entre 18 et 22°C

Humidité relative : PHI

entre 50 % et 75 %

Vitesse d'air : Vair

entre 0.15 et 0.25 m/s

2.2. Les échanges de chaleur radiatifs

Une ambiance est caractérisée par la température des parois qui la délimitent ; or, toutes ces parois émettent et absorbent de l'énergie sous forme de rayonnement électro-magnétique (surtout dans l'infrarouge). Le traitement physique exact des échanges de chaleur entre l'individu et les parois de l'ambiance à différentes températures est complexe en raison des facteurs caractéristiques du corps humain (configuration de sa surface, hétérogénéité de ses températures) et des facteurs d'ambiance (diversité des corps constituant l'ambiance, dimensions, températures, émissivités, angles d'émission et d'interception par rapport au corps humain).

Un corps émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique de grande longueur d'onde, proportionnellement à la puissance quatrième de sa température ; dans le cas où les corps ne sont pas à la même température, le bilan des échanges n'est pas nul.

On définit la température moyenne de rayonnement (TMR) comme la température des parois d'une enceinte virtuelle pour laquelle :

- la température de toutes les parois est uniforme,

- les échanges par rayonnement sont égaux à ceux de l'ambiance réelle.

Une telle détermination se fait au moyen, soit d'un globe noir, soit d'un cylindre noir homothétique à l'homme.

Le flux radiatif est donné par l'expression suivante :

$$ERAD = AEFF * eclo * FACL * SIGMA (Tclo^4 - TMR^4) \quad (1)$$

AEFF est la surface du corps effectivement rayonnante vers l'environnement ; elle est liée à la surface de Du Bois (ADU, formule p.10) par un facteur postural FEFF :

AEFF = ADU * FEFF avec FEFF = 0.696 pour un sujet assis
FEFF = 0.725 pour un sujet debout

eclo est l'émissivité moyenne des vêtements ; eclo est d'environ 0.95. (pour des vêtements blancs portés dans le bassin méditerranéen, eclo = 0.6)

FACL est le rapport de la surface du corps habillé sur la surface du corps nu. FACL = 1 + 0.15 Rclo

SIGMA constante de BOLTZMANN SIGMA = $5.77.10^{-8}$ W/M^2K^4

Tclo est la température de surface des vêtements (°C)

TMR est la température moyenne radiante (°C)

En linéarisant l'expression (1), on obtient :

$$ERAD = 4\ ADU * FEFF * FACL * SIGMA\ (TMR - Tclo)\ \left(\frac{TMR + Tclo}{2}\right)^3 * eclo$$

Le corps humain est décomposé en trois parties qui participent différemment aux échanges selon les rapports surfaciques : la partie du corps habillée (94 %), la tête (2 %) et les mains (4 %).
On obtient alors :

$$ERAD\ (corps) = 0.94\ hRc\ \ FACL\ (TMR - Tclo)$$
$$ERAD\ (tête) = 0.02\ hRt\ \ (TMR - Tsk)$$
$$ERAD\ (mains) = 0.04\ hRm\ \ \left[TMR - (Tsk - 6)\right]$$

avec les coefficients d'échanges radiatifs respectifs :

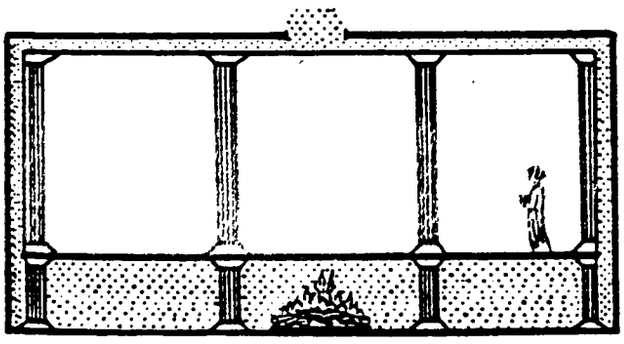
$$hRc = 4\ eclo * SIGMA\ \left[\frac{Tclo + TMR}{2} + 273\right]^3$$

$$hRt = 4\ esk\ * SIGMA\ \left[\frac{Tsk\ + TMR}{2} + 273\right]^3$$

$$hRm = 4\ esk\ * SIGMA\ \left[\frac{Tsk - 6 + TMR}{2} + 273\right]^3$$

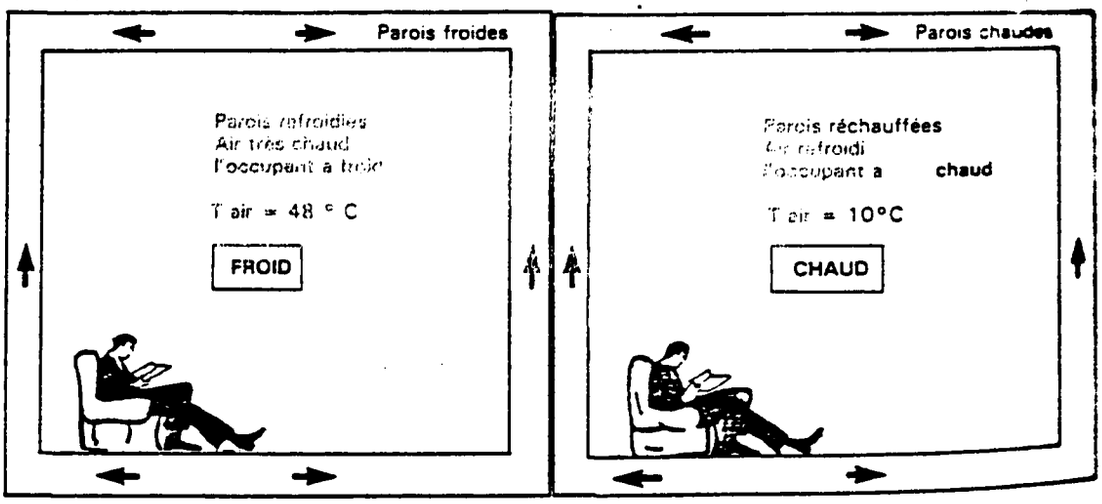
Les échanges radiatifs de chaleur entre le corps humain et son environnement représentent environ la moitié du bilan thermique.

Pour illustrer l'importance de la chaleur rayonnante, on peut citer l'exemple du bain de soleil en montagne alors que le thermomètre est en dessous de zéro degré celsius ou bien celui des Thermes romains chauffés par circulation d'air chaud, de fumée ou de vapeur d'eau dans les parcis (hypocauste)



Principe de l'hypocauste

Une expérience réalisée par le MIT (U.S.A.) montre l'influence de la température des parois :



d'après BARDY

Expérience 1 : dans une chambre test, la température de l'air est portée à 48°C. Pourtant, les occupants ont froid car les parois sont réfrigérées. L'air très chaud ne compense pas la chaleur perdue par rayonnement par les parois.

Expérience 2 : dans le même local, la température de l'air est portée à 10°C seulement. Les occupants ont chaud car les parois sont réchauffées.

La température ressentie est donnée par la valeur de la température résultante sèche, c'est à dire, lorsque l'air est immobile, la moyenne entre la température de l'air et la température radiante, soit :

$$Tres = \frac{T\ air + T\ rad}{2}$$

2.3. Les échanges de chaleur convectifs

"La convection est l'échange de chaleur entre la surface du corps et le fluide ambiant. On distingue la convection naturelle, dans laquelle la circulation du fluide se fait par des variations de sa densité, dues aux variations de sa température, qui pour leur part résultent des échanges de chaleur par conduction entre la peau et le fluide ambiant directement en son contact.

La convection naturelle est proportionnelle à un coefficient de convection et à la différence de température entre la peau et l'air. Le coefficient de convection varie avec l'écart de température entre les deux éléments.

Il y a convection forcée quand, en plus de la circulation d'air due aux variations de densité, il se produit un déplacement d'air dû à des causes extérieures (appels d'air, vent). Dans ce cas le coefficient de convection est pratiquement indépendant de l'écart de température entre la peau et l'air. Il dépend des facteurs suivants :

- posture et sens du flux : pour un individu en position couchée les échanges par convection seront plus importants, en valeur absolue, quand l'air est plus froid que la peau (flux ascendant) que quand l'air est plus chaud que la peau (flux descendant). En position debout le sens du flux n'intervient plus. Le flux par convection dans ce cas aura une valeur intermédiaire à celle des cas précédents, dans des conditions ambiantes similaires.

- vitesse de l'air proche à la surface du corps : le coefficient de convection croit avec la vitesse de l'air.

  Selon MISSENARD (1974), le coefficient de convection peut être déterminé pour un sujet nu, debout ou assis, avec vent horizontal, par les équations :

  $h_c = 3.5 + 5.2\ V_a$ (pour une $V_a \leqslant 1$ m/s) et

  $h_c = 8.7\ V_a^{0.6}$ (pour $V_a \geqslant 1$ m/s)

  (h_c (W/m²°C) : coef. de convection
  V_a : vitesse de l'air)

- de l'état de surface du corps (rugosité) : la valeur du coefficient de convection varie en fonction inverse de la rugosité, ce qui dépend des vêtements.

En pratique, le calcul des échanges par convection est fait en tenant compte des simplifications suivantes :

1) On admet que la convection naturelle peut être assimilée à une convection forcée à la vitesse de 0.10 m/s ;

2) Pour les échanges en période diurne, on ne considère que la position debout ;

3) On adopte une température superficielle moyenne pour tout le corps. (Réf. 1)

La détermination des coefficients de convection hc a fait l'objet de nombreuses recherches, les unes expérimentales sur mannequin ou sur sujet vivant, les autres théoriques grâce à des modélisations qui simulent le corps humain par un ou plusieurs cylindres verticaux.

Le tableau suivant donne des valeurs du coefficient hc selon les différents auteurs :

Auteurs	Année	Convection naturelle	Convection forcée (0.2 m/s)
BUETTNER	1934	2.46	3.27
WINSLOW et ALL.	1939	----	4.65
NELSON et ALL.	1947	----	3.89
WINSLOW et ALL.	1949	3.48	5.22
COLIN et ALL.	1967	2.67	5.63
NISHI et ALL.	1970	----	3.10 - 4.10
RAPP	1973	4.0	----
MISSENARD	1974	----	5.17
NISHI et ALL.	1977	3.0	----
Valeur moyenne		3.12	4.49
Ecart type		0.62	0.91

TABLEAU : h convectif en Watts/m2.C
Tableau extrait de DEVAL (Réf. 5)

La formule la plus couramment utilisée pour la convection naturelle a été proposée par NIELSEN et ALL. en 1952 :

$$hc = 2.38\ (Tclo - T\ air)^{0.25}$$

Tclo : température de surface des vêtements (°C)
T air : température de l'air (°C)

Dans le cas de climat chaud où le sujet porte des vêtements amples, on ne peut plus considérer la température de surface des habits car le vêtement n'a plus alors une action d'isolation. L'existence d'une

couche d'air entre le corps et le vêtement et d'un effet dit "soufflet" qui renouvelle l'air contraignent à déterminer différemment hc.

En convection forcée, hc dépend de la vitesse relative de l'air

$$hc = 10\ Vair^{0.5}$$

(La vitesse de l'air Vair se mesure avec un anémomètre de préférence à fil chaud (car il intègre des déplacements d'air multidirectionnels))

La température de l'air Ta se mesure avec un thermomètre sec dont le bulbe est à l'abri du rayonnement. Un manchon de 10 à 15 cm de diamètre, de 20 cm de hauteur et dont l'émissivité extérieure et intérieure est proche de zéro assure une bonne protection contre le rayonnement thermique.

ECONV = Rc (Tair - Tsk) * ADU en W (2)

hc : coefficient de convection W/m2°C
Tair : température de l'air °C
Tsk : température cutanée moyenne °C

Selon FANGER (1970) la Tsk assurant une sensation de confort thermique est fonction du métabolisme M ; cette relation est :

$$Tsk = 35.7 - 0.0153\ M$$

La température cutanée doit être d'autant plus basse que le métabolisme est plus intense.

D'autres expressions pour la température moyenne cutanée ont été proposées par MEYER, NISHI et GAGGE.
L'une d'elles, que nous utiliserons par la suite dans le modèle, fait intervenir la température d'air, l'activité et la résistance thermique des vêtements :

$$Tsk = 27.55 + 0.176\ Tair - 1.064\ Act\ (1 - 0.295\ Rclo).$$

La température moyenne cutanée est de l'ordre de 34° C

Tout comme pour l'évaluation des échanges radiatifs, le corps humain est divisé en trois parties (tête nue, mains nues et partie habillée), ce qui permet de calculer ECONV pour chacune des parties avec $hc_{tête}$, hc_{mains}, hc_{corps}.

La relation (2) devient alors :

$$ECONV\ (corps) = 0.94\ hcc * Facl * (Tair - Tclo)$$

$$ECONV\ (tête) = 0.02\ hct\ (Tair - Tsk)$$

$$ECONV\ (mains) = 0.04\ hcm \left[Tair - (Tsk - 6)\right]$$

avec $hc_c = Max \left[2{,}38\ (Tclo - Tair)^{025},\ 10\ Vair^{05}\right]$

$hc_t = Max \left[2{,}38\ (Tsk - Tair)^{025},\ 10\ Vair^{05}\right]$

$hc_m = Max \left[2{,}38\ (Tsk - 6 - Tair)^{025},\ 10\ Vair^{05}\right]$

soit

$$ECONV = \left[ECONV\ (corps) + ECONV\ (tête) + ECONV\ (mains)\right] * ADU$$

2.3.1. Rôle de la température cutanée (Y. HOUDAS - 1973)

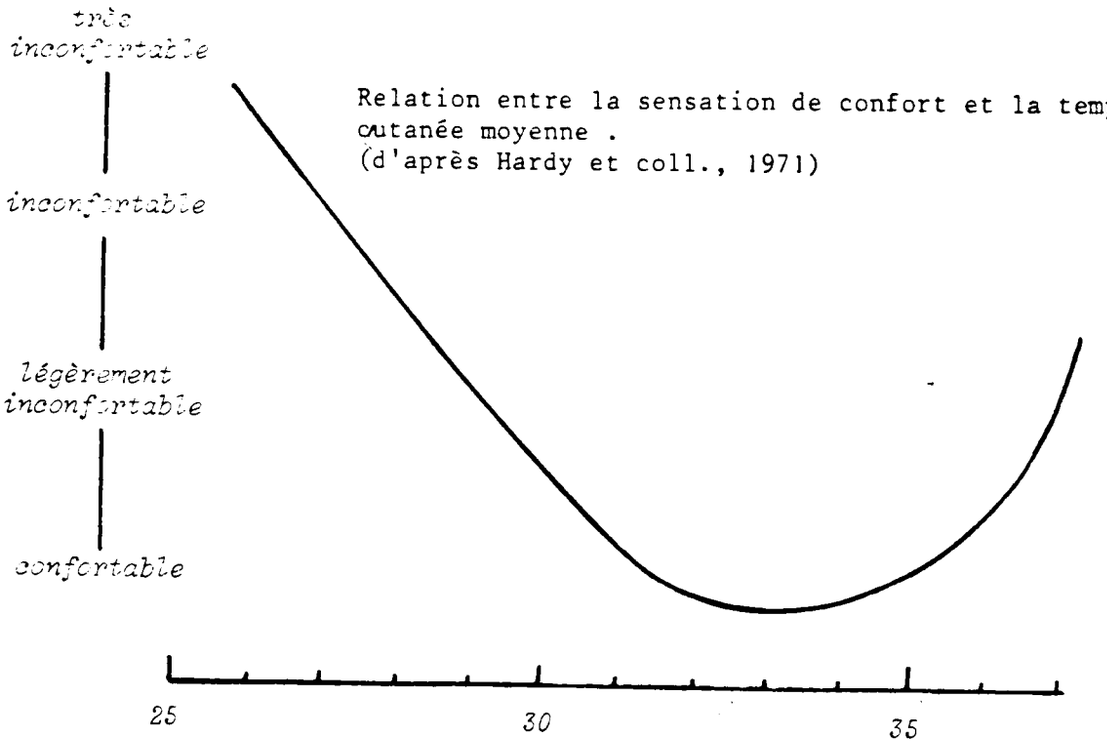
La température cutanée est hétérogène. On peut cependant calculer une température cutanée moyenne $T_{sk.}$ Le problème qui se pose est de savoir si l'organisme rapporte son confort à une valeur donnée de Tsk.

La figure construite à partir des données extraites d'une étude de HARDY et COLL. montre que la sensation d'inconfort augmente lorsque la température de la peau s'écarte d'une valeur de l'ordre de 33.4° C en moyenne.

Est-ce à dire qu'une température cutanée moyenne de 33°4C est suffisante pour assurer le confort ? Indépendamment de toute variation de la température centrale, Tsk se calcule par la sommation pondérée de diverses températures cutanées locales ; un autre facteur intervient alors : la différence de température entre 2 zones cutanées, ou encore celle entre la zone la plus froide et la zone la plus chaude.

D'après les valeurs obtenues sur 94 expériences (voir tableau), la température la plus froide est celle du pied, la plus chaude celle du front, la différence entre elles étant de 4°C.

Y. HOUDAS poursuit alors son étude par l'interrelation entre température cutanée moyenne et température interne du sujet. Schématiquement, plus la température centrale d'un individu est basse, plus il admet comme confortable une température cutanée élevée, et vice versa. C'est ainsi qu'un sujet effectuant un exercice musculaire recherchera une ambiance d'autant plus fraîche que la puissance de l'exercice est élevée ; la température cutanée sera diminuée d'autant. Par exemple, pour un exercice d'intensité moyenne, le sujet se déclarera en confort lorsque sa température cutanée sera de l'ordre de 31° C. De même, la fièvre entraîne un abaissement de la température cutanée associée à la sensation de confort.



Relation entre la sensation de confort et la température cutanée moyenne .
(d'après Hardy et coll., 1971)

Températures cutanées en conditions de neutralité et de confort thermiques (régime stable).

Sujet nu, au repos, couché
Températures ambiante et radiante à 30°C
Vent : inférieur à 1 m/s
Humidité : 10 mm Hg
(données personnelles sur 94 expériences).

Zones cutanées	Température en ° C	Ecart-type
Pied	31.0	0.9
Jambe	32.6	0.6
Cuisse	33.3	0.6
Abdomen	34.6	0.6
Dos	34.3	0.7
Poitrine	34.6	0.6
Bras	33.5	0.7
Avant-bras	33.6	0.6
Main	32.7	0.9
Front	35.0	0.6
Température cutanée moyenne pondérée	33.6	0.6

2.3.2. Température de surface des vêtements

Le vêtement a une grande importance dans la notion de confort et son action est souvent multiple. Il peut protéger du froid par son pouvoir isolant, de la pluie par ses propriétés imperméables, du rayonnement trop fort du soleil, etc...

La production de chaleur interne du corps humain peut varier de quelques 40 Watt par m2 pour un sujet allongé au repos à des valeurs de l'ordre de 600 W par m2 ou même davantage pour des activités physiques intenses. Cette chaleur doit être dissipée par les différents modes d'échanges ; le vêtement adéquat à chaque situation d'activité et d'ambiance thermique doit permettre d'équilibrer le bilan thermique dans de bonnes conditions.

Il doit, par ailleurs, assurer d'autres fonctions (être agréable à porter, être perméable à la transpiration...). Le vêtement sera ici considéré comme paramètre intervenant dans les échanges énergétiques en climat tempéré ou froid, les fonctions émissives ou soufflet étant spécifiques des climats chauds hors de la zone de confort et non considérées ici.

Il apparaît que la grandeur caractéristique qui intervient dans le calcul des échanges radiatifs et convectifs entre l'homme habillé et son environnement est la température moyenne de surface du vêtement Tclo.

La résistance thermique des vêtements est usuellement repérée dans une échelle en "clo".

$$1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m2.°C/W}$$

Si R est la résistance thermique du vêtement et Rclo son isolation exprimée en clo, on obtient :

$$R = 0.155 \quad Rclo$$

(Réf. 1)

Calcul de la température de surface des vêtements Tclo :

Tclo est calculée par itérations successives entre les formules suivantes :

$$Tclo = \frac{(h_Rc.\ TMR + h_cc.\ Ta).\ 0,155.\ Rclo + Tsk}{1 + (h_Rc + h_cc).\ 0,155.\ Rclo}$$

$$h_Rc = 4.\ Eclo \times \left(\frac{Tclo + TMR}{2} + 273\right)^3 * SIGMA$$

$$h_cc = Max\ (2,38\ (Tclo - Ta)^{0,25},\ 10\ Vair^{0,5})$$

h_Rc : coefficient d'échanges radiatifs pour le corps

h_cc : coefficient d'échanges convectifs pour le corps

La fonction Tclo = f(Rclo) est une hyperbole ; sa limite, lorsque Rclo tend vers l'infini, correspond à la température d'un vêtement de résistance thermique infinie et donc à un échange global nul avec l'extérieur qui ne serait pas non plus un état de confort thermique.

Description de l'habillement	Isolation (clo) . Rclo
nu	0
sous-vêtements	0,1
tenue tropicale type	0,3-0,4
(short, tee-shirt à manches courtes, soquettes et sandales)	
tenue d'été légère	0,5
(sous-vêtements courts, pantalons légers, tee-shirt à manches courtes)	
tenue de travail légère	0,6
(sous-vêtements courts, chaussettes coton, pantalon de travail, maillot coton sur le pantalon)	
costume d'été	0,8
costume de travail	1,0
id. + pardessus	1,5
tenue de sport d'extérieur	0,8-1,0
costume d'hiver avec sous vêtements chauds + imperméable	1,5

isolation en clo de quelques tenues standards.

Tableau extrait de DEVAL (Réf. 5)

2.4. Les échanges de chaleur par conduction

"La conduction est le mode de transmission de la chaleur entre la surface du corps et les éléments du milieu en son contact (l'écoulement de chaleur se produisant à travers la matière et sans qu'il y ait déplacement de celle-ci). C'est aussi par conduction que se font les transferts de chaleur entre deux parties du corps. Ce flux de chaleur échangé par unité de surface et de temps entre l'organisme et les éléments du milieu est

- *proportionnel à la différence de température entre les deux faces de l'élément traversé par la chaleur (le conducteur),*
- *proportionnel à la conductivité thermique du conducteur*
- *inversement proportionnel à son épaisseur.*

Pour les tissus, la conductivité thermique varie en raison directe de la quantité de sang et de lymphe qui y circule. (Réf. 1)

Pour que les échanges conductifs deviennent sensibles, il faut que la surface en contact soit importante ; or, le corps humain n'est que rarement en contact étroit avec un corps solide ; dans la vie courante ces contacts existent généralement avec des corps considérés comme isolants (fauteuil, lit...) ; les contacts avec des corps effusifs ne correspondent qu'à des cas très particuliers, le plus souvent évités et qui ne se font que par des surfaces réduites.

2.5. Les échanges de chaleur par évaporation cutanée

"L'évaporation est le transport de chaleur latente de l'organisme. Ce mode de transmission de la chaleur qui constitue pour l'organisme une perte de chaleur comprend l'évaporation de la sueur et l'évaporation inéluctable (perspiration insensible et évaporation pulmonaire).

Les pertes de chaleur par évaporation inéluctable peuvent être considérées comme constantes dans les conditions ambiantes favorisant la neutralité thermique (conditions dites de "confort"), elles sont de l'ordre de 20 kcal/h, ce qui correspond à 30 g d'eau évaporée. Par contre, l'évaporation de la sueur n'intervient, d'une part, que pour autant qu'elle ait été sécretée, d'autre part, qu'en dépendance des conditions ambiantes.

Toute la sueur sécrétée n'est pas obligatoirement évaporée et l'évaporation maximale permise par l'ambiance est fonction de la différence des pressions partielles de vapeur d'eau de la surface cutanée et de l'air, de la vitesse de l'air et proportionnelle à un coefficient d'évaporation défini par les physiologistes.

L'évaporation requise est la perte de chaleur par évaporation de la sueur qui annule, en tenant compte de la production interne de chaleur (métabolisme) et des pertes inéluctables, la totalité des gains de chaleur par les autres modes de transmission. (Réf. 1)

2.5.1. Evaporation de la sueur

La transpiration (l'excrétion de la sueur par les glandes sudoripares de la peau) est le processus de régulation thermique le plus important. La perte de chaleur par évaporation d'eau permet de réaliser l'homéothermie du corps humain. L'évaporation de la sueur secrétée peut atteindre pour l'homme non acclimaté à l'ambiance, des valeurs de l'ordre de 500 g/h.

La formulation complète des échanges par évaporation cutanée (GAGGE et BUETTNER - 1938) fait apparaître la mouillure de la peau m (rapport de la surface mouillée sur la surface totale) et le coefficient d'échange he ; le flux est proportionnel à la surface de Dubois et à la différence des pressions partielles de vapeur d'eau dans l'air et de saturation de la peau. Ce modèle bien adapté à l'étude des ambiances chaudes peut être cependant simplifié pour les ambiances de confort où la sudation ne varie pas dans de larges mesures.

FANGER propose une formulation qui donne un flux optimal fonction

de l'activité du sujet :

ESW = 0.49. ADU (58,15 - MT/ADU)

ADU surface de Du Bois (m2)

MT métabolisme total (W)

G. COLLOT propose, quant à lui, une expression équivalente mais avec un coefficient de proprotionnalité légèrement inférieur :

Soit S = 0.42 (M - 1) en W/m2

M métabolisme en met (MB = 1 met)

2.5.2. Evaporation inéluctable

Il existe un autre mode de transfert cutané de masse et de chaleur : la peau, milieu saturé en humidité, est sujette à une évaporation permanente et indépendante des mécanismes de thermorégulation : la perspiration insensible ; c'est une diffusion passive d'eau entre les couches cutanées et l'ambiance ; le flux est directement proprotionnel à la différence de pression parteille de la vapeur d'eau dans l'air et à la pression de saturation au niveau de la peau.

EDIF = 0.41 * ADU (Psat (Tsk) - Pa) en W

ADU est la surface de Du Bois (m2)
Psat Pression de vapeur saturante (mm Hg)
Tsk Température moyenne cutanée
Pa Pression partielle de vapeur d'eau dans l'air (mm Hg)

G. COLLOT donne une autre expression de la perte de chaleur P due à la perspiration insensible :

$P = \lambda .m. (P_s - P_a)$ en W/m^2

λ = chaleur latente de vaporisation de l'eau à 35°C,
λ = 2.41 KJ/g
m = coefficient de perméabilité de la peau (les vêtements

ont une résistance à l'évaporation très faible,
$m = 2.10^{-3}$ g/Sm^2 Pa

P_s = Pression de vapeur d'eau saturante à la température de la peau

Pour mesurer la pression partielle de vapeur d'eau ambiante, PaH_2O, on utilise la température humide de l'air Th ; celle-ci s'obtient avec un psychromètre ; il est possible alors de déterminer la Pa H2O (en Pascal) à l'aide d'un diagramme psychrométrique à partir de Th et la température de l'air Ta préalablement définie.

Dans une communication du C.S.T.B. de 1976 (Confort thermique et travail), M. CABANAC donne quelques indications sur le rôle de l'humidité de l'air :

Lorsqu'il fait chaud, c'est à dire au delà de 27-28°C, l'équilibre thermique du corps humain n'est possible qu'en accroissant les échanges par évaporation d'eau, en particulier grâce à la transpiration ; ces échanges sont d'autant plus aisés que l'air est moins humide. Un climat chaud et sec est plus confortable qu'un climat chaud et humide.

Pour des températures inférieures à 27°C et en particulier pour 20°C, ce problème n'existe pas et l'humidité de l'air ne joue plus que pour le phénomène suivant : l'air très sec est désagréable pour les muqueuses. Mais ce phénomène n'intervient que si l'humidité est inférieure à 30 et même 20 %. Il n'est donc pas nécessaire d'élever l'humidité à 50 ou 60 %.

Jusqu'à 28° C, la peau des sujets peu couverts reste sèche s'ils sont au repos. De 28° à 35°C une transpiration assez intense (300 g à l'heure) peut permettre non le confort mais l'équilibre thermique. A partir de 35°C, les pertes de chaleur de l'organisme par radiation et convection sont pratiquement nulles et la sueur doit être évaporée à la cadence par exemple de 1000 grammes à l'heure pour un sujet ayant une activité.

2.6. Les échanges par convection respiratoire (expiration)

La perte de chaleur CRES due au réchauffage de l'air expiré est faible par rapport au rayonnement ou à la convection.

On peut la calculer par :

$$CRES = V.Cp\ (t_{exp} - t_{air})\quad W/m2$$

V = Volume d'air expiré, proportionnel à l'activité
V = 0.097 M avec M le métabolisme en met
Cp = chaleur spécifique de l'air, Cp = 1 J/g°C
texp= température de l'air expiré. tex = 34°C
tair= température de l'air

$$CRES = 0.0016\ M\ (Tair - Texp)$$

La température de l'air expiré a été évaluée à l'aide de la formule donnée par Mc CUTCHAN et TAYLOR :

$$Texp = 32.6 + 0.066\ Tair + 32.10^{-3}\ Wa$$

2.7. Les échanges par évaporation respiratoire ou pulmonaire

L'air inspiré est humidifié lors de son passage dans les alvéoles pulmonaires ; l'évaporation correspondante donne lieu à une perte de chaleur EV : $ERES = V.\lambda.\ (Hex - Ha)$ en W/m2

V = volume d'air expiré, V = 0.097 M (g/s), M le métabolisme en met
λ = chaleur latente de vaporisation λ = 2.41 KJ/g
Hex - Ha = différence entre les taux d'humidité de l'air expiré
et de l'air inspiré (air ambiant)
exprimée en g d'eau par g d'air sec

$$Hex - Ha = 0.029 - 5.10^{-6}\ Pa\ (g\ d'eau/g\ air\ sec)$$

Pa pression partielle de vapeur d'eau

DEVAL donne l'expression de ERES en fonction du métabolisme XMT :

$$ERES = 0.0027\ XMT\ (Pa - Pexp)$$

avec Pa : pression partielle de vapeur d'eau
Pexp : pression de vapeur saturante à la température d'air expiré.

2.8. Diagramme de l'air humide

L'humidité de l'air est un des facteurs intervenant dans les calculs des échanges. Elle intervient sous forme de pression de vapeur d'eau, pression partielle ou pression saturante et humidité absolue. Ces pressions sont généralement déduites du diagramme de l'air humide, à partir de la température sèche et de l'humidité relative.
Notre objectif étant d'établir un programme de calcul automatique des échanges thermiques entre l'homme et l'environnement, nous avons traduit, sous forme d'algorithme, ce diagramme.

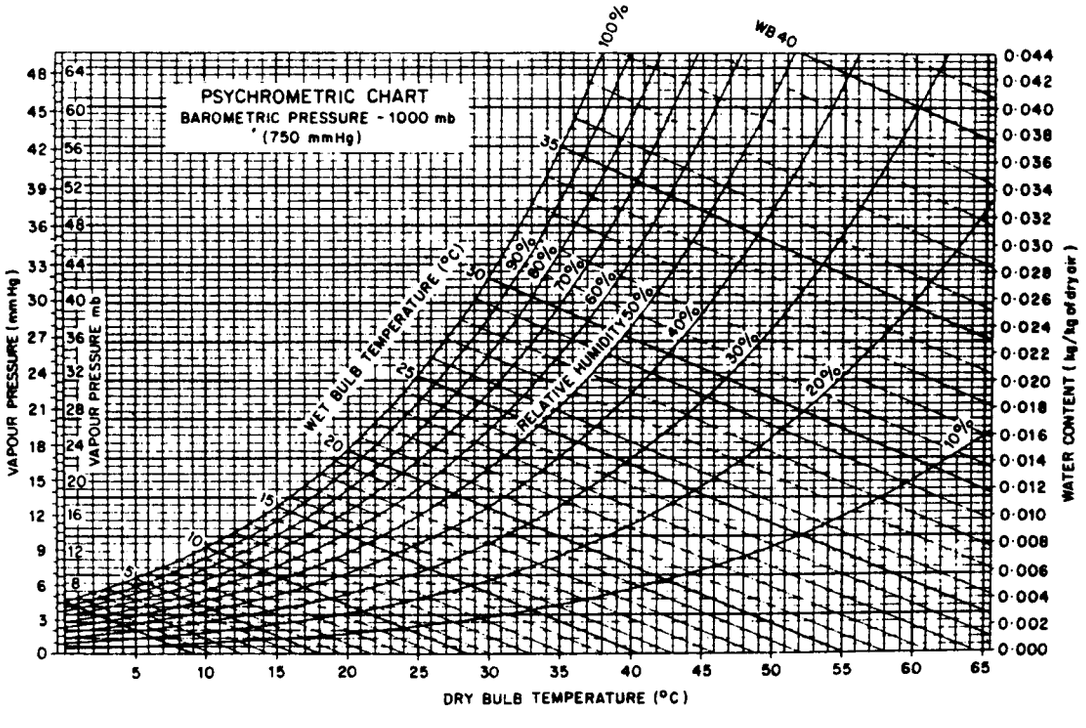
Les données d'entrée sont :

- la température sèche,
- l'humidité relative.

Le calcul nous donnera alors :

- l'humidité absolue,
- la pression partielle ou la pression de vapeur saturante,
- la température humide,
- la température de rosée.

1 - Utilisation du diagramme de l'air humide



The psychrometric chart.

(Réf. 16)

Humidité absolue

C'est le poids de vapeur d'eau contenu dans 1 kg d'air sec. Elle est notée W et s'exprime en kg/kg (point A ou B sur le diagramme).

Humidité relative

C'est le rapport du poids de vapeur d'eau (W) contenu dans une quantité d'air humide à celui qu'il pourrait contenir au maximum, soit à saturation (Ws). Elle s'exprime en pourcentage et est notée HR.

On a donc : $HR = \frac{W}{Ws}$

Pression de vapeur saturante

C'est la tension de vapeur d'eau lorsque l'air est saturé, soit HR = 100 %. Elle est notée Ps et nous l'exprimerons en mmHg.
L'humidité absolue à saturation et la pression de vapeur saturante sont liées par la relation

$$Ws = 0.622 \times \frac{Ps}{Patm - Ps}$$

avec Patm = 760 mmHg

et 0.622 = densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air.

Température de rosée

Lorsque de l'air à la température T et dont l'humidité absolue est W est refroidi, il arrive un moment où cet air se trouve à saturation et où la condensation commence à se manifester. Cette température est appelée température de rosée.
Sur le diagramme, un refroidissement à humidité absolue ou pression de vapeur d'eau constante correspond à un déplacement horizontal du point A jusqu'au point D, qui se trouve sur la courbe de saturation.

Température humide

C'est la température déterminée par un thermomètre dont le réservoir est entourée d'air saturé. Ce thermomètre donne donc la température à laquelle s'abaisse l'air ambiant lorsqu'on le sature adiabatiquement. Elle est obtenue à partir du diagramme en traçant une parallèle aux droites correspondant à une transformation sans échange de chaleur. L'intersection de cette droite avec la courbe d'air saturé en humidité donne la température humide.

Formulation mathématique

Diverses formulations sont données dans la bibliographie pour déterminer la pression saturante de vapeur d'eau, en fonction de la température sèche. Nous avons retenu celle proposée par Mc INTYRE :

. Ps (mmHg)

. T (°C)

$$Ps = 0.7501 \exp\left[(18{,}956 - 4\,030{,}18 / (T + 235)\right]$$

La pression partielle est alors : Pa = HR x Psa.

La température de rosée consiste à déterminer la température à saturation connaissant la pression de vapeur saturante, soit

$$Tros = \left[4\,030{,}18 / (18{,}956 - \text{Ln } Pa / 0,\ 7501)\right] - 235$$

Pour déterminer la température humide, nous considérerons les droites de température humide du diagramme comme parallèle, donc à pente constante, et nous utiliserons une méthode itérative pour la déterminer, sachant qu'elle est comprise entre la température de rosée et la température sèche.

L'humidité absolue à saturation Ws est déduite de la pression de vapeur saturante par la relation

$$Ws = 0.622 \frac{Ps}{760 - Ps}$$

Lorsque l'humidité relative sera inférieure à 100 %, on aura

$$Wa = HR \times Ws$$

2 - Calcul des autres paramètres :

PS : pression de vapeur saturante

Ws : humidité absolue à saturation

Pa : pression partielle

Wa : humidité absolue correspondante à Pa

TROS : température de rosée

TH : température humide.

```
      SUBROUTINE CLIMAT
C CALCUL DES DONNEES CLIMATIQUES
      COMMON/DON/ADU,PDS,HAUT,VEC(8)
      COMMON/CLIM/PS,WS,PA,WA,TROS,TH
      CALL FRS(VEC(5),PS)
      WS=.622*PS/(760-PS)
      PA=PS*VEC(7)
      WA=WS*VEC(7)
      IF(VEC(7).EQ.1)GO TO 40
C TEMPERATURE DE ROSEE
      TROS=4030.18/(18.956-ALOG(PA/.7501))-235
C TEMPERATURE HUMIDE (CALCUL ITERATIF)
      TINF=TROS
      TSUP=VEC(5)
      WINF=WA
      WSUP=WS
      TMOY=(VEC(5)+TROS)/2
10    CALL FRS(TMOY,PMOY)
      WMOY=.622*PMOY/(760-PMOY)
      PENT=(WMOY-WA)/(TMOY-VEC(5))
      IF((PENT.LT.-.000395).AND.(PENT.GT.-.000405))GO TO 30
      IF(PENT.LT.-.0004)GO TO 20
      TINF=TMOY
      TMOY=(TMOY+TSUP)/2
      GO TO 10
20    TSUP=TMOY
      TMOY=(TMOY+TINF)/2
      GO TO 10
30    TH=TMOY
      RETURN
40    TROS=VEC(5)
      TH=VEC(5)
      RETURN
      END
```

La pente des droites de température humide en fonction de la température sèche a été fixée à - 0. 0004.

3 - Calcul de la pression de vapeur saturante. Elle est exprimée en mmHg.

- Formule utilisée

```
      SUBROUTINE PRS(TEMP,PRESS)
C CALCUL DE LA PRESSION DE VAPEUR SATURANTE, EN MMHG
      Y=18.956-4030.18/(TEMP+235)
      PRESS=.7501*EXP(Y)
      RETURN
      END
```

- Résultats pour $0 < T < 50°$ C

T=	0.	PRES =	4.56651	WS =	0.00376
T=	2.	PRES =	5.27761	WS =	0.00435
T=	4.	PRES =	6.08468	WS =	0.00502
T=	6.	PRES =	6.99862	WS =	0.00578
T=	8.	PRES =	8.03132	WS =	0.00664
T=	10.	PRES =	9.19570	WS =	0.00762
T=	12.	PRES =	10.50585	WS =	0.00872
T=	14.	PRES =	11.97702	WS =	0.00996
T=	16.	PRES =	13.62569	WS =	0.01136
T=	18.	PRES =	15.46975	WS =	0.01292
T=	20.	PRES =	17.52842	WS =	0.01468
T=	22.	PRES =	19.82248	WS =	0.01666
T=	24.	PRES =	22.37425	WS =	0.01887
T=	26.	PRES =	25.20767	WS =	0.02134
T=	28.	PRES =	28.34845	WS =	0.02410
T=	30.	PRES =	31.82412	WS =	0.02718
T=	32.	PRES =	35.66407	WS =	0.03063
T=	34.	PRES =	39.89972	WS =	0.03446
T=	36.	PRES =	44.56452	WS =	0.03874
T=	38.	PRES =	49.69413	WS =	0.04352
T=	40.	PRES =	55.32642	WS =	0.04884
T=	42.	PRES =	61.50169	WS =	0.05477
T=	44.	PRES =	68.26257	WS =	0.06138
T=	46.	PRES =	75.65422	WS =	0.06876
T=	48.	PRES =	83.72456	WS =	0.07701
T=	50.	PRES =	92.52399	WS =	0.08622
	(°C)		(mmHg)		(kg/kg)

4 - Résultats

T = 10.0	HR = 50.0%	PRES =	9.19570	WS =	0.00762
		PA =	4.59785	WA =	0.00381
		TROS =	0.09377	TH =	5.51124
T = 20.0	HR = 80.0%	PRES =	17.52842	WS =	0.01468
		PA =	14.02273	WA =	0.01175
		TROS =	16.44981	TH =	17.69793
T = 20.0	HR = 10.0%	PRES =	17.52842	WS =	0.01468
		PA =	1.75284	WA =	0.00147
		TROS =	-12.42680	TH =	7.58661
T = 40.0	HR = 80.0%	PRES =	55.32642	WS =	0.04884
		PA =	44.26114	WA =	0.03907
		TROS =	35.87558	TH =	36.71336
T = 40.0	HR = 50.0%	PRES =	55.32642	WS =	0.04884
		PA =	27.66321	WA =	0.02442
		TROS =	27.58069	TH =	30.58849
T = 40.0	HR = 10.0%	PRES =	55.32642	WS =	0.04884
		PA =	5.53264	WA =	0.00488
		TROS =	2.65958	TH =	18.70429
T = 50.0	HR = 30.0%	PRES =	92.52399	WS =	0.08622
		PA =	27.75720	WA =	0.02587
		TROS =	27.63876	TH =	33.05438

Unités

T, TROS, TH en °C

WS, WA en kg/kg d'air sec

PS, PA en mmHg

2.9. Echanges de chaleur en espaces extérieurs

L'approche du confort dans les espaces extérieurs n'est pas fondamentalement différente de celle du confort intérieur, cependant deux niveaux de paramètres doivent être intégrés à l'analyse :

- le rayonnement solaire
- le vent.

Ce paragraphe est tiré, dans sa plus grande partie, de l'étude de C. SACRE intitulée "Confort dans les espaces extérieurs" (CSTB, 1983)

La notion de confort est liée :

- aux contraintes climatiques de l'environnement
- à la réponse psycho-physiologique des individus

Dès les années 1920, des chercheurs se sont préoccupés du confort à l'intérieur des bâtiments (Houghten et Yaglon, 1923).

Des synthèses comme celles de FANGER (1970) ou de CORA et CLARK (1981) permettent aujourd'hui une estimation correcte des conditions physiologiques du confort et de la sensation subjective de bien-être ou de gêne qui en découle.

Cependant, les résultats ne concernent que des conditions d'ambiance hygrothermique modérées avec un faible courant d'air et des échanges radiatifs limités.

Leur extension à des conditions extérieures nécessite une approche incluant la prise en compte du rayonnement solaire, de la force du vent, et de situations climatiques extrêmes.

2.9.1. Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est le paramètre le plus important pour le confort extérieur, seul le vent peutramener la charge thermique solaire à des proportions acceptables. On peut mettre en

valeur plusieurs aspects : la charge thermique solaire est maximum lorsque la hauteur du soleil est de l'ordre de 30° (CHOISNEL, 1976)

Une même variation de vitesse de vent a un effet plus important dans la gamme 0.5 / 5m/s. que dans la gamme des vitesses supérieures et c'est le rayonnement solaire direct qui est le facteur dominant par le rayonnement.

Ainsi, selon PEUWARDEN (1973), un sujet qui passe d'une zone ensoleillée en air calme (vent 0,5 m/s) à une zone à l'ombre où souffle un vent de 5 m/s doit ressentir une diminution de la charge thermique équivalente à une baisse de la température de l'air de l'ordre de 13° C.

En l'absence de rayonnement solaire direct, la température de l'air est avec la vitesse du vent, le paramètre climatique le plus important, l'humidité et le rayonnement IR jouant un rôle plus secondaire (TULLER 1965 et PENICAUD 1978).

2.9.2. Les effets mécaniques du vent

L'échelle de Beaufort donne une description de l'action mécanique du vent sur un individu. Il convient de préciser en outre comment agit le vent sur le sujet et quels sont les critères de confort à adopter.

Les individus sont à la fois sensibles à la vitesse moyenne de l'air et à ses fluctuations autour de la moyenne.

L'écoulement de l'air étant turbulent, la vitesse du vent est extrêmement variable dans le temps ; on la caractérise par sa valeur moyenne $\overline{V}$, l'écart type de ses fluctuations σ_V et sa valeur maximale $\hat{V}$ dans un intervalle de temps donné τ.

STEADMAN (1979) donne comme point de référence du confort :

25° C
humidité relative : 50 %
vitesse vent : 2.5 m/s
métabolisme : 180 W/m2

A pression partielle de vapeur d'eau constante (16mmb), l'influence de la vitesse du vent décroit pour les températures d'air importantes.

Ex. : pour un vent de 12 m/s, la diminution de la température apparente est de 3°C à une température d'air de 25° C et de 0° C à une température d'air de 35°C.

Une forte vitesse de vent accroît les pertes calorifiques particulièrement lorsque la température d'air est très basse.

A la notion de seuil d'inconfort est associée celle de fréquence d'inconfort ; c'est le pourcentage de temps en un lieu donné pendant lequel le seuil est atteint ou dépassé ; selon son activité, un sujet acceptera plus ou moins longtemps une situation d'inconfort.

Échelle Beaufort

Vitesse du vent m/s		Caractéristiques du vent
Force	$Z = 2$ m	
2	1,5-3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3-4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	4,5-7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7-9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9-11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11-14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14-17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9 *	17-20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

2.9.3 . Echelle de confort

Une échelle de confort peut être construite en fonction de la vitesse effective V_e. Nous donnons ci-dessous les propositions de Murakami et Deguchi[1](1981), Hunt et al[2](1976) et Davenport[3] (1972) ; les vitesses sont mesurées à 1.8 m de hauteur.

- environnement confortable

  . activité de marche : pas d'effet mécanique, légère sensation sur les cheveux et les jupes

  $V_e \leqslant$ 5 m/s (1) 6 m/s (2) 7 m/s (3)

  . activité sédentaire $V_e \leqslant$ 3 m/s (3)

- environnement tolérable

  . activité de marche : quelques effets, la marche est parfois irrégulière, les cheveux et les jupes sont très agités

  $5 \leqslant V_e < 10$ m/s (1) $6 \leqslant V_e < 9$ m/s (2)

  $7 \leqslant V_e \leqslant 5$ m/s (3)

- environnement inconfortable

  . activité de marche : effets sérieux, la marche est irrégulière et devient difficile à contrôler, le haut du corps s'incline au vent pour maintenir l'équilibre

  $10 \leqslant V_e \leqslant 15$ m/s (1) $9 \leqslant V_e \leqslant 15$ m/s (2)

  $10 \leqslant V_e < 13$ m/s (3)

  . activité sédentaire : $5 \leqslant V_e \leqslant 8$ m/s (3)

- environnement dangereux

  Quelle que soit l'activité

  $V_e \geqslant 15$ m/s (1), (2) 17 m/s (3)

2.9.4. La sensation de confort

La sensation de confort est une notion difficile à appréhender, particulièrement dans les espaces extérieurs.

On ne peut parler de confort que si l'environnement reste agréable pendant un temps de séjour en rapport avec l'activité et que si les individus peuvent porter des vêtements adaptés à leurs activités.

Les études sur le confort thermique prennent pour hypothèses que le régime des échanges énergétiques entre le sujet et l'environnement extérieur est stationnaire, ce qui nécessite une période assez longue (1 heure ?), or, un promeneur ne reste guère plus de 5 ou 10 minutes au même endroit.

Le choix d'un critère de confort pour un espace extérieur implique l'introduction de la notion de fréquence de temps pendant lequel l'espace est agréable (ou désagréable) à utiliser ; il est donc nécessaire d'établir une relation distributionnelle avec les observations d'une station météorologique de référence proche du site, ceci pour bien caractériser les particularités microclimatiques de l'espace et pour pouvoir estimer le temps probable d'utilisation par an ou au cours d'une saison.
(AVENS ET BALLANTI - 1976)

AVENS et BALLANTI caractérisent le microclimat des espaces extérieurs du point de vue du confort par deux paramètres : la température opérative solaire To qui quantifie l'influence des échanges thermiques par convection et rayonnement et la vitesse effective du vent Ve. Mais si l'humidité ne joue un rôle important que pour les températures d'air élevées ($T_a > 30°C$), l'aspect "perception visuelle" de l'environnement physique du site (éblouissement par les façades, contrastes d'éclairement, angles de vue du ciel...) doit codifier notablement la sensation de confort ; aussi négliger cet aspect revient à le considérer comme neutre dans la définition du confort en extérieur.

3 - MODELISATION DES ECHANGES THERMIQUES

3.1. Présentation du logiciel **CONFOR**

3.2. Sous-programme du logiciel **CONFOR**

3.3. Procédures

3.4. Etude d'un cas

- jeu de données
- influence des paramètres
- variation TMR - Tair

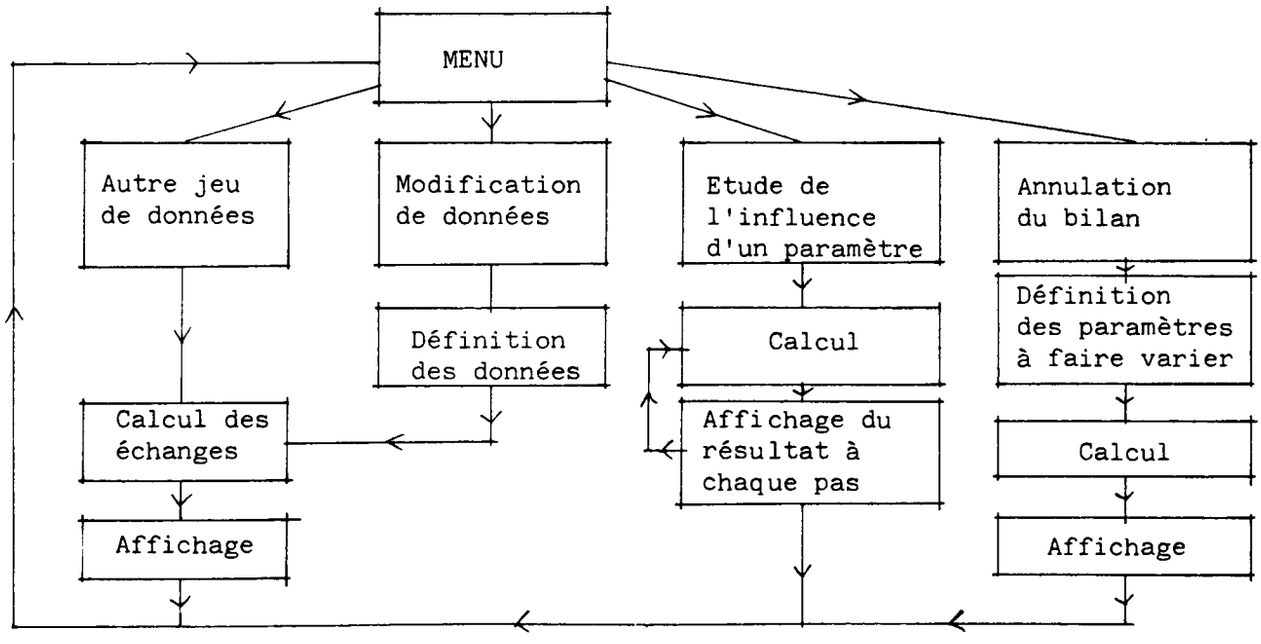
3.1. PRESENTATION DU PROGRAMME **CONFOR**

Le programme s'articule autour d'un menu regroupant les différentes fonctions :

- Entrée d'un jeu de données,
- Modification de données,
- Etude de l'influence d'un paramètre,
- Annulation du bilan en faisant varier 6 paramètres au maximum.

Il est écrit en FORTRAN et les résultats sont, soit affichés à l'écran, soit imprimés sous forme de tableau, suivant la fonction choisie.

L'entrée d'un jeu de données entraîne directement le calcul du stockage et l'affichage des résultats.



Les valeurs entrées au début du programme sont enregistrées et ne peuvent être modifiées que par les modules "Modification de données" et "Autre jeu de données". Après les modules "Etude de l'influence d'un paramètre" ou "Annulation du bilan", tous les paramètres sont réinitialisés à la valeur qu'ils avaient au départ.

Le programme comprend les sous-programmes suivants :

I - Entrée et enregistrement des données dans un vecteur VEC dimensionné à 8

1 - Paramètres propres à l'individu

11 - Activité ACT - production interne de chaleur dans le corps - Métabolisme - en met VEC (1)

12 - Résistance thermique des vêtements Rclo en clo VEC (2)

13 - Emissivité des vêtements : Eclo VEC (3)

14 - Emissivité de la peau : Esk VEC (4)

2 - Paramètres relatifs à l'environnement

21 - Température de l'air : Tair en degré C VEC (5)

22 - Température moyenne radiante : TMR en degré C VEC (6)

23 - Degré hygrométrique de l'air : PHI en % VEC (7)

24 - Vitesse relative de l'air : Vair en m/s VEC (8)

II - Calcul des paramètres climatiques

Traduction sous forme d'algorithme du diagramme de l'air humide.

- Calcul de la pression de vapeur saturante à partir de l'humidité relative et de la température sèche ;
- Calcul de la pression partielle, humidité absolue, température humide et température de rosée.

III - Calcul du stockage

Il détermine le bilan énergétique (stockage ou perte dans l'organisme) pour un jeu de données :

. Surface du corps - Formule de DU BOIS
. Métabolisme
. Température de l'air expiré
. Température moyenne cutanée
. Température de vêtement

. Echanges thermiques :

- évaporation de la sueur
- échanges respiratoires : par évaporation
  par diffusion
  par convection
- échanges convectifs
- échanges radiatifs

. Bilan

IV - Affichage

Il affiche les résultats :
pour le calcul du bilan énergétique, à partir d'un jeu de données, le programme affiche en option, sur écran ou sur imprimante :

- caractéristiques du sujet
- données du climat
- échanges thermiques
- bilan des échanges thermiques.

V - Etude de la variation d'un paramètre

Calcul du bilan énergétique pour un jeu de données avec variation d'un paramètre. Le calcul se fait donc pour chaque valeur intermédiaire du paramètre variable, entre sa borne supérieure et sa borne inférieure, suivant le pas choisi.

Les entrées sont :

- choix du paramètre variable
- borne supérieure et inférieure
- pas de variation.

Les résultats sont édités sous forme de tableau comprenant :

- le paramètre variant, en 1ère colonne
- les températures cutanée, d'air expiré et de vêtement
- le métabolisme
- les échanges thermiques ERES, EDIF, CRES, ESW, ERAD, ECONV
- le bilan.

VI - Annulation du bilan

- Pour un jeu de données, le programme cherche les combinaisons de paramètres qui annulent le bilan (entre - 0.05 et + 0.05 W) avec variation de 1 à 6 paramètres.

ENTREES :
- . nom des paramètres variables
- . bornes supérieures et inférieures
- . pas de variation.

Le calcul s'effectue pour toutes les combinaisons des paramètres choisis ; l'annulation se fait sur le dernier paramètre.

- Pour l'annulation du bilan, le programme affiche sur imprimante les combinaisons des paramètres pour lesquelles le bilan est compris entre - 0.1 et + 0.1 W.

Affichage sous forme de tableau des valeurs

- . des paramètres variants
- . du bilan.

3.2. Sous-programmes du logiciel **CONFOR**

DON : affichage écran pour la définition ou la modification de données.

```
      SUBROUTINE DON(IDRAP)
C ENTREE DES DONNEES
C VEC=VECTEUR DES VARIABLES
C 1=ACT,2=RCLO,3=ECLO,4=ESK
C 5=TAIR,6=TMR,7=PHI,8=VAIR
      GO TO(10,20,30,40,50,60,70,80)IDRAP
100   WRITE(6,1000)
1000  FORMAT(/,' CARACTERISTIQUES DU SUJET ',/)
      WRITE(6,2000)
2000  FORMAT(' POIDS (KG) = ',$)
      READ(6,3000)PDS
3000  FORMAT(F10.0)
      WRITE(6,1500)
1500  FORMAT(' TAILLE (M) = ',$)
      READ(6,3000)HAUT
10    WRITE(6,1600)
1600  FORMAT(' ACTIVITE ACT (MET) = ',$)
      READ(6,3000)VEC(1)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
20    WRITE(6,1700)
1700  FORMAT(' ISOLATION DES VETEMENTS RCLO (CLO) = ',$)
      READ(6,3000)VEC(2)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
C COEF D ECHANGE RADIATIF VETEMENT
      WRITE(6,1501)
1501  FORMAT(/,' EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO ')
      WRITE(6,1502)
1502  FORMAT(' LATITUDES TEMPEREES ECLO = .95 ')
      WRITE(6,1503)
1503  FORMAT(' BASSIN MEDITERRANEEN ECLO = .6 ')
30    WRITE(6,1520)
1520  FORMAT(' ECLO = ',$)
      READ(6,3000)VEC(3)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
40    WRITE(6,1001)
1001  FORMAT(/,' EMISSIVITE DE LA PEAU ESK ')
      WRITE(6,1530)
1530  FORMAT(' ESK = ',$)
      READ(6,3000)VEC(4)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
      WRITE(6,2100)
2100  FORMAT(/,' DONNEES CLIMATIQUES ',/)
50    WRITE(6,2200)
2200  FORMAT(' TEMPERATURE D AIR TAIR (DEG C) = ',$)
      READ(6,3000)VEC(5)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
60    WRITE(6,2300)
2300  FORMAT(' TEMPERATURE MOY RADIANTE TMR (DEG C) = ',$)
      READ(6,3000)VEC(6)
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
70    WRITE(6,2400)
2400  FORMAT(' HUMIDITE RELATIVE  PHI (%) =  ',$)
      READ(6,3000)VEC(7)
      VEC(7)=VEC(7)/100
      IF(IDRAP.NE.0)RETURN
80    WRITE(6,2500)
2500  FORMAT(' VITESSE DE L AIR  (M/S) = ',$)
      READ(6,3000)VEC(8)
```

DVAL : calcul d'un paramètre variable suivant le pas de variation.

```
      SUBROUTINE DVAL(ICO,IPA)
      COMMON/DON/ADU,PDS,HAUT,VEC(8)
      COMMON/COMB/ICOMB,IDEN(6),BMAX(6),BMIN(6),PAS(6),NBPAS(6)
      VEC(IDEN(ICO))=BMIN(ICO)+(IPA-1)*PAS(ICO)
      RETURN
      END
```

PRS : calcul de la pression de vapeur saturante.

CALCUL : détermine le bilan S.

```
C CALCUL DES ECHANGES ...
C CALCUL DE LA SURFACE DU CORPS
      ADU=.203*(PDS**.425)*(HAUT**.725)
C
C METABOLISME ENERGETIQUE TOTAL, ACT EN MET, XMT EN W
      XMT=59.97*VEC(1)*ADU
C
C TEMPERATURE DE L AIR EXPIRE, TEXP EN DEG C
C                              WA PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D EAU
      TEXP=32.6+.066*VEC(5)+32*WA
C
C TEMPERATURE MOYENNE CUTANEE, TSK ET TAIR EN DEG C,
C                              ACT EN MET, RCLO EN CLO
      TSK=29.55+.196*VEC(5)-1.064*VEC(1)*(1-.295*VEC(2))
C
C EVAPORATION DE LA SUEUR, ACT EN MET, ESW EN W
      ESW=.49*ADU*(58.15-XMT/ADU)
C
C ECHANGES RESPIRATOIRES
C   .        .          PAR EVAPORATION, ERES EN W
C PEXP PRESSION DE VAPEUR SATURANTE A LA TEMPERATURE D AIR EXPIRE
      CALL PRS(TEXP,PEXP)
      ERES=.0027*XMT*(PA-PEXP)
C
C   .        .          PAR DIFFUSION, EDIF EN W, TSK EN DEGRE C
C                                      PTSK ET PA EN MMHG
      CALL PRS(TSK,PTSK)
      EDIF=-.41*ADU*(PTSK-PA)
C
C   .        .          PAR CONVECTION, CRES ET XMT EN W
C                                      TAIR ET TEXP EN DEGRE C
      CRES=.0016*XMT*(VEC(5)-TEXP)
C
C CALCUL DE LA TEMP DE VETEMENT TCLO, TCLO ET TSK EN DEGRE C
      CALL TVET(VEC(3))
C
C ECHANGES CONVECTIFS
C COEF D ECHANGE CONVECTIF VETEMENT
      CALL COEFHC(VEC(1),TCLO,VEC(5),VEC(8),HCC,0)
C   .        .          TETE
      CALL COEFHC(VEC(1),TSK,VEC(5),VEC(8),HCT,0)
C   .        .          MAINS
      TMA=TSK-6
      CALL COEFHC(VEC(1),TMA,VEC(5),VEC(8),HCM,0)
C AUGMENTATION DE LA SURFACE D ECHANGE EN FONCTION DES VETEMENTS
      FACL=1+.15*VEC(2)
C VETEMENTS 94%
      ECONV=HCC*FACL*.94*(VEC(5)-TCLO)
C TETE 2%
      ECONV=ECONV+HCT*.02*(VEC(5)-TSK)
C MAIN 4%
      ECONV=ECONV+HCM*.04*(VEC(5)-TMA-12)
      ECONV=ECONV*ADU
C
C ECHANGES RADIATIFS
C COEFF D ECHANGE RADIATIF CORPS
      CALL COEFHR(TCLO,VEC(6),VEC(3),HRC)
C   .        .          TETE
      CALL COEFHR(TSK,VEC(6),VEC(4),HRT)
C   .        .          MAIN
      CALL COEFHR(TMA,VEC(6),VEC(4),HRM)
      ERAD=HRC*FACL*(VEC(6)-TCLO)*.94
      ERAD=ERAD+HRT*(VEC(6)-TSK)*.02
      ERAD=ERAD+HRM*(VEC(6)-TMA-12)*.04
C SURFACE RAYONNANTE VERS L ENVIRONNEMENT AEFF
C AEFF = .696 POUR UN SUJET ASSIS
C AEFF = .725 POUR UN SUJET DEBOUT
      FEFF=.696
      IF(VEC(1).GT.1.1)FEFF=.725
      AEFF=ADU*FEFF
      ERAD=ERAD*AEFF
C CALCUL DU BILAN
      S=XMT+ERES+EDIF+CRES+ESW+ERAD+ECONV
```

CLIMAT : calcul des paramètres climatiques Pa, Wa, Ws, Th, Tros.

```
      SUBROUTINE CLIMAT
C CALCUL DES DONNEES CLIMATIQUES
      WS=.622*PS/(760-PS)
      PA=PS*VEC(7)
      WA=WS*VEC(7)
      IF(VEC(7).EQ.1)GO TO 40
C TEMPERATURE DE ROSEE
      TROS=4030.18/(18.956-ALOG(PA/.7501))-235
C TEMPERATURE HUMIDE (CALCUL ITERATIF)
      TINF=TROS
      TSUP=VEC(5)
      WINF=WA
      WSUP=WS
      TMOY=(VEC(5)+TROS)/2
10    CALL PRS(TMOY,PMOY)
      WMOY=.622*PMOY/(760-PMOY)
      PENT=(WMOY-WA)/(TMOY-VEC(5))
      IF((PENT.LT.-.000395).AND.(PENT.GT.-.000405))GO TO 30
      IF(PENT.LT.-.0004)GO TO 20
      TINF=TMOY
      TMOY=(TMOY+TSUP)/2
      GO TO 10
20    TSUP=TMOY
      TMOY=(TMOY+TINF)/2
      GO TO 10
30    TH=TMOY
      RETURN
40    TROS=VEC(5)
      TH=VEC(5)
```

COEFHC : calcul c

```
      SUBROUTINE COEFHC(ACT,TEMP,T,V,HC,IDRAP)
C CALCUL DES COEFFICIENTS D ECHANGES CONVECTIFS
      HC1=0
      IF((TEMP-T).LT.0)GO TO 10
      HC1=2.38*((TEMP-T)**.25)
10    HC2=10*SQRT(V)
      HC3=0
      X=ACT*58.15-50
      IF(X.LT.0)GO TO 20
      HC3=1.16*(X**.39)
20    IF(IDRAP.EQ.1)GO TO 50
50    HC=AMAX1(HC1,HC2)
      RETURN
      END
```

COEFHR : calcul des coefficients radiatifs HR.

```
      SUBROUTINE COEFHR(TEMP,TMR,EPS,HR)
C CALCUL DES COEF D ECHANGE RADIATIF
      SIGMA=5.67E-8
      X=(TEMP+TMR)/2+273
      HR=4*EPS*SIGMA*(X**3)
      RETURN
      END
```

TVET : calcul itératif pour la détermination de la température de vêtement.

```
      SUBROUTINE TVET(ECLO)
      SIGMA=5.67E-8
      TMAX=AMAX1(TSK,VEC(5),VEC(6))
      TMIN=AMIN1(TSK,VEC(5),VEC(6))
20    TCL1=(TMAX+TMIN)/2
      CALL COEFHR(TCL1,VEC(6),VEC(3),HRC)
      CALL COEFHC(VEC(1),TCL1,VEC(6),VEC(8),HCC,1)
      X=(HRC*VEC(6)+HCC*VEC(5))*.155*VEC(2)+TSK
      Y=1+(HRC+HCC)*.155*VEC(2)
      TCL2=X/Y
      IF(ABS(TCL2-TCL1).LT..005)GO TO 30
      IF(TCL2.LT.TCL1)GO TO 10
      TMIN=TCL1
      GO TO 20
10    TMAX=TCL1
      GO TO 20
30    TCLO=(TCL1+TCL2)/2
```

AFF : affichage des données d'entrées et des différents échanges thermiques.

```
      SUBROUTINE AFF
C AFFICHAGE DES RESULTATS
      WRITE(6,7000)
7000  FORMAT(' SORTIE SUR IMPRIMANTE O/N ? ',$)
      READ(6,7001)IREQ
7001  FORMAT(A1)
      LUN=6
      IF(IREQ.EQ.'O')LUN=1
      WRITE(LUN,4000)
4000  FORMAT(/,10X,' 1 - CARACTERISTIQUES DU SUJET ',/)
      WRITE(LUN,4001)PDS,HAUT
4001  FORMAT(' POIDS EN KG = ',F40.2,/,' TAILLE EN M = ',F40.2)
      WRITE(LUN,4002)ADU
4002  FORMAT(' SURFACE DU CORPS EN M2 = ',F31.4)
      WRITE(LUN,4003)VEC(1)
4003  FORMAT(' ACTIVITE EN MET ACT = ',F32.2)
      WRITE(LUN,4004)VEC(2)
4004  FORMAT(' RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS EN CLO RCLO = ',F5.2)
      WRITE(LUN,4005)VEC(3)
4005  FORMAT(' EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO = ',F14.2)
      WRITE(LUN,4006)VEC(4)
4006  FORMAT(' EMISSIVITE DE LA PEAU ESK = ',F26.2)
      WRITE(LUN,4010)
4010  FORMAT(//,10X,' 2 - DONNEES DU CLIMAT ',/)
      WRITE(LUN,4011)VEC(5)
4011  FORMAT(' TEMPERATURE D AIR EN DEGRE C TAIR = ',F18.2)
      WRITE(LUN,4012)VEC(6)
4012  FORMAT(' TEMPERATURE MOYENNE RADIANTE EN DEGRE C TMR = ',F8.2)
      WRITE(LUN,4013)VEC(7)
4013  FORMAT(' HUMIDITE RELATIVE EN % PHI = ',F25.2)
      WRITE(LUN,4014)VEC(8)
4014  FORMAT(' VITESSE DE L AIR EN M PAR S VAIR = ',F19.2)
      WRITE(LUN,5000)PS
5000  FORMAT(/,' PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN MMHG PS = ',F14.4)
      WRITE(LUN,5002)PA
5002  FORMAT(' PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D EAU EN MMHG PA = ',F8.4)
      WRITE(LUN,5004)TROS
5004  FORMAT(' TEMPERATURE DE ROSEE TROS = ',F26.2)
      WRITE(LUN,5006)TH
5006  FORMAT(' TEMPERATURE HUMIDE TH = ',F30.2)
      WRITE(LUN,6000)
6000  FORMAT(//,10X,' 3 - CALCUL DES ECHANGES THERMIQUES ',/)
      WRITE(LUN,1100)XMT
1100  FORMAT(' METABOLISME TOTAL EN WATT XMT = ',F22.2)
      WRITE(LUN,1000)TSK
1000  FORMAT(' TEMPERATURE MOYENNE CUTANEE EN DEGRE C TSK = ',F9.2)
      WRITE(LUN,1050)TEXP
1050  FORMAT(' TEMPERATURE D AIR EXPIRE EN DEGRE C TEXP = ',F11.2)
      WRITE(LUN,1060)TCLO
1060  FORMAT(' TEMPERATURE DE VETEMENT EN DEGRE C TCLO = ',F12.2)
      WRITE(LUN,1200)
1200  FORMAT(/,' ECHANGES RESPIRATOIRES ',/)
      WRITE(LUN,1300)ERES
1300  FORMAT(23X,' PAR EVAPORATION ERES = ',F8.2)
      WRITE(LUN,1400)EDIF
1400  FORMAT(23X,' PAR DIFFUSION EDIF = ',F10.2)
      WRITE(LUN,1500)CRES
1500  FORMAT(23X,' PAR CONVECTION CRES = ',F9.2)
      WRITE(LUN,1600)
1600  FORMAT(/,' ECHANGES PAR EVAPORATION DE LA SUEUR ',/)
      WRITE(LUN,1601)ESW
1601  FORMAT(35X,' ESW = ',F13.2)
      WRITE(LUN,2100)
2100  FORMAT(/,' ECHANGES DE CHALEUR RADIATIFS ',/)
      WRITE(LUN,2200)ERAD
2200  FORMAT(34X,' ERAD = ',F13.2)
      WRITE(LUN,2300)
2300  FORMAT(/,' ECHANGES DE CHALEUR CONVECTIFS ',/)
      WRITE(LUN,2400)ECONV
2400  FORMAT(33X,' ECONV = ',F13.2)
      WRITE(LUN,9000)
9000  FORMAT(//,10X,' 4 - BILAN DES ECHANGES THERMIQUES ',/)
      WRITE(LUN,9001)S
9001  FORMAT(37X,' S = ',F13.2)
```

INFLU : affichage écran pour le choix des paramètres à modifier ou à faire varier.

```
      SUBROUTINE INFLU(ID)
C ID = 0 MODIFICATION DE PARAMETRES
C ID = 1 INFLUENCE DE PARAMETRES
C ID = 3 ANNULATION DU BILAN
      DO 75 I=1,6
75    NBPAS(I)=1
      ICOMB=0
      IF(ID.EQ.1)GO TO 10
      IF(ID.EQ.3)GO TO 60
100   WRITE(6,1000)
1000  FORMAT(/,' MODIFICATION DE PARAMETRES',/)
      GO TO 40
10    WRITE(6,2000)
2000  FORMAT(/,' INFLUENCE DE PARAMETRES',/)
      GOTO 40
60    WRITE(6,4000)
4000  FORMAT(/,' ANNULATION DU BILAN')
      WRITE(6,4001)
4001  FORMAT(' (COMBINAISON DE 6 PAR MAX)',/)
40    WRITE(6,1010)
1010  FORMAT(' 1 - ACTIVITE')
      WRITE(6,1020)
1020  FORMAT(' 2 - ISOLATION DES VETEMENTS')
      WRITE(6,1030)
1030  FORMAT(' 3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS')
      WRITE(6,1040)
1040  FORMAT(' 4 - EMISSIVITE DE LA PEAU')
      WRITE(6,1050)
1050  FORMAT(' 5 - TEMPERATURE D AIR')
      WRITE(6,1060)
1060  FORMAT(' 6 - TEMPERATURE RADIANTE')
      WRITE(6,1070)
1070  FORMAT(' 7 - HUMIDITE RELATIVE')
      WRITE(6,1080)
1080  FORMAT(' 8 - VITESSE DE L AIR')
      IF(ID.EQ.1)GO TO 20
      WRITE(6,1090)
1090  FORMAT(' 9 - FIN DE CUMUL')
20    WRITE(6,2010)
2010  FORMAT(/,' CHOIX = ',$)
      READ(6,9000)XIRE
9000  FORMAT(F10.0)
      IRE=XIRE
      IF(IRE.EQ.9)RETURN
      IF(ID.GE.1)GO TO 50
      CALL DON(IRE)
      GO TO 100
50    ICOMB=ICOMB+1
      IDEN(ICOMB)=IRE
      WRITE(6,3000)
3000  FORMAT(/,' BORNE MAXIMUM = ',$)
      READ(6,9000)BMAX(ICOMB)
      WRITE(6,3010)
3010  FORMAT(/,' BORNE MINIMUM = ',$)
      READ(6,9000)BMIN(ICOMB)
      WRITE(6,3020)
3020  FORMAT(/,' PAS = ',$)
      READ(6,9000)PAS(ICOMB)
      NBPAS(ICOMB)=(BMAX(ICOMB)-BMIN(ICOMB))/PAS(ICOMB)+1
      IF(ICOMB.EQ.6)RETURN
      IF(ID.EQ.3)GO TO 60
      CALL CALFLU(IRE,BMIN,BMAX,PAS,NBPAS)
```

COMBIN : optimisation sur le dernier paramètre pour l'annulation du bilan pour toutes les combinaisons des paramètres variables choisis.

SUBROUTINE COMBIN

```
C ANNULATION DU BILAN
      NBPAS(ICOMB)=1
      DO 11 I=1,8
11    VEC1(I)=VEC(I)
      CALL IMP(ICOMB)
      WRITE(1,2010)
      DO 40 I=1,ICOMB
      IF(IDEN(I).EQ.1)WRITE(1,1001)
      IF(IDEN(I).EQ.2)WRITE(1,1002)
      IF(IDEN(I).EQ.3)WRITE(1,1003)
      IF(IDEN(I).EQ.4)WRITE(1,1004)
      IF(IDEN(I).EQ.5)WRITE(1,1005)
      IF(IDEN(I).EQ.6)WRITE(1,1006)
      IF(IDEN(I).EQ.7)WRITE(1,1007)
      IF(IDEN(I).EQ.8)WRITE(1,1008)
40    CONTINUE
      WRITE(1,2000)
      CALL IMP(ICOMB)
      DO 10 I=1,NBPAS(1)
      IF(NBPAS(1).EQ.1)GO TO 55
      ICO=1
      IPA=I
      CALL DVAL(ICO,IPA)
55    DO 20 J=1,NBPAS(2)
      IF(NBPAS(2).EQ.1)GOTO 50
      ICO=2
      IPA=J
      CALL DVAL(ICO,IPA)
50    DO 60 I1=1,NBPAS(3)
      IF(NBPAS(3).EQ.1)GO TO 81
      ICO=3
      IPA=I1
      CALL DVAL(ICO,IPA)
81    DO 61 I2=1,NBPAS(4)
      IF(NBPAS(4).EQ.1)GO TO 82
      ICO=4
      IPA=I2
      CALL DVAL(ICO,IPA)
82    DO 62 I3=1,NBPAS(5)
      IF(NBPAS(5).EQ.1)GO TO 83
      ICO=5
      IPA=I3
      CALL DVAL(ICO,IPA)
83    IK=IDEN(ICOMB)
      VEC(IK)=BMIN(ICOMB)
      BORN(1)=VEC(IK)
      CALL CLIMAT
      CALL CALCUL
      BIL(1)=S
      WRITE(6,1000)(VEC(IDEN(JK)),JK=1,ICOMB),S
      VEC(IK)=BMAX(ICOMB)
      BORN(2)=VEC(IK)
      CALL CLIMAT
      CALL CALCUL
      BIL(2)=S
      WRITE(6,1000)(VEC(IDEN(JK)),JK=1,ICOMB),S
51    VEC(IK)=(BORN(1)+BORN(2))/2
      CALL CLIMAT
      CALL CALCUL
      WRITE(6,1000)(VEC(IDEN(JK)),JK=1,ICOMB),S
      IF(ABS(S).LT..05)GO TO 54
      IF((S*BIL(2)).LT.0)GO TO 52
      IF((S*BIL(1)).GT.0)GO TO 53
      BORN(2)=VEC(IK)
      BIL(2)=S
      GO TO 51
52    BORN(1)=VEC(IK)
      BIL(1)=S
      GO TO 51
53    WRITE(6,3000)
3000  FORMAT(' PAS DE SOLUTION')
      GO TO 62
54    WRITE(1,1000)(VEC(IDEN(JK)),JK=1,ICOMB),S
1000  FORMAT(7F11.2)
      CALL IMP1(ICOMB)
      CALL IMP(ICOMB)
62    CONTINUE
61    CONTINUE
60    CONTINUE
20    CONTINUE
10    CONTINUE
1001  FORMAT(1H+,'   ACT    I',$)
1002  FORMAT(1H+,'   RCLO   I',$)
1003  FORMAT(1H+,'   ECLO   I',$)
1004  FORMAT(1H+,'   ESK    I',$)
1005  FORMAT(1H+,'   TAIR   I',$)
1006  FORMAT(1H+,'   TMR    I',$)
1007  FORMAT(1H+,'   PHI    I',$)
1008  FORMAT(1H+,'   VAIR   I',$)
2000  FORMAT(1H+,'  BILAN   I')
2010  FORMAT(' I',$)
76    DO 77 I=1,8
77    VEC(I)=VEC1(I)
```

CALFLU : calcul et affichage du tableau pour l'étude de la variation d'un paramètre.

```
      SUBROUTINE CALFLU(IRE,BMIN,BMAX,PAS,NBPAS)
C INFLUENCE D UN PARAMETRE
      DO 20 I=1,8
20    VEC1(I)=VEC(I)
      WRITE(1,1060)
      WRITE(1,1080)
      IF(IRE.EQ.1)WRITE(1,1001)
      IF(IRE.EQ.2)WRITE(1,1002)
      IF(IRE.EQ.3)WRITE(1,1003)
      IF(IRE.EQ.4)WRITE(1,1004)
      IF(IRE.EQ.5)WRITE(1,1005)
      IF(IRE.EQ.6)WRITE(1,1006)
      IF(IRE.EQ.7)WRITE(1,1007)
      IF(IRE.EQ.8)WRITE(1,1008)
      WRITE(1,1050)
      WRITE(1,1080)
      WRITE(1,1060)
      WRITE(1,1080)
      DO 10 I=1,NBPAS
      VAR=BMIN+(I-1)*PAS
      ICO=1
      IPA=I
      CALL DVAL(ICO,IPA)
      CALL CLIMAT
      CALL CALCUL
      WRITE(1,2010)VAR
      WRITE(1,2000)TSK,TEXP,TCLO,XMT,ERES,EDIF,CRES,ESW,ERAD,ECONV,S
      WRITE(1,1070)
      WRITE(1,1080)
      WRITE(1,1060)
      IF(I.EQ.NBPAS)GO TO 10
      WRITE(1,1080)
10    CONTINUE
1001  FORMAT(' I  ACT    I',$)
1002  FORMAT(' I  RCLO   I',$)
1003  FORMAT(' I  ECLO   I',$)
1004  FORMAT(' I  ESK    I',$)
1005  FORMAT(' I  TAIR   I',$)
1006  FORMAT(' I  TMR    I',$)
1007  FORMAT(' I  PHI    I',$)
1008  FORMAT(' I  VAIR   I',$)
1050  FORMAT(1H+,'  TSK    I  TEXP   I  TCLO   I',
     1  '  XMT    I  ERES   I  EDIF   I  CRES   I',
     1  '  ESW    I  ERAD   I  ECONV  I  BILAN  I')
1060  FORMAT(122('-'))
1070  FORMAT( 1H+,'I          I',11('          I'))
1080  FORMAT(' I         I',11('          I'))
2000  FORMAT(1H+,11F10.2)
2010  FORMAT(F10.2,$)
      DO 30 I=1,8
30    VEC(I)=VEC1(I)
```

IMP, IMP 1 : affichage sur imprimante des combinaisons correspondant à un bilan nul.

```
      SUBROUTINE IMP(ICOMB)
      WRITE(1,2010)
      DO 10 I=1,ICOMB
10    WRITE(1,2020)
      WRITE(1,2030)
2010  FORMAT(' -',$)
2020  FORMAT(1H+,11('-'),$)
2030  FORMAT(1H+,11('-'))
      RETURN
      END
      SUBROUTINE IMP1(ICOMB)
      WRITE(1,2010)
      DO 10 I=1,ICOMB
10    WRITE(1,2020)
      WRITE(1,2030)
2010  FORMAT(1H+,1('I'),$)
2020  FORMAT(1H+,10X,1('I'),$)
2030  FORMAT(1H+,10X,1('I'))
      RETURN
      END
```

3.3. Exemples de procédures

I - Entrée d'un jeu de données - Calcul des échanges et bilan thermique

```
>RUN CONFOR

CARACTERISTIQUES DU SUJET

POIDS (KG) = 70
TAILLE (M) = 1.7
ACTIVITE ACT (MET) = 1.3
ISOLATION DES VETEMENTS RCLO (CLO) = 1.2

EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO
LATITUDES TEMPEREES ECLO = .95
BASSIN MEDITERRANEEN ECLO = .6
ECLO = .95

EMISSIVITE DE LA PEAU ESK
ESK = .95

DONNEES CLIMATIQUES

TEMPERATURE D AIR TAIR (DEG C) = 19
TEMPERATURE MOY RADIANTE TMR (DEG C) = 19
HUMIDITE RELATIVE  PHI (%) =  75
VITESSE DE L AIR  (M/S) = .1
SORTIE SUR IMPRIMANTE O/N ? N

          1 - CARACTERISTIQUES DU SUJET

POIDS EN KG =                                          70.00
TAILLE EN M =                                           1.70
SURFACE DU CORPS EN M2 =                                1.8144
ACTIVITE EN MET ACT =                                   1.30
RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS EN CLO RCLO =        1.20
EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO =                 0.95
EMISSIVITE DE LA PEAU ESK =                             0.95

          2 - DONNEES DU CLIMAT

TEMPERATURE D AIR EN DEGRE C TAIR =                    19.00
TEMPERATURE MOYENNE RADIANTE EN DEGRE C TMR =          19.00
HUMIDITE RELATIVE EN % PHI =                            0.75
VITESSE DE L AIR EN M PAR S VAIR =                      0.10

PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN MMHG PS =              16.4710
PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D EAU EN MMHG PA =        12.3532
TEMPERATURE DE ROSEE TROS =                            14.48
TEMPERATURE HUMIDE TH =                                16.16

          3 - CALCUL DES ECHANGES THERMIQUES

METABOLISME TOTAL EN WATT XMT =                       141.45
TEMPERATURE MOYENNE CUTANEE EN DEGRE C TSK =           32.38
TEMPERATURE D AIR EXPIRE EN DEGRE C TEXP =             34.18
TEMPERATURE DE VETEMENT EN DEGRE C TCLO =              23.98

ECHANGES RESPIRATOIRES

                      PAR EVAPORATION ERES =          -10.68
                      PAR DIFFUSION EDIF =            -17.92
                      PAR CONVECTION CRES =            -3.44

ECHANGES PAR EVAPORATION DE LA SUEUR

                                   ESW =              -17.61

ECHANGES DE CHALEUR RADIATIFS

                                  ERAD =              -47.72

ECHANGES DE CHALEUR CONVECTIFS

                                 ECONV =              -43.40

          4 - BILAN DES ECHANGES THERMIQUES

                                     S =                0.69
```

II - Annulation du bilan

Deux paramètres variables : Tair et TMR

Tableau des combinaisons qui annulent le bilan

```
 1 - MODIFICATION DE PARAMETRES
 2 - INFLUENCE DE PARAMETRES
 3 - MODIFICATION DE TOUTES LES DONNEES
 4 - ANNULATION DU BILAN
 5 - FIN

 COMMANDE = 4

 ANNULATION DU BILAN
 (COMBINAISON DE 6 PAR MAX)

 1 - ACTIVITE
 2 - ISOLATION DES VETEMENTS
 3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
 4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
 5 - TEMPERATURE D AIR
 6 - TEMPERATURE RADIANTE
 7 - HUMIDITE RELATIVE
 8 - VITESSE DE L AIR
 9 - FIN DE CUMUL

 CHOIX = 5

 BORNE MAXIMUM = 25

 BORNE MINIMUM = 15

 PAS = 1

 ANNULATION DU BILAN
 (COMBINAISON DE 6 PAR MAX)

 1 - ACTIVITE
 2 - ISOLATION DES VETEMENTS
 3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
 4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
 5 - TEMPERATURE D AIR
 6 - TEMPERATURE RADIANTE
 7 - HUMIDITE RELATIVE
 8 - VITESSE DE L AIR
 9 - FIN DE CUMUL

 CHOIX = 6

 BORNE MAXIMUM = 25

 BORNE MINIMUM = 15

 PAS = 1

 ANNULATION DU BILAN
 (COMBINAISON DE 6 PAR MAX)

 1 - ACTIVITE
 2 - ISOLATION DES VETEMENTS
 3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
 4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
 5 - TEMPERATURE D AIR
 6 - TEMPERATURE RADIANTE
 7 - HUMIDITE RELATIVE
 8 - VITESSE DE L AIR
 9 - FIN DE CUMUL

 CHOIX = 9
```

TAIR	TMR	BILAN
18.00	23.44	-0.09
19.00	18.44	-0.08
20.00	15.94	-0.02

1 - MODIFICATION DE PARAMETRES
2 - INFLUENCE DE PARAMETRES
3 - MODIFICATION DE TOUTES LES DONNEES
4 - ANNULATION DU BILAN
5 - FIN

COMMANDE = 2

INFLUENCE DE PARAMETRES

1 - ACTIVITE
2 - ISOLATION DES VETEMENTS
3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
5 - TEMPERATURE D AIR
6 - TEMPERATURE RADIANTE
7 - HUMIDITE RELATIVE
8 - VITESSE DE L AIR

CHOIX = 1

BORNE MAXIMUM = 1.5

BORNE MINIMUM = .5

PAS = .2

ACT	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
0.50	32.93	34.18	24.18	54.41	-4.11	-18.77	-1.32	25.04	-47.58	-45.49	-37.82
0.70	32.79	34.18	24.13	76.17	-5.75	-18.55	-1.85	14.38	-47.13	-44.95	-27.69
0.90	32.66	34.18	24.08	97.93	-7.39	-18.34	-2.38	3.71	-46.70	-44.44	-17.61
1.10	32.52	34.18	24.03	119.69	-9.04	-18.13	-2.91	-6.95	-46.24	-43.91	-7.48
1.30	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
1.50	32.24	34.18	23.94	163.22	-12.32	-17.71	-3.97	-28.28	-47.27	-42.89	10.78

III - Variation d'un paramètre

- paramètre variable : Activité
- Tableau des échanges et bilans pour chaque valeur du paramètre

IV - Modification de paramètre

Paramètre modifié : Activité

Calcul des échanges et du bilan thermique

```
1 - MODIFICATION DE PARAMETRES
2 - INFLUENCE DE PARAMETRES
3 - MODIFICATION DE TOUTES LES DONNEES
4 - ANNULATION DU BILAN
5 - FIN

COMMANDE = 1

MODIFICATION DE PARAMETRES

1 - ACTIVITE
2 - ISOLATION DES VETEMENTS
3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
5 - TEMPERATURE D AIR
6 - TEMPERATURE RADIANTE
7 - HUMIDITE RELATIVE
8 - VITESSE DE L AIR
9 - FIN DE CUMUL

CHOIX = 1
ACTIVITE ACT (MET) = 1

MODIFICATION DE PARAMETRES

1 - ACTIVITE
2 - ISOLATION DES VETEMENTS
3 - EMISSIVITE DES VETEMENTS
4 - EMISSIVITE DE LA PEAU
5 - TEMPERATURE D AIR
6 - TEMPERATURE RADIANTE
7 - HUMIDITE RELATIVE
8 - VITESSE DE L AIR
9 - FIN DE CUMUL

CHOIX = 9
SORTIE SUR IMPRIMANTE O/N ? O

          1 - CARACTERISTIQUES DU SUJET

POIDS EN KG =                                        70.00
TAILLE EN M =                                         1.70
SURFACE DU CORPS EN M2 =                              1.8144
ACTIVITE EN MET ACT =                                 1.00
RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS EN CLO RCLO =      1.20
EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO =               0.95
EMISSIVITE DE LA PEAU ESK =                           0.95


          2 - DONNEES DU CLIMAT

TEMPERATURE D AIR EN DEGRE C TAIR =                  19.00
TEMPERATURE MOYENNE RADIANTE EN DEGRE C TMR =        19.00
HUMIDITE RELATIVE EN % PHI =                          0.75
VITESSE DE L AIR EN M PAR S VAIR =                    0.10

PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN MMHG PS =            16.4710
PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D EAU EN MMHG PA =      12.3532
TEMPERATURE DE ROSEE TROS =                          14.48
TEMPERATURE HUMIDE TH =                              16.16


          3 - CALCUL DES ECHANGES THERMIQUES

METABOLISME TOTAL EN WATT XMT =                     108.81
TEMPERATURE MOYENNE CUTANEE EN DEGRE C TSK =         32.59
TEMPERATURE D AIR EXPIRE EN DEGRE C TEXP =           34.18
TEMPERATURE DE VETEMENT EN DEGRE C TCLO =            24.06

ECHANGES RESPIRATOIRES

                      PAR EVAPORATION ERES =         -8.21
                      PAR DIFFUSION EDIF =          -18.23
                      PAR CONVECTION CRES =          -2.64

ECHANGES PAR EVAPORATION DE LA SUEUR

                                   ESW =             -1.62

ECHANGES DE CHALEUR RADIATIFS

                                  ERAD =            -46.47

ECHANGES DE CHALEUR CONVECTIFS

                                 ECONV =            -44.18


          4 - BILAN DES ECHANGES THERMIQUES

                                     S =            -12.54
```

TAIR	TMR	ACT	RCLO	BILAN
18.00	18.00	1.40	1.22	-0.05
18.00	18.00	1.50	1.06	0.00
18.00	18.50	1.40	1.20	-0.00
18.00	18.50	1.50	1.04	0.02
18.00	19.00	1.40	1.18	-0.03
18.00	19.00	1.50	1.02	0.00
18.00	19.50	1.40	1.16	-0.03
18.00	19.50	1.50	1.00	-0.00
18.00	20.00	1.40	1.15	0.01
18.50	18.00	1.40	1.14	-0.04
18.50	18.50	1.30	1.29	-0.01
18.50	18.50	1.40	1.11	0.01
18.50	19.00	1.30	1.26	-0.05
18.50	19.00	1.40	1.09	0.02
18.50	19.50	1.30	1.25	0.01
18.50	19.50	1.40	1.08	0.03
18.50	20.00	1.30	1.23	0.03
18.50	20.00	1.40	1.05	0.01
19.00	18.00	1.30	1.22	0.00
19.00	18.00	1.40	1.07	0.03
19.00	18.50	1.30	1.20	-0.03
19.00	18.50	1.40	1.04	0.02
19.00	19.00	1.30	1.18	-0.01
19.00	19.00	1.40	1.02	0.03
19.00	19.50	1.30	1.15	0.02
19.00	20.00	1.30	1.13	0.02
19.50	18.00	1.30	1.15	-0.03
19.50	18.50	1.20	1.30	0.05
19.50	18.50	1.30	1.12	0.04
19.50	19.00	1.20	1.27	-0.00
19.50	19.00	1.30	1.10	0.05
19.50	19.50	1.20	1.24	-0.01
19.50	19.50	1.30	1.07	-0.04
19.50	20.00	1.20	1.23	0.05
19.50	20.00	1.30	1.05	0.02
20.00	18.00	1.20	1.24	0.02
20.00	18.00	1.30	1.08	0.02
20.00	18.50	1.20	1.21	-0.00
20.00	18.50	1.30	1.05	-0.00
20.00	19.00	1.10	1.30	-0.04
20.00	19.00	1.20	1.18	-0.05
20.00	19.00	1.30	1.02	0.02
20.00	19.50	1.10	1.27	-0.04
20.00	19.50	1.20	1.16	0.01
20.00	20.00	1.10	1.25	0.03
20.00	20.00	1.20	1.13	0.05

Annulation du bilan

Variation de 4 paramètres

Tair : 18 à 20°C pas 0.5

TMR : 18 à 20°C pas 0.5

ACT : 1.1 à 1.5 Met pas pas 0.1

Rclo : 1 à 1.3 clo pas 0.1

avec Vair : 0.1

PHI : 75 %

poids : 70 kg

taille : 1.70 m

3.4. ETUDE D'UN CAS

Afin de rendre compte du rôle des échanges thermiques et d'utiliser les différentes possibilités du programme, nous avons choisi de traiter un exemple concernant un sujet placé dans des conditions de travail de bureau.

Les objectifs que nous nous sommes fixés sont :

- de déterminer les conditions du confort physique résultant, en faisant varier deux paramètres, la température d'air et la température radiante;

- d'étudier l'influence des divers paramètres sur le stockage.

Les résultats obtenus ne sont évidemment valables que dans les bornes imposées aux paramètres ; ils reflètent un cas précis d'occupation et d'utilisation de locaux.

DOMAINE DE VARIATION DES PARAMETRES POUR LE CAS ETUDIE

ACT	08	à	2.0 Met	0.1 Met
Rclo	05	à	1.3 clo	0.1 clo
Tair	15	à	25°C	1°C
TMR	15	à	25°C	1°C
PHI	30	à	80 %	0.5 %
Vair	0.05	à	0.25 m/s	0.02 ms

1 - CARACTERISTIQUES DU SUJET

POIDS EN KG =	70.00
TAILLE EN M =	1.70
SURFACE DU CORPS EN M2 =	1.8144
ACTIVITE EN MET ACT =	1.30
RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS EN CLO RCLO =	1.20
EMISSIVITE MOYENNE DES VETEMENTS ECLO =	0.95
EMISSIVITE DE LA PEAU ESK =	0.95

2 - DONNEES DU CLIMAT

TEMPERATURE D AIR EN DEGRE C TAIR =	19.00
TEMPERATURE MOYENNE RADIANTE EN DEGRE C TMR =	19.00
HUMIDITE RELATIVE EN % PHI =	0.75
VITESSE DE L AIR EN M PAR S VAIR =	0.10
PRESSION DE VAPEUR SATURANTE EN MMHG PS =	16.4710
PRESSION PARTIELLE DE VAPEUR D EAU EN MMHG PA =	12.3532
TEMPERATURE DE ROSEE TROS =	14.48
TEMPERATURE HUMIDE TH =	16.16

3 - CALCUL DES ECHANGES THERMIQUES

METABOLISME TOTAL EN WATT XMT =	141.45
TEMPERATURE MOYENNE CUTANEE EN DEGRE C TSK =	32.38
TEMPERATURE D AIR EXPIRE EN DEGRE C TEXP =	34.18
TEMPERATURE DE VETEMENT EN DEGRE C TCLO =	23.98

ECHANGES RESPIRATOIRES

PAR EVAPORATION ERES =	-10.68
PAR DIFFUSION EDIF =	-17.92
PAR CONVECTION CRES =	-3.44

ECHANGES PAR EVAPORATION DE LA SUEUR

ESW = -17.61

ECHANGES DE CHALEUR RADIATIFS

ERAD = -47.72

ECHANGES DE CHALEUR CONVECTIFS

ECONV = -43.40

4 - BILAN DES ECHANGES THERMIQUES

S = 0.69

Sortie sur imprimante

- jeu de données
- échanges thermiques
- bilan

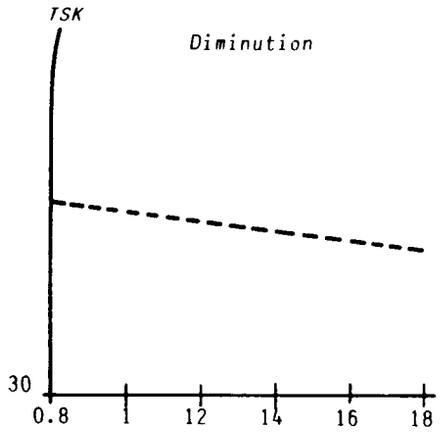
I - VARIATION DE L'ACTIVITE - ACT - ENTRE 0.8 et 2.00 Met

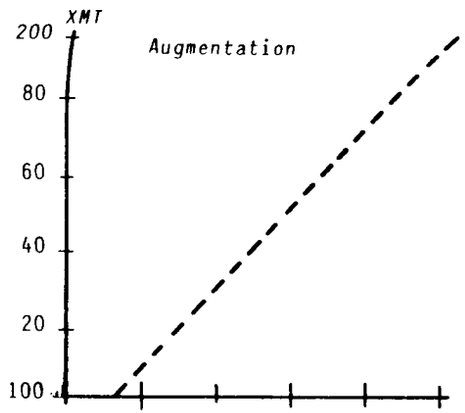
La température cutanée et la température de vêtement varient peu, les échanges radiatifs et convectifs restent donc à peu près constants.

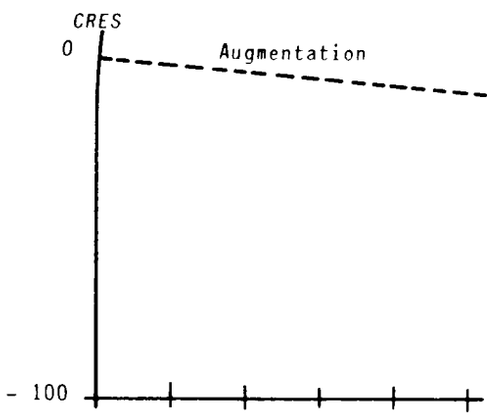
En revanche, le métabolisme et les échanges par évaporation de la sueur, directement liés à l'activité, varient de façon importante; la variation du métabolisme étant deux fois plus importante que l'évaporation, le stockage augmente alors jusqu'à 36 Watt.

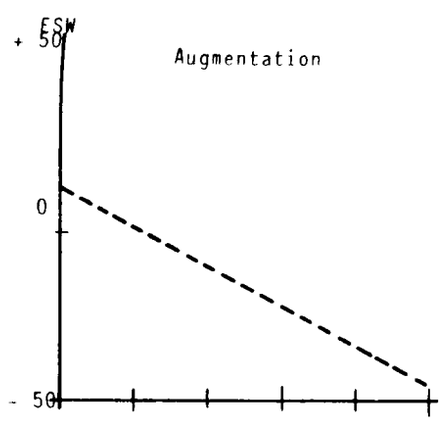
ACT	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
0.80	32.72	34.18	24.10	87.05	-6.57	-18.45	-2.11	9.05	-46.92	-44.71	-22.67
0.90	32.66	34.18	24.08	97.93	-7.39	-18.34	-2.38	3.71	-46.70	-44.44	-17.61
1.00	32.59	34.18	24.06	108.81	-8.21	-18.23	-2.64	-1.62	-46.47	-44.18	-12.54
1.10	32.52	34.18	24.03	119.69	-9.04	-18.13	-2.91	-6.95	-46.24	-43.91	-7.48
1.20	32.45	34.18	24.01	130.57	-9.86	-18.02	-3.17	-12.28	-47.93	-43.64	-4.33
1.30	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
1.40	32.31	34.18	23.96	152.34	-11.50	-17.81	-3.70	-22.95	-47.48	-43.13	5.76
1.50	32.24	34.18	23.94	163.22	-12.32	-17.71	-3.97	-28.28	-47.27	-42.89	10.78
1.60	32.17	34.18	23.91	174.10	-13.14	-17.60	-4.23	-33.61	-47.04	-42.62	15.85
1.70	32.11	34.18	23.89	184.98	-13.96	-17.50	-4.49	-38.94	-46.80	-42.36	20.92
1.80	32.04	34.18	23.86	195.86	-14.79	-17.40	-4.76	-44.27	-46.56	-42.09	25.99
1.90	31.97	34.18	23.84	206.74	-15.61	-17.29	-5.02	-49.60	-46.33	-41.82	31.06
2.00	31.90	34.18	23.81	217.62	-16.43	-17.19	-5.29	-54.94	-46.09	-41.56	36.13

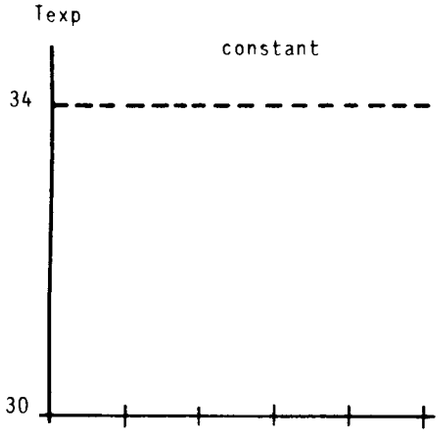
Variation de ACT

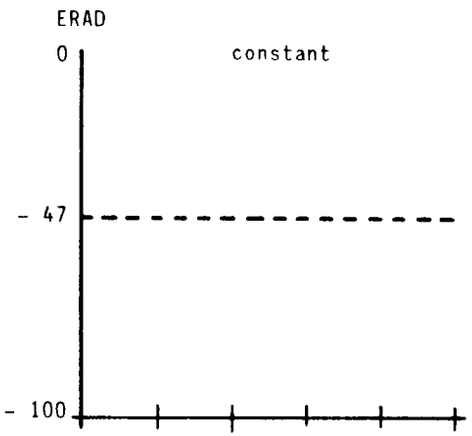

TSK
Diminution
30
0.8
1
12
14
16
18

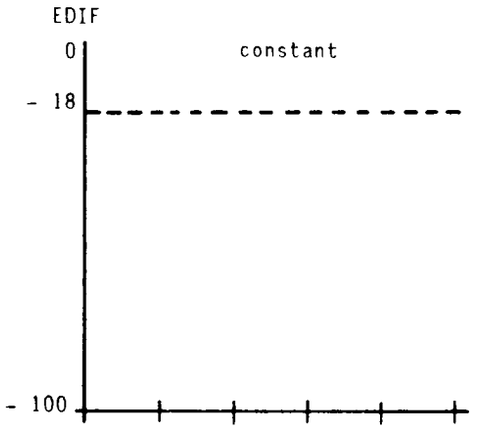

XMT
Augmentation
200
80
60
40
20
100

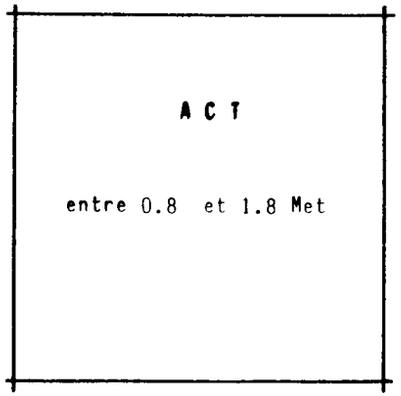

CRES
0
Augmentation
- 100

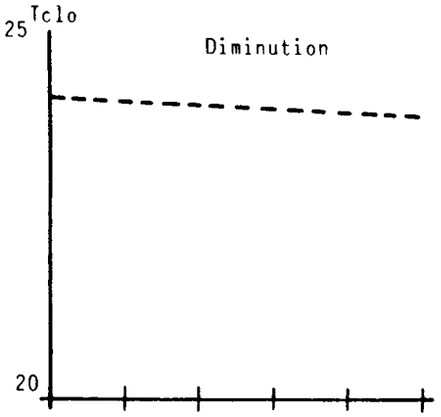

ESW
+ 50
Augmentation
0
- 50

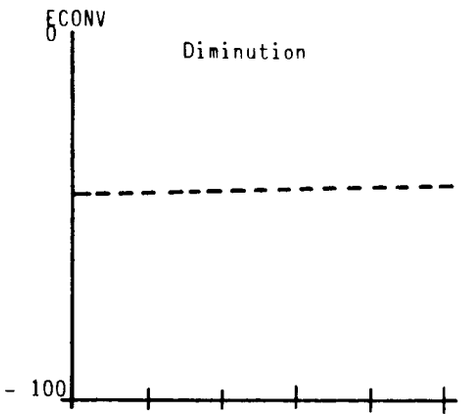

Texp
constant
34
30

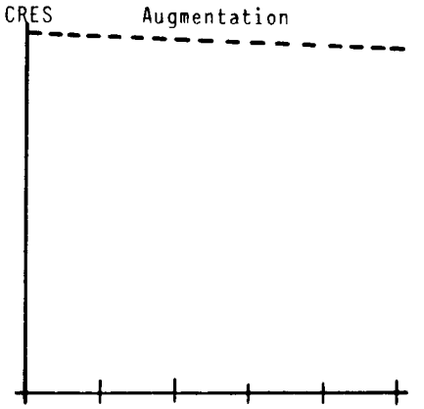

ERAD
0
constant
- 47
- 100

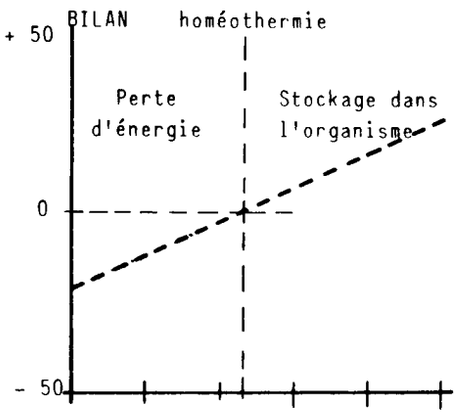

EDIF
0
constant
- 18
- 100


A C T
entre 0.8 et 1.8 Met


Tclo
25
Diminution
20


ECONV
0
Diminution
- 100


CRES
Augmentation


BILAN
homéothermie
+ 50
Perte
d'énergie
Stockage dans
l'organisme
0
- 50

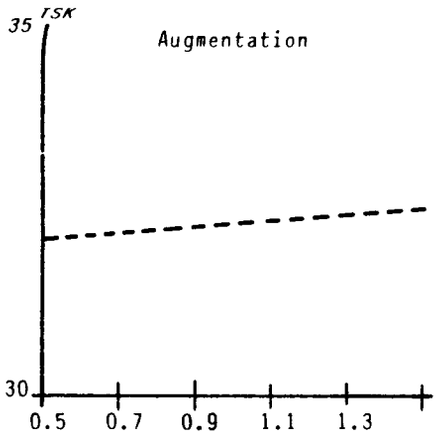
II - VARIATION DE LA RESISTANCE THERMIQUE DES VETEMENTS Rclo entre 0.5 et 1.3 clo

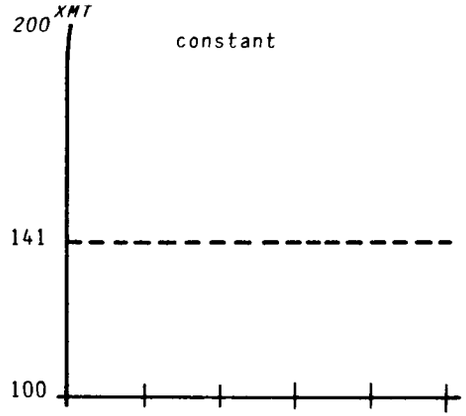
L'accroissement de Rclo fait augmenter la température cutanée et diminuer la température de vêtement.

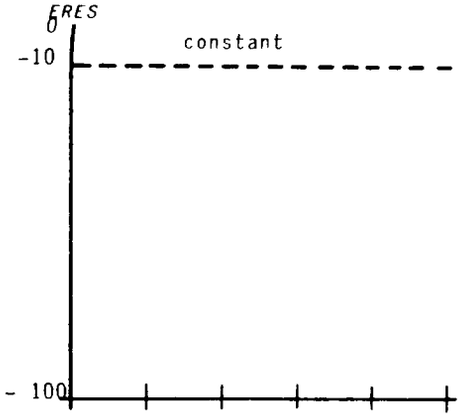
La partie habillée étant la plus importante et Tclo se rapprochant de la température extérieure, les échanges radiatifs et convectifs, qui représentent une perte d'énergie, diminuent en valeur absolue, ce qui entraîne une augmentation du stockage.

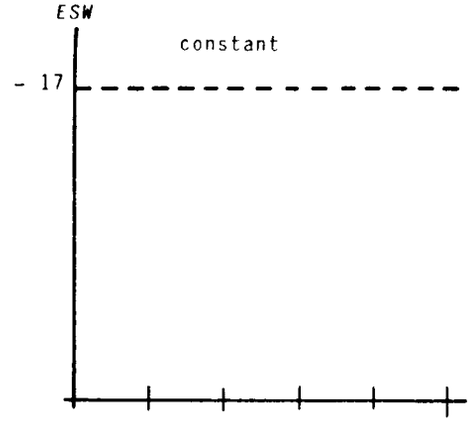
RCLO	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
0.50	32.09	34.18	26.53	141.45	-10.68	-17.48	-3.44	-17.61	-63.39	-62.00	-33.15
0.60	32.14	34.18	26.00	141.45	-10.68	-17.55	-3.44	-17.61	-60.02	-57.92	-25.76
0.70	32.18	34.18	25.54	141.45	-10.68	-17.61	-3.44	-17.61	-57.16	-54.49	-19.52
0.80	32.22	34.18	25.14	141.45	-10.68	-17.67	-3.44	-17.61	-54.73	-51.60	-14.27
0.90	32.26	34.18	24.80	141.45	-10.68	-17.73	-3.44	-17.61	-52.62	-49.11	-9.74
1.00	32.30	34.18	24.49	141.45	-10.68	-17.79	-3.44	-17.61	-50.77	-46.94	-5.78
1.10	32.34	34.18	24.22	141.45	-10.68	-17.85	-3.44	-17.61	-49.15	-45.05	-2.33
1.20	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
1.30	32.42	34.18	23.77	141.45	-10.68	-17.98	-3.44	-17.61	-46.42	-41.91	3.42

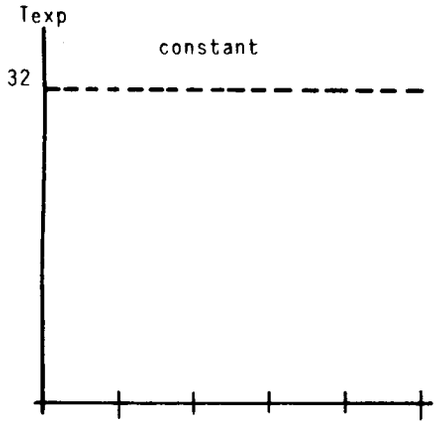
Variation de Rclo

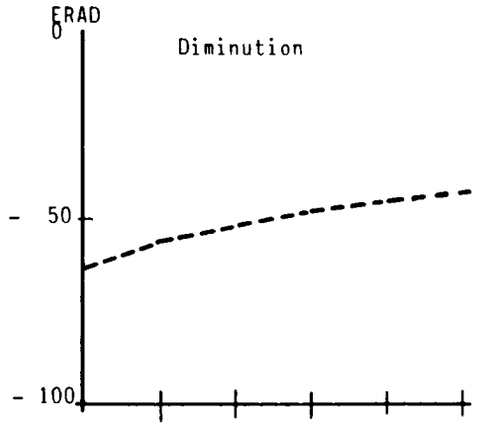

35
TSK
Augmentation
30
0.5
0.7
0.9
1.1
1.3

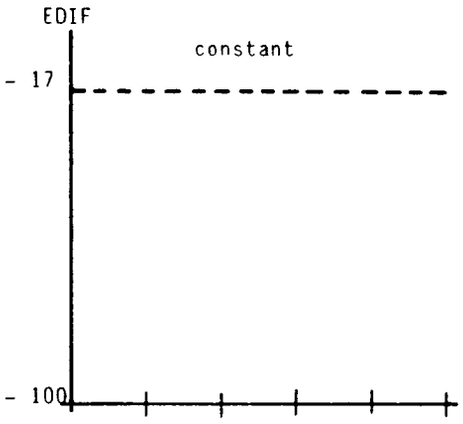

200
XMT
constant
141
100

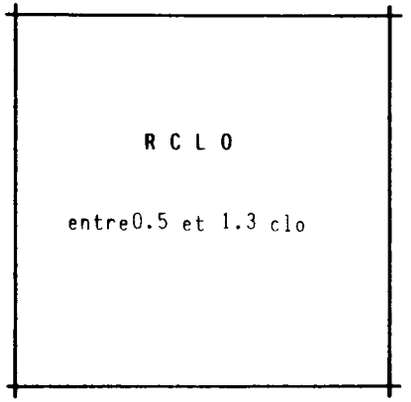

0
ERES
constant
-10
- 100

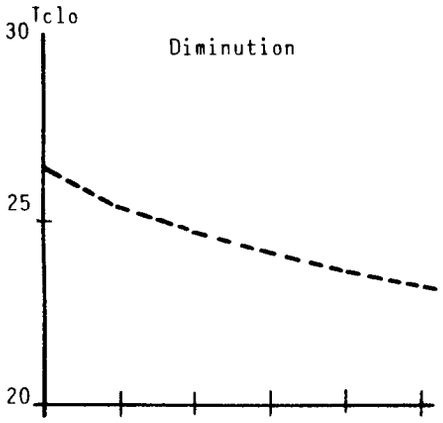

ESW
constant
- 17

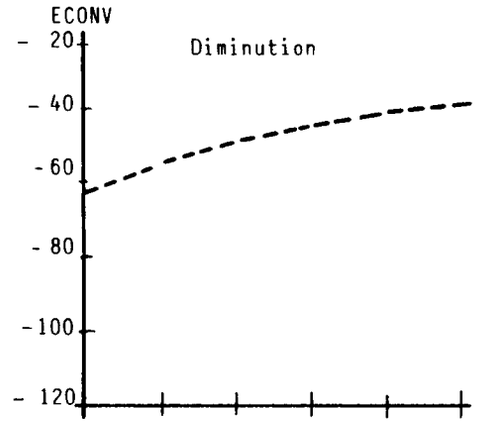

Texp
constant
32

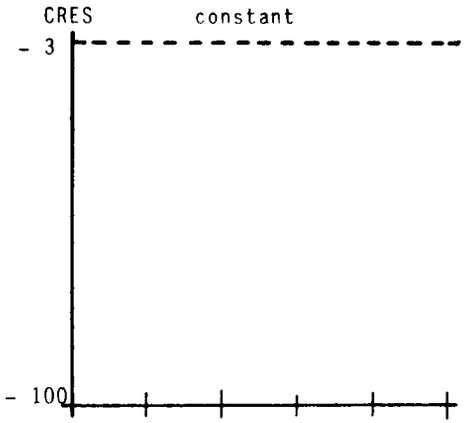

0
ERAD
Diminution
- 50
- 100

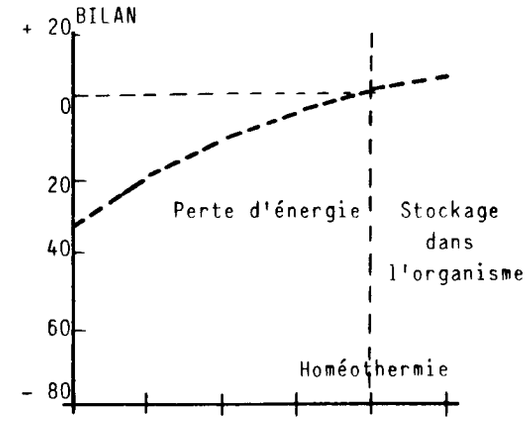

EDIF
constant
- 17
- 100


R C L O
entre0.5 et 1.3 clo


30
Tclo
Diminution
25
20


ECONV
- 20
Diminution
- 40
- 60
- 80
-100
- 120


CRES
constant
- 3
- 100


+ 20
BILAN
0
20
40
60
- 80
Perte d'énergie
Stockage
dans
l'organisme
Homéothermie

III - VARIATION DE Tair (15 à 25°)

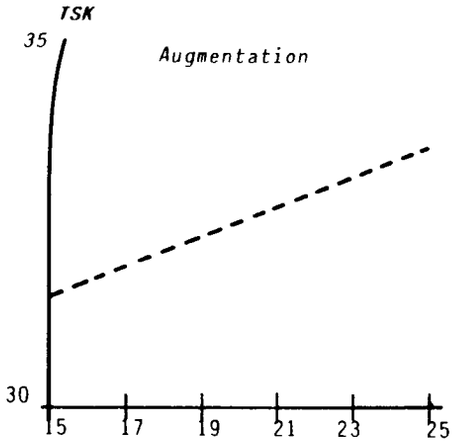
TMR = 19°C
Vair = 0.1 m/s
Rclo = 1.2 clo
ACT = 1.3 Met
PHI = 75 %

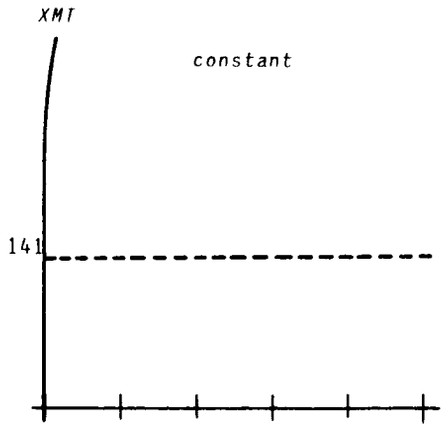
- le métabolisme XMT est constant.
- les échanges par évaporation de la sueur ESW sont constants.
- le bilan des échanges thermiques varie de - 21 W (perte d'énergie) à + 22 W (stockage dans l'organisme), avec une valeur voisine de 0 pour Tair = 17°C.
- la température d'air expiré Texp, fonction de Tair et de la pression partielle de vapeur d'eau Pa,augmente avec Tair entre 33,85°C pour Tair = 15°C et 34,73°C pour Tair = 25°C, soit un écart de + 0,88°C.
- la température moyenne cutanée Tsk et la température des vêtements Tclo varient également dans le même sens que Tair, soit un écart de + 1,96°C pour Tsk et de 3,02°C pour Tclo.
- la différence de température entre Tclo et Tair diminue, passant de 7,84° pour Tair = 15° à 0,86° pour Tair = 25° ; la vitesse d'air Vair étant faible (0.1 m/s), le coefficient d'échange convectif hc ne dépend que de (Tclo - Tair) d'où une diminution des pertes dues aux échanges convectifs : ECONV varie de - 72 W (Tair = 15°) à - 10 W (Tair = 25°), soit un écart de 62 W.
- la pression de vapeur saturante à la température moyenne cutanée Ptsk augmente avec Tsk ; Ptsk augmente moins vite que Pa dans ce cas (voir diagramme psychrométrique) ; la diminution de (Ptsk - Pa) entraîne celle des échanges par diffusion de vapeur d'eau EDIF (écart de 3.10 W).
- les échanges par évaporation respiratoire ERES varient dans le même sens que (Pa - Pexp), soit une diminution de 2.38 W.
- les échanges par convection respiratoire,proportionnels à Tair - Texp,diminuent de 4.27 W pour Tair - Texp = 18°C à - 2.20 W pour Tair - Texp = 9.73°C, soit un écart de 2.07 W.

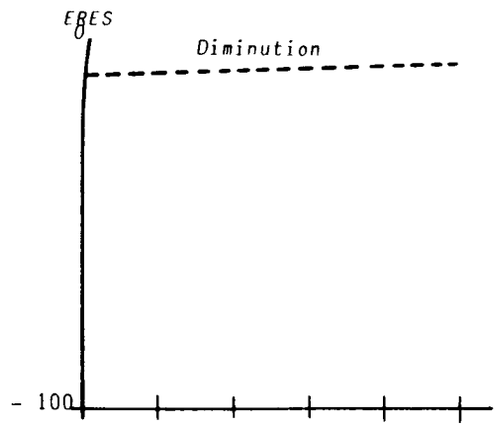
- le coefficient d'échange radiatif hR, proportionnel à TMR + Tair, augmente ; l'écart entre Tclo et TMR s'accroît également ; les échanges radiatifs, fonctions de l'un et de l'autre, suivent le même sens de variation, passant de 37.95 W pour Tair = 15°C à 63.86 W pour Tair = 25°C, soit un écart de 25.91 W.

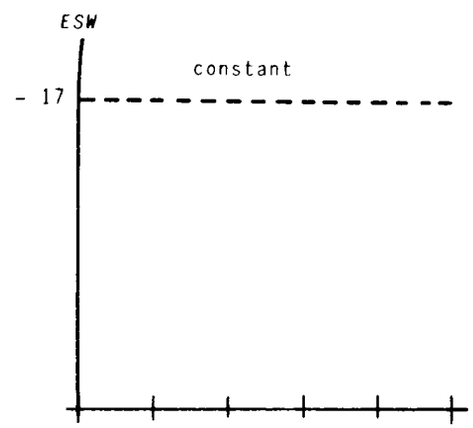
TAIR	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
15.00	31.60	33.85	22.84	141.45	-11.45	-18.80	-4.27	-17.61	-37.95	-72.74	-21.36
16.00	31.79	33.93	23.12	141.45	-11.28	-18.62	-4.06	-17.61	-40.32	-65.05	-15.47
17.00	31.99	34.01	23.40	141.45	-11.09	-18.41	-3.85	-17.61	-42.72	-57.56	-9.78
18.00	32.18	34.10	23.69	141.45	-10.89	-18.18	-3.64	-17.61	-45.19	-50.34	-4.40
19.00	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
20.00	32.58	34.27	24.28	141.45	-10.45	-17.63	-3.23	-17.61	-50.29	-36.70	5.54
21.00	32.77	34.36	24.59	141.45	-10.21	-17.31	-3.02	-17.61	-52.91	-30.30	10.09
22.00	32.97	34.45	24.90	141.45	-9.95	-16.96	-2.82	-17.61	-55.58	-24.56	13.98
23.00	33.16	34.54	25.21	141.45	-9.67	-16.58	-2.61	-17.61	-58.28	-19.64	17.06
24.00	33.36	34.64	25.53	141.45	-9.38	-16.16	-2.41	-17.61	-61.06	-14.77	20.06
25.00	33.56	34.73	25.86	141.45	-9.07	-15.70	-2.20	-17.61	-63.86	-10.06	22.94

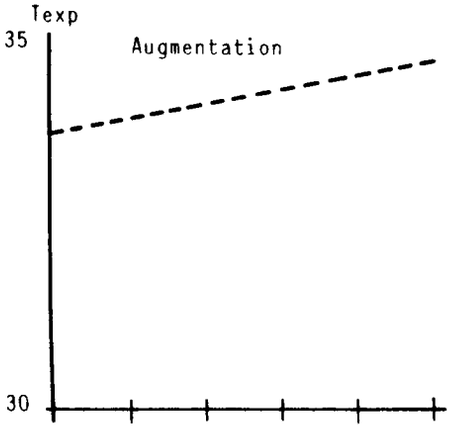
Variation de Tair

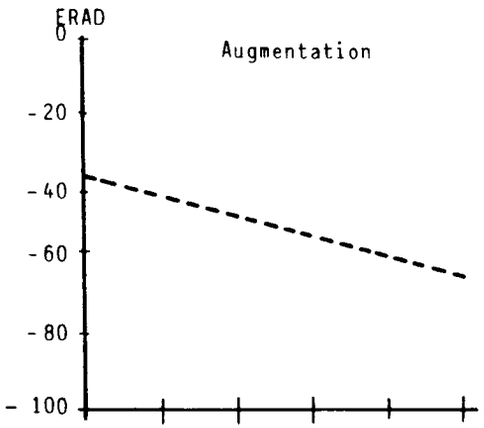

TSK
35
Augmentation
30
15
17
19
21
23
25

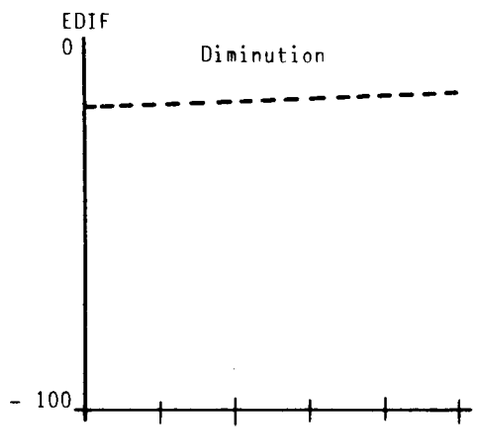

XMT
constant
141


ERES
0
Diminution
- 100

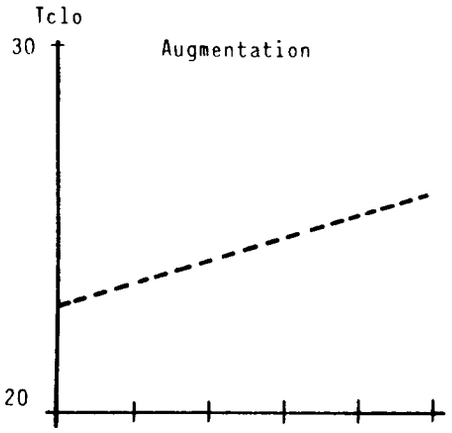

ESW
constant
- 17

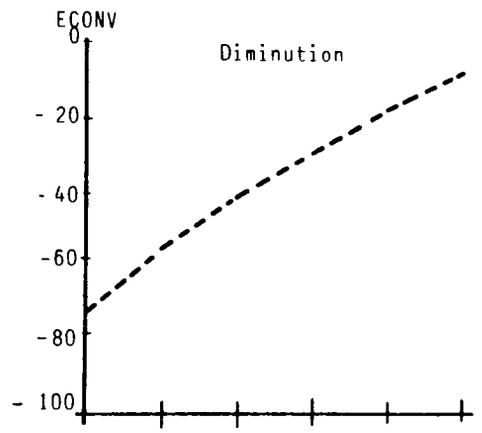

Texp
35
Augmentation
30

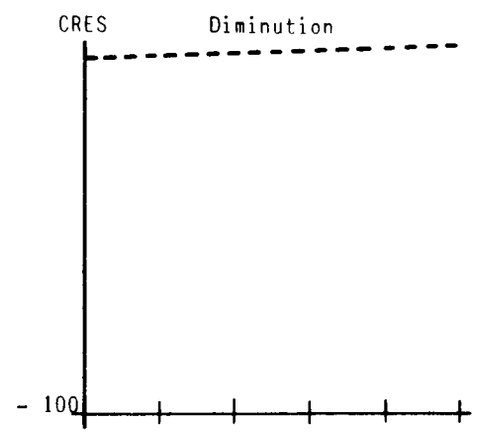

ERAD
0
Augmentation
- 20
- 40
- 60
- 80
- 100

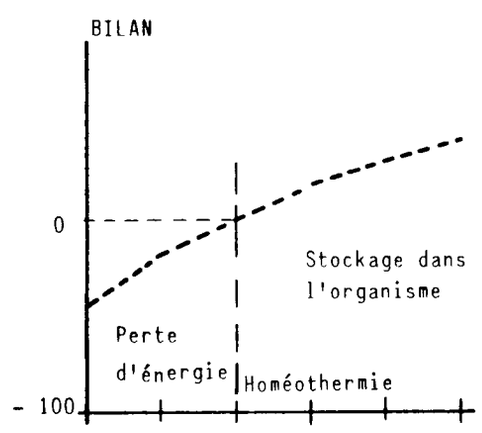

EDIF
0
Diminution
- 100


T A I R
entre 15 et 25°C


Tclo
30
Augmentation
20


ECONV
0
Diminution
- 20
- 40
- 60
- 80
- 100


CRES
Diminution
- 100


BILAN
0
Stockage dans
l'organisme
Perte
d'énergie
Homéothermie
- 100

IV - VARIATION DE TMR (15 et 25°C)

Tair = 19°C
Vair = 0.1 m/s
Rclo = 1.2 clo
ACT = 1.3 Met
PHI = 75 %

1 - Tclo augmente, l'écart entre Tclo et TMR diminue de 7° à 1.5°C. Le coefficient d'échange radiatif hr, proportionnel à TMR + Tair augmente ;
hr augmente moins vite que ne diminue l'écart (Tclo - TMR) ;
globalement, les échanges radiatifs ERAD diminuent, passant de 67 W à 17 W.

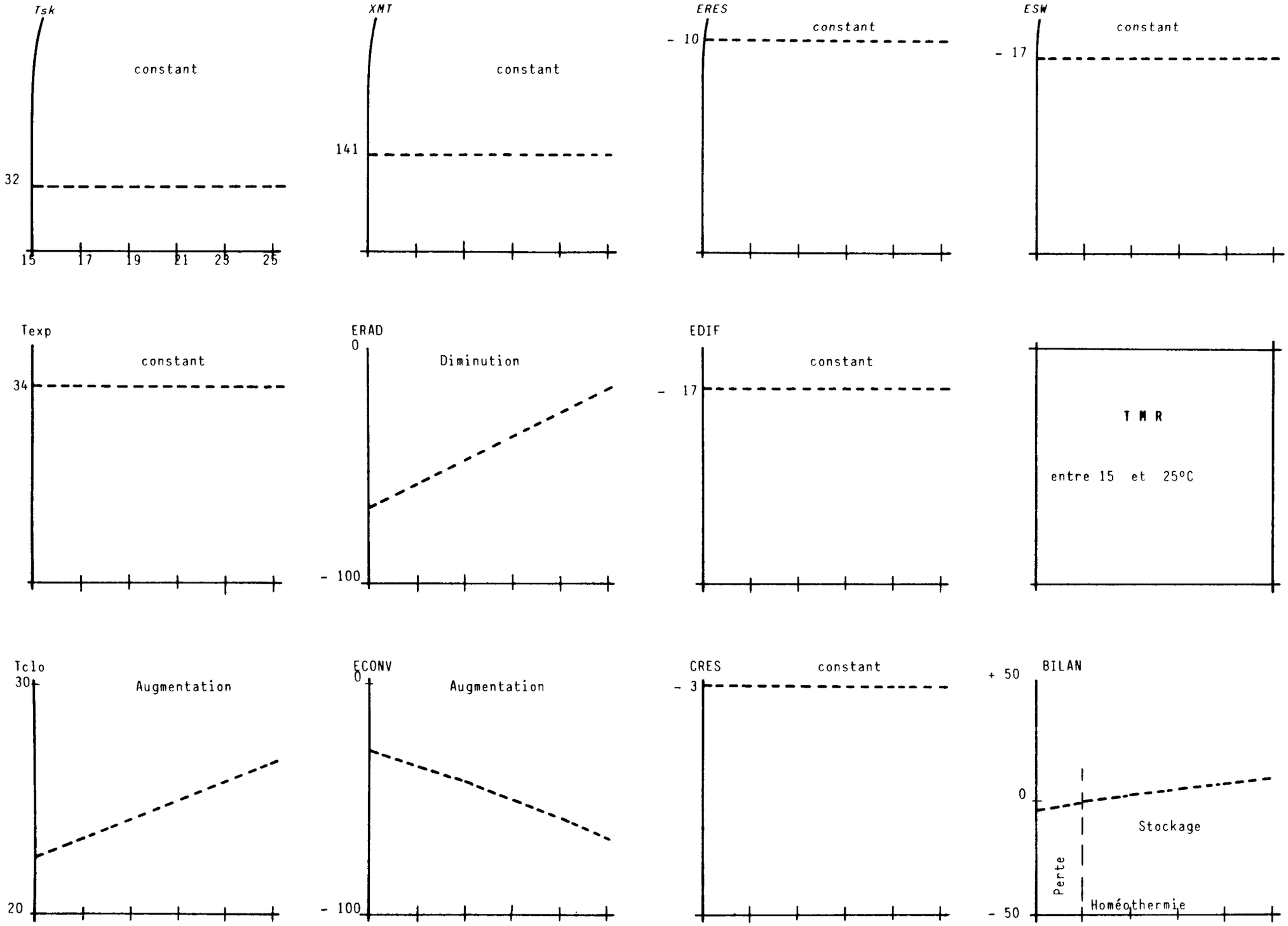
2 - La vitesse d'air étant faible (0.1 m/s), le coefficient d'échange convectif hc ne dépend que de l'écart de température entre Tclo et Tair.
Les échanges convectifs, liés directement au coefficient hc, augmentent, variant de 30 W à 66 W.

3 - Le bilan global des échanges varie d'une valeur négative (perte de l'organisme) à une valeur positive (stockage) avec un résultat voisin de 0 pour TMR = 19°C.
Les échanges radiatifs ERAD sont directement proportionnels à (Tclo - TMR), alors que les échanges convectifs varient par l'intermédiaire du coefficient hc, fonction lui de (Tclo - Tair) ; la variation de ERAD est, de ce fait, plus importante que celle de ECONV ; le bilan a donc le même sens de variation que ERAD.

Dans le cas où Vair serait supérieure, les échanges convectifs ECONV seraient alors constants et ne compenseraient plus la diminution des pertes dues à ERAD ; le stockage augmenterait plus rapidement.

TMR	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
15.00	32.38	34.18	22.45	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-67.43	-30.25	-5.87
16.00	32.38	34.18	22.82	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-62.47	-33.28	-3.94
17.00	32.38	34.18	23.20	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-57.55	-36.49	-2.24
18.00	32.38	34.18	23.59	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-52.64	-39.88	-0.72
19.00	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
20.00	32.38	34.18	24.40	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-42.84	-47.11	1.86
21.00	32.38	34.18	24.82	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-37.97	-50.99	2.85
22.00	32.38	34.18	25.26	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-33.19	-55.13	3.49
23.00	32.38	34.18	25.66	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-28.05	-59.00	4.77
24.00	32.38	34.18	26.05	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-22.72	-62.80	6.29
25.00	32.38	34.18	26.45	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-17.33	-66.67	7.80

Variation de TMR


Tsk
constant
32
15
17
19
21
23
25
XMT
constant
141
ERES
constant
- 10
ESW
constant
- 17
Texp
constant
34
ERAD
0
Diminution
- 100
EDIF
constant
- 17
T M R
entre 15 et 25°C
Tclo
30
Augmentation
20
ECONV
0
Augmentation
- 100
CRES
constant
- 3
BILAN
+ 50
0
- 50
Stockage
Perte
Homéothermie

V - VARIATION DE LA VITESSE D'AIR ENTRE 0.05 et 0.25 m/s

Seuls ERAD et ECONV varient à partir de Vair $\simeq$ 0.13 m/s.

Le palier correspond au coefficient d'échange convectif hc constant

$$hc = \max \left[2.38 \, (Tair - Tclo)^{0.15}, \; 10 \, Vair^{0.5} \right]$$

Le bilan énergétique n'est plus constant lorsque l'on a l'égalité entre les deux termes :

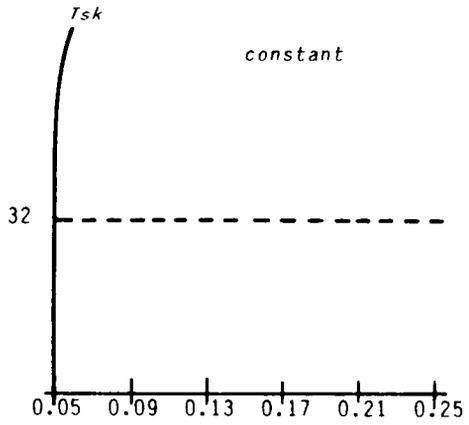
$$2.38 \, (Tair - Tclo)^{0.25} = 10 \, Vair^{0.5}$$

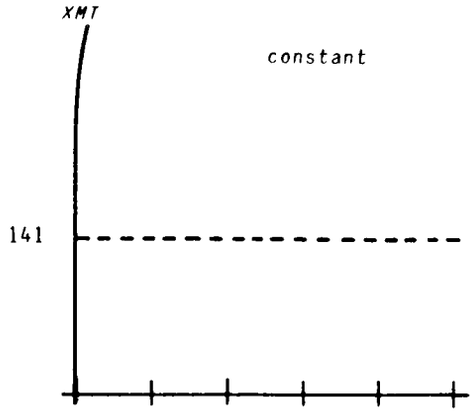
soit Vair = 0.127 m/s

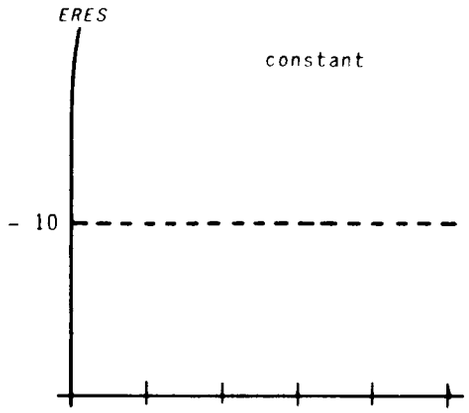
En dessous de cette vitesse (dans le cas traité), on est donc en convection libre et le bilan reste constant.

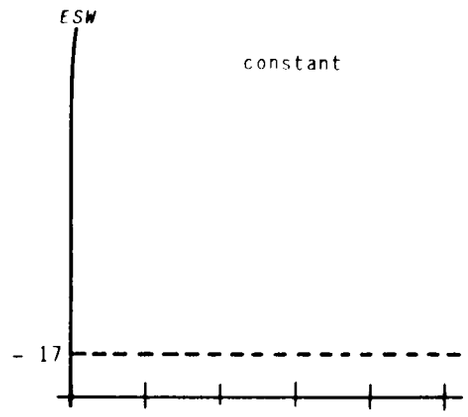
VAIR	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
0.05	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
0.07	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
0.09	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
0.11	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
0.13	32.38	34.18	23.97	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.57	-43.76	0.47
0.15	32.38	34.18	23.88	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-46.83	-45.73	-0.75
0.17	32.38	34.18	23.80	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-46.17	-47.81	-2.17
0.19	32.38	34.18	23.72	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-45.58	-49.78	-3.55
0.21	32.38	34.18	23.65	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-45.00	-51.59	-4.78
0.23	32.38	34.18	23.59	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-44.50	-53.40	-6.10
0.25	32.38	34.18	23.53	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-44.02	-55.09	-7.30

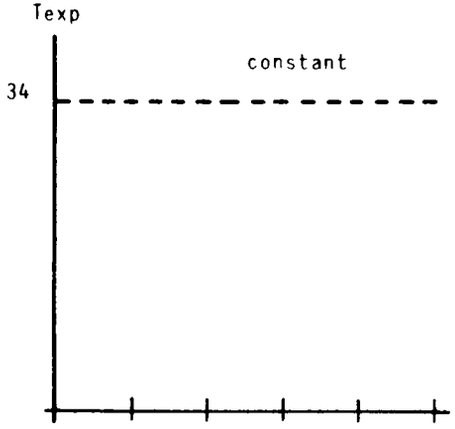
Variation de Vair

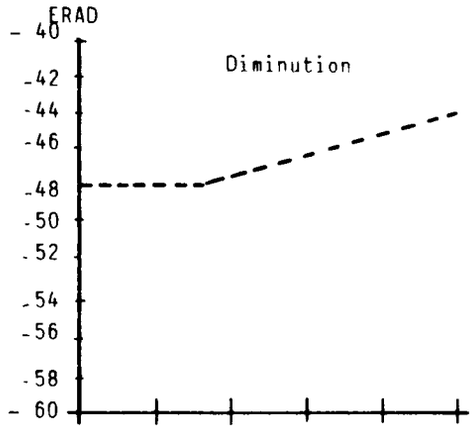

Tsk
constant
32
0.05 0.09 0.13 0.17 0.21 0.25

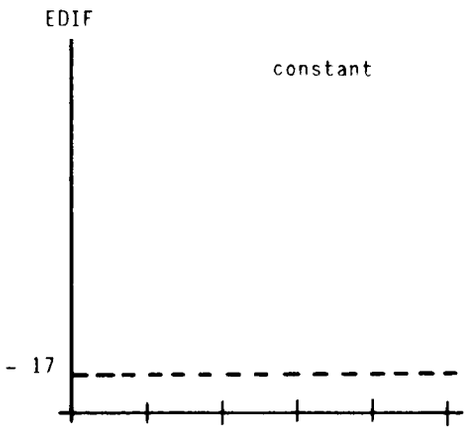

XMT
constant
141

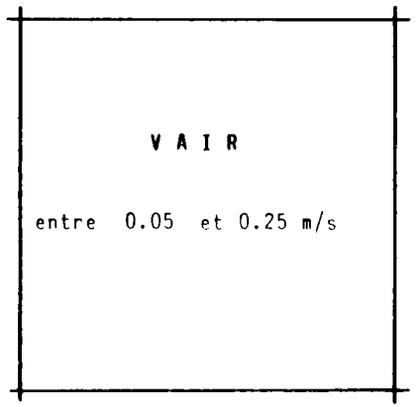

ERES
constant
- 10

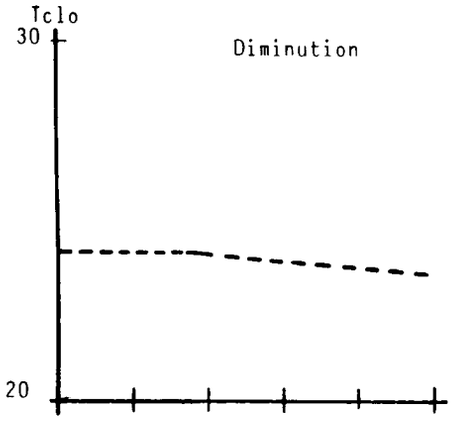

ESW
constant
- 17

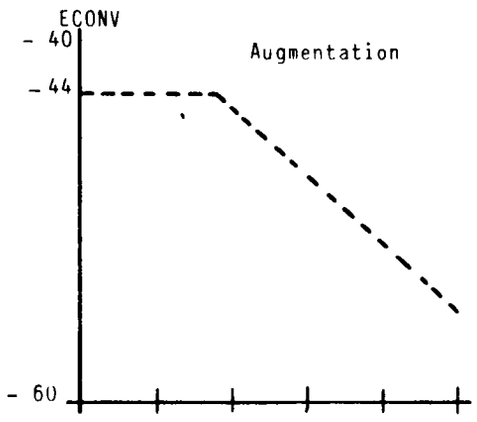

Texp
constant
34

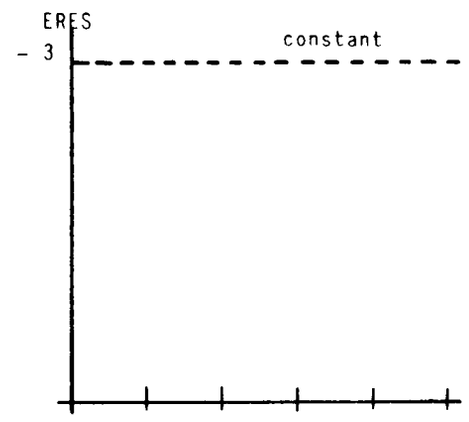

ERAD
Diminution
- 40
-42
-44
-46
-48
-50
-52
-54
-56
-58
- 60

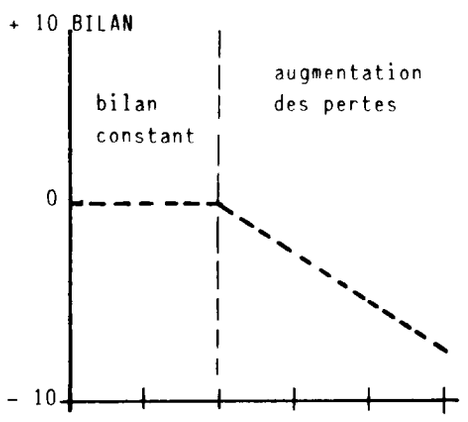

EDIF
constant
- 17


VAIR
entre 0.05 et 0.25 m/s


Tclo
Diminution
30
20


ECONV
Augmentation
- 40
- 44
- 60


ERES
constant
- 3


+ 10 BILAN
bilan
constant
augmentation
des pertes
0
- 10

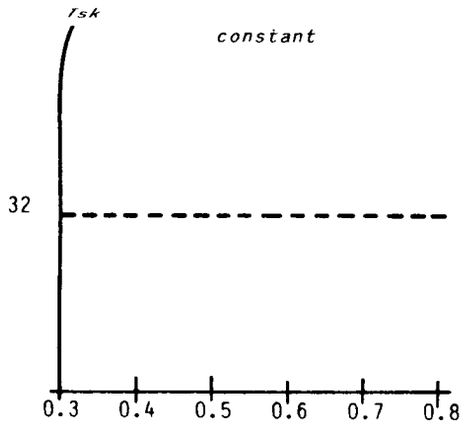
VI - VARIATION DE L'HUMIDITE RELATIVE PHI entre 30 et 80 %

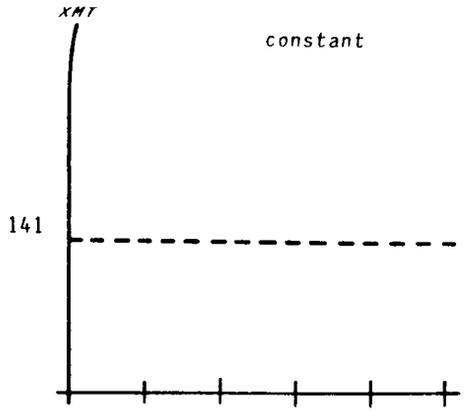
Seuls les échanges faisant intervenir la teneur en eau de l'air ambiant varient, et principalement les échanges par évaporation respiratoire et diffusion de vapeur d'eau.
Quand l'humidité relative augmente, le pouvoir de déstockage par évaporation diminue, ce qui augmente le stockage dans l'organisme.

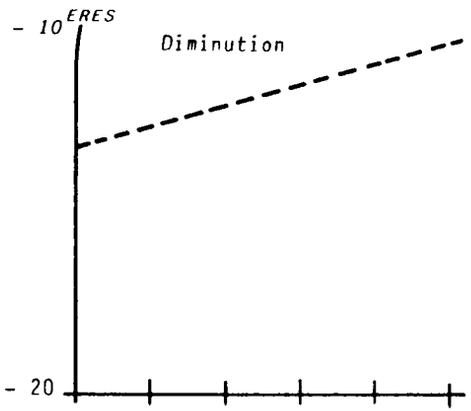
Les échanges par évaporation de la sueur, lorsque la mouillure de la peau est suffisamment faible, ne dépendent pas de HR.
Dans le cas d'une mouillure plus importante, la pression partielle de vapeur d'eau intervient dans la formulation de ESW ; ce cas n'est pas pris en compte par le programme, dans sa version actuelle.

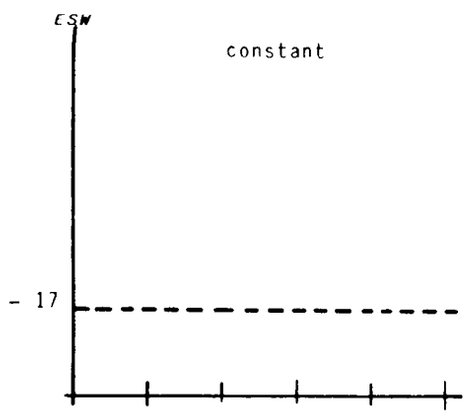
PHI	TSK	TEXP	TCLO	XMT	ERES	EDIF	CRES	ESW	ERAD	ECONV	BILAN
0.30	32.38	33.99	23.98	141.45	-13.34	-23.43	-3.39	-17.61	-47.72	-43.40	-7.44
0.35	32.38	34.01	23.98	141.45	-13.04	-22.82	-3.40	-17.61	-47.72	-43.40	-6.54
0.40	32.38	34.03	23.98	141.45	-12.75	-22.21	-3.40	-17.61	-47.72	-43.40	-5.64
0.45	32.38	34.05	23.98	141.45	-12.45	-21.59	-3.41	-17.61	-47.72	-43.40	-4.73
0.50	32.38	34.07	23.98	141.45	-12.16	-20.98	-3.41	-17.61	-47.72	-43.40	-3.83
0.55	32.38	34.10	23.98	141.45	-11.86	-20.37	-3.42	-17.61	-47.72	-43.40	-2.92
0.60	32.38	34.12	23.98	141.45	-11.57	-19.76	-3.42	-17.61	-47.72	-43.40	-2.02
0.65	32.38	34.14	23.98	141.45	-11.27	-19.14	-3.43	-17.61	-47.72	-43.40	-1.12
0.70	32.38	34.16	23.98	141.45	-10.97	-18.53	-3.43	-17.61	-47.72	-43.40	-0.21
0.75	32.38	34.18	23.98	141.45	-10.68	-17.92	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	0.69
0.80	32.38	34.21	23.98	141.45	-10.38	-17.30	-3.44	-17.61	-47.72	-43.40	1.59

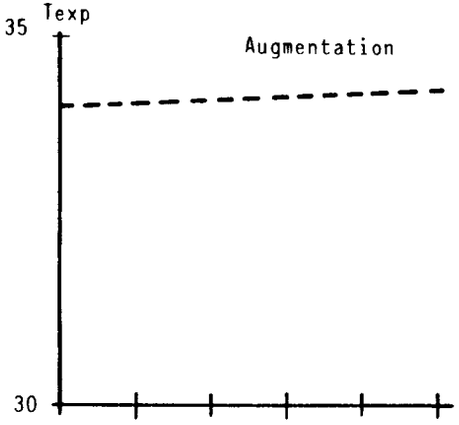
Variation de PHI

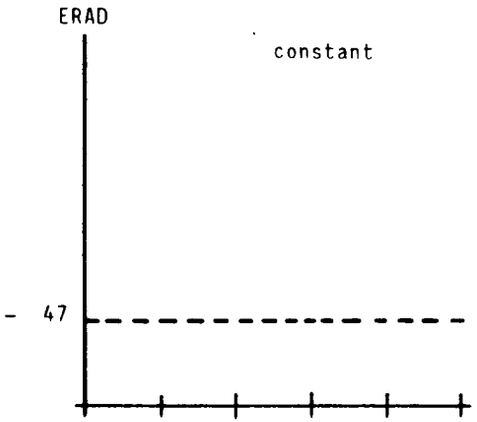

Tsk
constant
32
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8

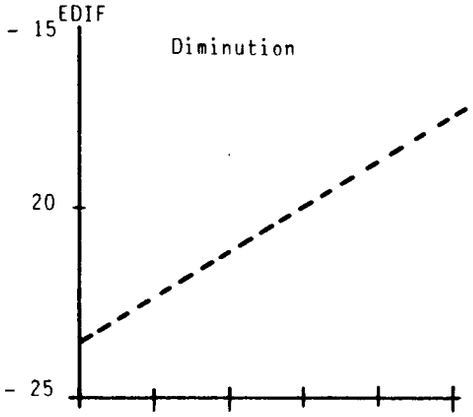

XMT
constant
141

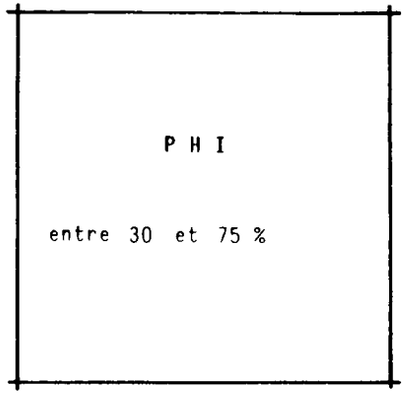

- 10
ERES
Diminution
- 20

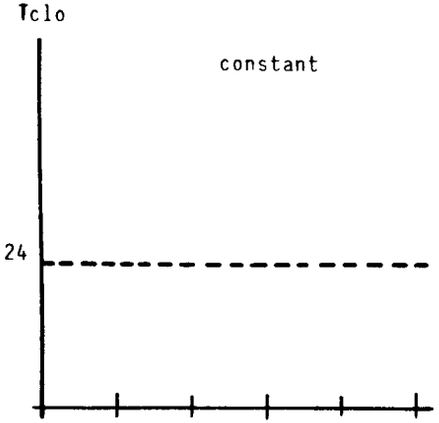

ESW
constant
- 17

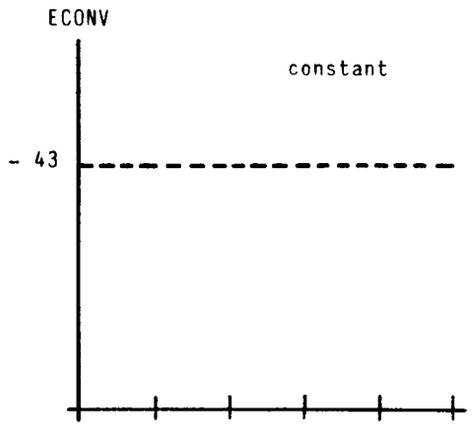

35
Texp
Augmentation
30

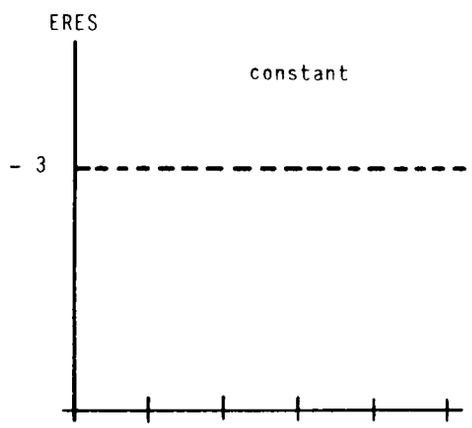

ERAD
constant
- 47

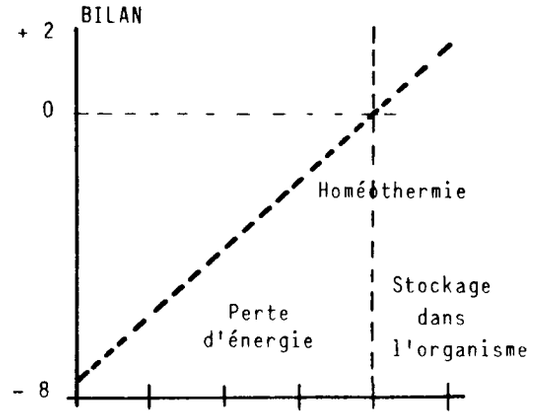

- 15
EDIF
Diminution
20
- 25


P H I
entre 30 et 75 %


Tclo
constant
24


ECONV
constant
- 43


ERES
constant
- 3


BILAN
+ 2
0
- 8
Homéothermie
Perte
d'énergie
Stockage
dans
l'organisme

CONCLUSION

- La situation initiale étudiée, pour laquelle le bilan des échanges entre le sujet et l'environnement est nul (homéothermie), peut être qualifiée d'un point de vue thermique comme confortable.
  Cette situation correspond à des conditions de travail dans un bureau avec une faible activité physique.

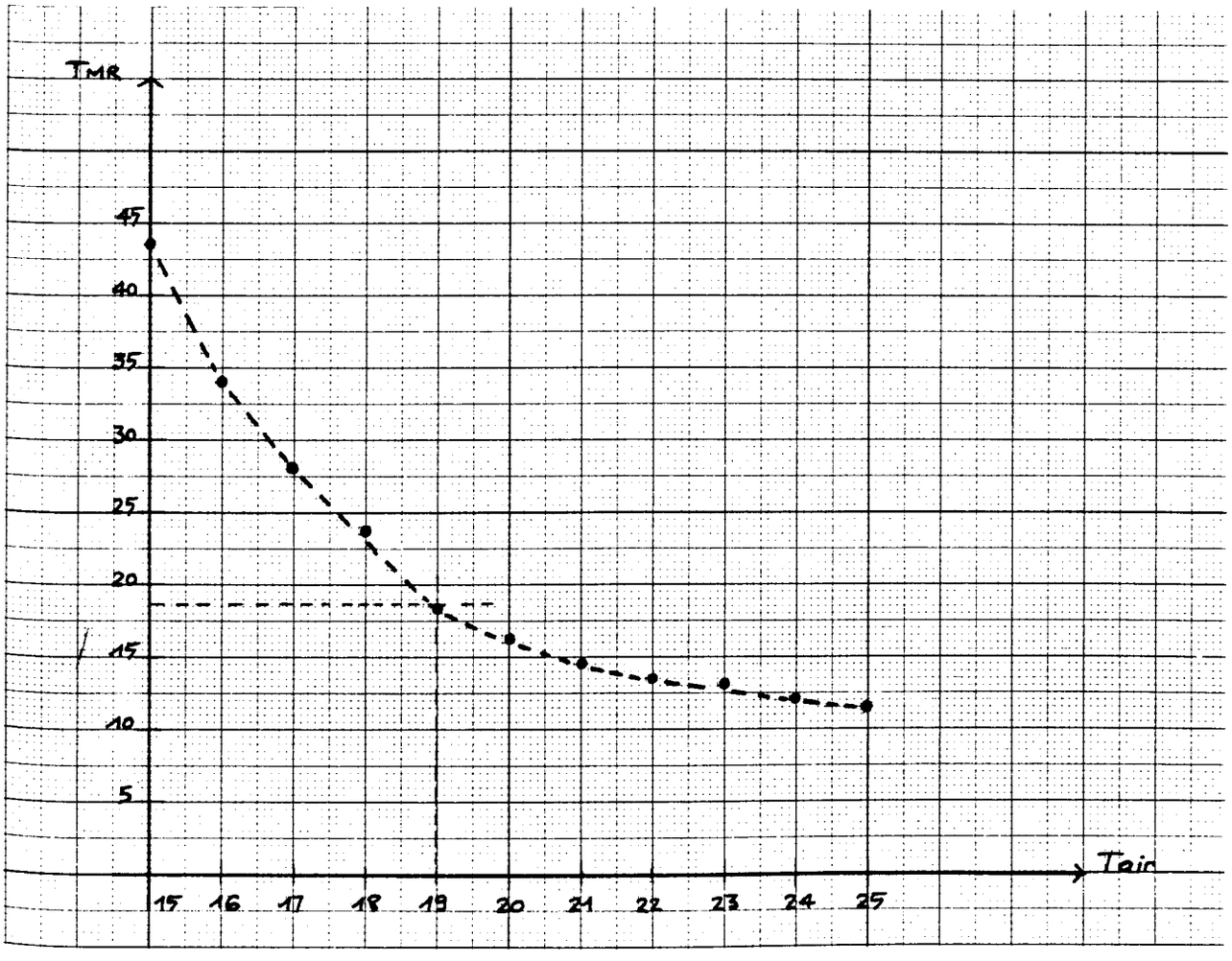
- La variation de l'un des paramètres entre les bornes (voir tableau) entraîne un déséquilibre du bilan : perte d'énergie (bilan négatif) ou stockage dans l'organisme (bilan positif) ; ce déséquilibre peut être compensé par la variation d'un autre paramètre (bloc "annulation" dans le programme), par exemple, augmentation de la température d'air et diminution de la résistance des vêtements et inversement.

  Ce cas fait apparaître une situation stable ; seul le paramètre activité, par la mise en jeu du métabolisme, est difficile à compenser. Ceci correspond à la situation vécue pour un travail en intérieur où l'activité physique peut amener un inconfort temporaire.

- Les variables qui ont servi à annuler le bilan sont la température d'air Tair et la température moyenne radiante TMR (voir courbe) ; la pente de la courbe, pour une température d'air supérieure à 19°C, est inférieure à celle pour une température d'air inférieure à 19°C ; en effet, pour Tair supérieure à 19°C, si Tair varie de 1°C, il faut une variation de 1°C de TMR ;
  en revanche, pour Tair inférieure à 19°C, si Tair varie de 1°C, il faut une variation de l'ordre de 7° pour TMR.

  Le programme peut traiter les variations des six paramètres les uns par rapport aux autres et sortir, sur imprimante, les combinaisons correspondant aux situations d'homéothermie.

TAIR	TMR	BILAN
15.00	43.77	-0.01
16.00	34.28	0.03
17.00	28.04	0.01
18.00	23.51	0.03
19.00	18.46	-0.03
20.00	15.95	0.05
21.00	14.90	0.03
22.00	13.91	-0.04
23.00	12.99	0.01
24.00	12.10	0.04
25.00	11.25	-0.04



Bilan nul

Variation de Tair et TMR

4 - SENSATION DE CONFORT

4.1. Influence du paramètre temps

4.2. Confort thermohygrométrique subjectif

4.3. Environnement total

4.4. Indices de confort

4.4.1. La température opérative

4.4.2. Effet de courant d'air

4.4.3. Exigences de confort pour des conditions d'hiver
Exigences de confort pour des conditions d'été

4.4.4. La température effective (E.T.)

4.4.5. La température effective standard (S.E.T.)

4.4.6. La température résultante (Tres)

4.4.7. La température subjective

4.4.8. P4SR (Predicted Four Hours Sweat Rate)

4.4.9. Predicted Mean Vote (PMV)

4.4.10 The Index Thermal Stress (ITS)

4.4.11 The Heat Stress Index (HSI)

4.5. Evaluation du confort thermique

4.6. Aspects de l'inconfort

4.7. La sensation de confort et la température moyenne cutanée

4 - SENSATION DE CONFORT

Alors même que les conditions physiques et physiologiques du bilan thermique sont réunies, l'impression de confort ou d'inconfort ressentie peut différer selon les individus.

Des chercheurs, parmi lesquels GRIVEL (1973), HOUDAS (1973), WOLF (1972) et FANGER, ont essayé d'approcher au moyen d'expériences dans des ambiances contrôlées suivies de questionnaires, la dualité confort objectif / confort subjectif.

Le corps humain est le siège de nombreuses transformations chimiques et d'efforts physiques, lesquels s'accompagnent d'un dégagement de chaleur. Cette chaleur produite par métabolisme est évacuée sous forme de chaleur sensible par rayonnement, convection et respiration et sous forme de chaleur latente par perspiration, sudation et respiration. Pour que les principales fonctions physiologiques du corps humain soient entretenues, celui-ci doit évacuer une quantité de chaleur variable avec son activité, tout en maintenant sa température constante et égale à 37°C, ceci dans des conditions d'environnement variables.

L'impression de confort est ressentie physiologiquement lorsque la température interne du corps humain s'établit spontanément à 37°C sans l'intervention de l'un des systèmes de régulation dont il dispose. Lorsque la température extérieure est trop faible, la constriction des vaisseaux sanguins conduit à un abaissement de la température de surface de la peau, donc à une diminution des échanges. Inversement, la vasodilatation au voisinage de la peau et la transpiration permettent de lutter contre la chaleur. Ces différentes compensations s'accompagnent d'une sensation d'inconfort : sensation de froid ou de chaud.

4.1. Influence du paramètre temps

Si la notion de confort est liée à la température cutanée, il faut alors faire intervenir le facteur "temps". Lorsqu'on expose, en effet, un sujet à une température ambiante plus basse par exemple, ses températures cutanées ne diminuent pas instantanément ; si l'application du froid est de très courte durée, l'organisme ne détectera pas une modification de confort. Pour pouvoir apprécier le confort d'une ambiance, un sujet, surtout s'il est habillé, doit séjourner suffisamment longtemps pour parvenir en régime stable.

Soit par exemple un sujet dans une ambiance froide, donc différente de la neutralité et inconfortable ; il passe dans une ambiance moins froide. Il peut alors se déclarer en confort thermique alors même qu'il n'est toujours pas à la neutralité thermique. Il s'agit d'un confort "transitoire" ; au bout d'un moment, alors que l'ambiance n'aura pas changé, le sujet se déclarera en inconfort "frais modéré".

La notion de confort peut varier dans une même ambiance parce que les récepteurs dont disposent le sujet et les structures nerveuses qui intègrent les signaux qui en sont issus, ont un certain mode de fonctionnement : en particulier, ces récepteurs sont non seulement sensibles à un niveau de température (T) mais aussi à sa variation dans le temps (dT/dt).

La modification du confort en fonction du temps est un phénomène physiologique précis et ne résulte pas nécessairement d'un "changement d'avis" du sujet interrogé.

Un sujet peut-il alors être (ou ne pas être) en neutralité thermique et déclarer l'ambiance inconfortable (ou confortable) ? A cette question, Y. HOUDAS répond "oui" en régime transitoire, "non" en régime permanent. Admettons, en effet, que le sujet ne soit pas exactement à la neutralité ; si, par contre, il se déclare en confort thermique, c'est qu'il ne met pas en jeu de mécanismes régulateurs ; c'est donc que le fait de ne pas être à la neutralité entraîne un déséquilibre thermique trop faible pour être détecté ; la mise en jeu des mécanismes régulateurs ne se fait en effet qu'après un cer-

tain seuil de déséquilibre. Si le sujet reste dans cette ambiance, le déséquilibre va se poursuivre et il viendra un moment où il atteindra le seuil de mise en jeu des mécanismes régulateurs : frissons ou sudation ; le sujet ne sera plus alors en confort.

Ainsi, en régime permanent, il y a concordance entre neutralité thermique et confort thermique.

Si la production de chaleur par métabolisme n'est pas égale aux pertes, la différence est alors stockée ; il en résulte un changement dans la température interne du corps.
Sur de longues périodes de temps, le stockage doit être nul ; cependant sur une courte période, la capacité thermique du corps est suffisamment grande pour absorber des déséquilibres temporaires de chaleur, qu'ils soient en stockage ou en perte ; ceci s'accompagne alors d'une modification de la température interne.
Dans les environnements très chauds, où le mécanisme de la sueur n'est pas suffisant pour maintenir l'équilibre thermique, le temps d'exposition admissible est déterminé par le temps mis par le corps à atteindre un niveau dangereux.
La chaleur spécifique du corps est évaluée par GAGGE et NISHI (1977) à 3.49 KJ/kg, c'est à dire environ 83 % de celle de l'eau. Pour un individu de 70 kg, avec une surface corporelle de 1.8 m2, la variation moyenne de la température du corps en fonction du temps est :

$$dT / dt = 7.4.10^{-6} S$$

où S (en W/m2) est la chaleur stockée.
A une chaleur stockée de 38 W/m2 en moyenne, pendant une heure, correspond une élévation de température interne de 1°C.

d'après Mc INTYRE - Indoor climate (Réf. 16)

4.2. Confort thermohygrométrique subjectif

Le confort thermo-hygrométrique subjectif est défini opérationnellement comme étant la condition mentale d'un individu dans laquelle, alors qu'il est engagé dans une activité quelconque (travail, repos...), il ne saurait s'il préfère un changement en plus ou en moins de la température ambiante. En pratique, le confort est déterminé par diverses techniques qui reposent toutes sur des enquêtes faites auprès de groupes de personnes. Le confort et l'inconfort thermique subjectifs sont considérés comme une expérience sensorielle et affective que le sujet fait dans une ambiance qui ne change pas ou change indépendamment de lui.

On demande à une personne de procéder à un codage sur une échelle, c'est à dire d'affecter un nombre de son choix à ce qu'il estime être l'intensité de son inconfort, étant entendu qu'un nombre convenu est attribué à l'intensité d'un inconfort connu qui sert de référence.

Sur une échelle donnée, le sujet n'a la possibilité d'utiliser qu'une marge limitée d'échelons pour exprimer son inconfort ; l'échelle la plus répandue est celle de BEDFORD (1936) qui comporte sept points du pôle "trop chaud" au pôle "trop froid" en passant par les intermédiaires "modérément chaud", "tiède", "confortable", "frais", "modérément froid". Le sujet doit se placer sur un des sept échelons ("comfort vote").

Les résultats publiés (American Society of Heating à CLEVELAND, John B. PIERCE Fondation à YALE, Université Technique du DANEMARK) montrent qu'il n'existe pas une combinaison unique des paramètres thermo-hygrométriques correspondant au confort subjectif, mais une multitude définissant une marge caractérisée par une valeur centrale (pourcentage le plus élevé de personnes satisfaites) et des valeurs limites (certain pourcentage de personnes satisfaites).

Le confort (absence de gêne par rapport à une activité principale), subjectivement parlant, n'est pas nécessairement ce qui garantit un équilibre du bilan thermique organique assuré avec le minimum de réactions régulatrices ; c'est éventuellement ce qui rend l'homme actif et apte au meilleur de ses capacités, c'est ce qui le conforte ; l'inconfort étant ce qui le contrarie et le diminue.

On a recherché la possibilité de prédire le confort thermique subjectif en l'exprimant en fonction de variables déterminantes (paramètres thermo-hygrométriques, état vestimentaire, métabolisme, etc...). Cette démarche consiste à objectiver le confort thermique, c'est à dire à s'affranchir des conditions concrètes dans lesquelles on l'observe (enquête) et à en faire une entité strictement déterminée ; la réalité à laquelle on aboutit est alors sensée prédire le confort subjectif pour ne pas dire le remplacer ; pour cela, FANGER (1970) a retenu trois critères objectifs du confort subjectif :

- l'équilibre thermique, c'est à dire la satisfaction de l'équation du bilan thermique ;

- une valeur de la température cutanée moyenne, fonction linéaire décroissante du niveau métabolique croissant ;

- une secrétion sudorale moyenne, fonction linéaire croissante du niveau métabolique croissant.

La plupart des études expérimentales réalisées le sont en ambiance homogène où l'on a même soin de rendre égale température de l'air et température moyenne de rayonnement. Or, dans les conditions réelles, les ambiances sont hétérogènes : présence de un ou plusieurs points de chauffe et de zones plus fraîches (gradient entre les 2), variations temporelles de température, courants d'air, déplacements, etc... Que devient le confort, ou plutôt les divers conforts dans ces conditions ?

Un autre problème pratique est posé par l'interaction des conditions thermo-hygrométriques et d'autres conditions contraignantes ou non, simultanément présentes (éclairage, bruit, couleur, densité d'occupation humaine, etc...).

Reste enfin à faire la part de ce qui, dans le confort, revient aux processus physiologiques, aux aspects sociologiques et à la réalité psychologique ; le confort, pourquoi ?

- créer les conditions de stricte neutralité et de bien-être passif (le "comfort" anglo-saxon") ;

- rechercher les conditions d'efficience maximale ;

- réaliser des conditions environnantes favorisant le développement de l'homme total, conditions que FOURASTIE (1962) voit dans celles "qui prévalent dans les climats tempérés aux plus belles journées du début de printemps".

4.3. Environnement total

Le problème du confort existe parce que l'Homme va vivre dans des climats auxquels il n'est naturellement pas adapté et parce qu'il crée des milieux artificiels.

Les conditions thermo-hygrométriques externes sont un aspect de l'ambiance physique, de même que les conditions lumineuses, sonores, etc... En outre, l'ambiance physique n'est,elle-même,qu'un aspect de l'environnement total qui en comporte bien d'autres : le site, l'espace, le milieu bâti, le mobilier, le vêtement, etc... La réalité première est cet environnement total et en isoler un aspect ponctuel comporte par là même un risque. En effet, celui-ci est toujours présent et l'Homme entretient des rapports avec lui, même lorsque, pour des besoins d'études, on centre son attention sur un de ses seuls aspects. C'est dans ce cas précisément que l'importance de l'environnement total réel risque de nous échapper et que l'on élaborera des normes dont la valeur pratique sera faible.

Un certain degré d'humidité de l'air par exemple peut ne pas avoir la même signification pour un sujet qui se trouve à l'air libre ou dans un espace confiné ni éveiller en lui les mêmes impressions subjectives. Il est donc nécessaire, lorsqu'on parle de chaleur, de froid, d'humidité, etc... d'indiquer à quels environnements totaux ces paramètres appartiennent.

4.4. Indices de confort

L'ambition des indices de confort est de décrire à l'aide d'un seul paramètre certaines conditions physiques du confort.
Il n'existe pas d'indice universel de confort qui puisse être appliqué pour décider si un environnement est acceptable ou non.
Les recommandations collectées au travers de la bibliographie (Mc Intyre, Givoni, Fanger...) sont basées sur des observations expérimentales effectuées sur un certain nombre d'individus de toutes régions et pays.

L'application de règles ne peut pas garantir un état de confort thermique standard. De plus, certaines personnes seront tolérantes pour des conditions thermiques hors des limites données.

Comfort Indices compared

Index	Variables	Range	Comments
Effective Temperature ET	T_a, RH, v 2 levels clo	$0 < ET < 45°C$ $v < 2{\cdot}5$ m/s	Major index, now superseded. Over-estimated effect of humidity at low temperatures.
Corrected Effective Temperature CET	T_a, T_r, RH, v		As above. Used in British Armed Forces.
Resultant Temperature T_{res}	T_a, T_{wb}, v	$20 < T_{res} < 40°C$ $v < 3$ m/s	Similar to ET, but more accurate. Separate charts for nude-sedentary and clothed-active.
Equivalent Temperature T_{eq}	T_a, T_r, v	$8 < T_{eq} < 24$ $v < 0{\cdot}5$	Originally defined as eupatheoscope reading. Later defined by Bedford's regression equation.
Fanger's Comfort Equation	All	Comfort condition	
Predicted Mean Vote PMV	All	$2{\cdot}5 < PMV < 5{\cdot}5$	No range stated, but PMV becomes less certain away from thermal comfort.
Standard Effective Temperature SET	All	Shivering to upper limit of prescription zone	Based on model of physiological response. Most general index.
New Effective Temperature ET*	T_a, RH	Sedentary, light clothing only	Used by ASHRAE for indoor comfort zone.
Subjective Temperature T_{sub}	T_a, T_r, v, H, I_{clo}	Near comfort	Simple index used to predict comfort conditions, based on Fanger's equation.

(Extrait de Mc INTYRE - Indoor climate)

4.4.1 La température opérative

La température opérative est celle d'une cavité fermée et isotherme dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement et convection que dans l'ambiance non isotherme où il se trouve réellement ; dans la plupart des applications, la température opérative est approximativement égale à la valeur moyenne de la température d'air. C'est un indice de confort bien adapté pour les échanges secs, ce qui est le cas en atmosphère froide.

Considérons l'équation : $H = R + C$

On peut définir en l'absence de rayonnement solaire un coefficient d'échange radiatif h_R tel que
$R = R_{iR} = h_R\ (T_{sp} - T_R)$ en W/m2

T_{sp} : température de surface de la peau
T_R : température radiante moyenne
R_{IR} : rayonnement infra-rouge

De même, les échanges par convection s'écrivent :

$$C = h_c\ (T_{sp} - T_{\grave{a}}) \text{ en W/m2}$$

h_c : coefficient de transfert de chaleur par convection

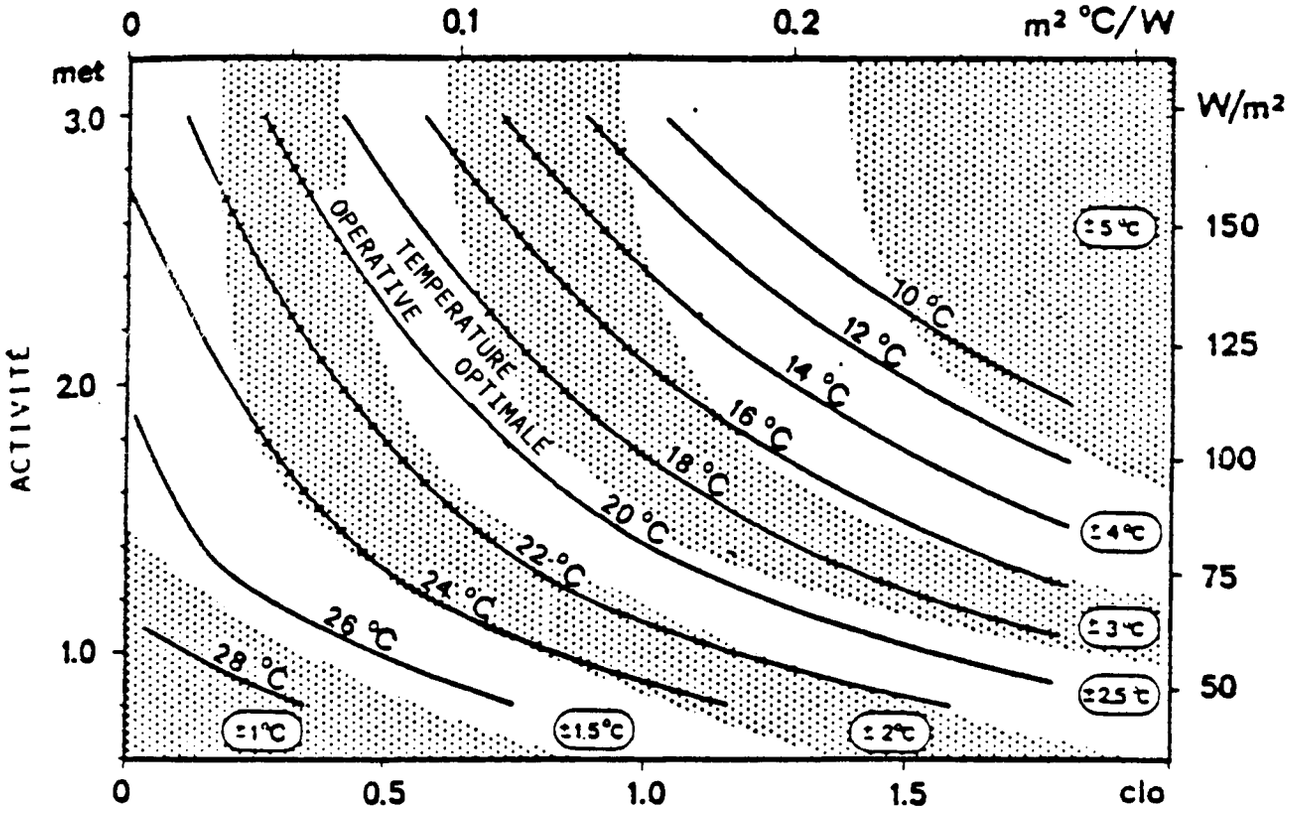
La température opérative To est alors définie analytiquement par :

$$H = h_{CR}\ (T_{sp} - To) \text{ en W/m2}$$

soit $To = \frac{h_R T_R + h_c T_a}{hcR}$ avec $h_{cR} = h_R + h_c$

Les courbes de FANGER montrent la température opérative optimale, c'est à dire celle qui satisfait le plus de personnes (80 %) pour un type d'activité et d'habillement.

Les parties ombrées indiquent l'écart acceptable autour de la température optimale ; cette zone acceptable est d'autant plus large que l'activité est forte et l'habillement important.

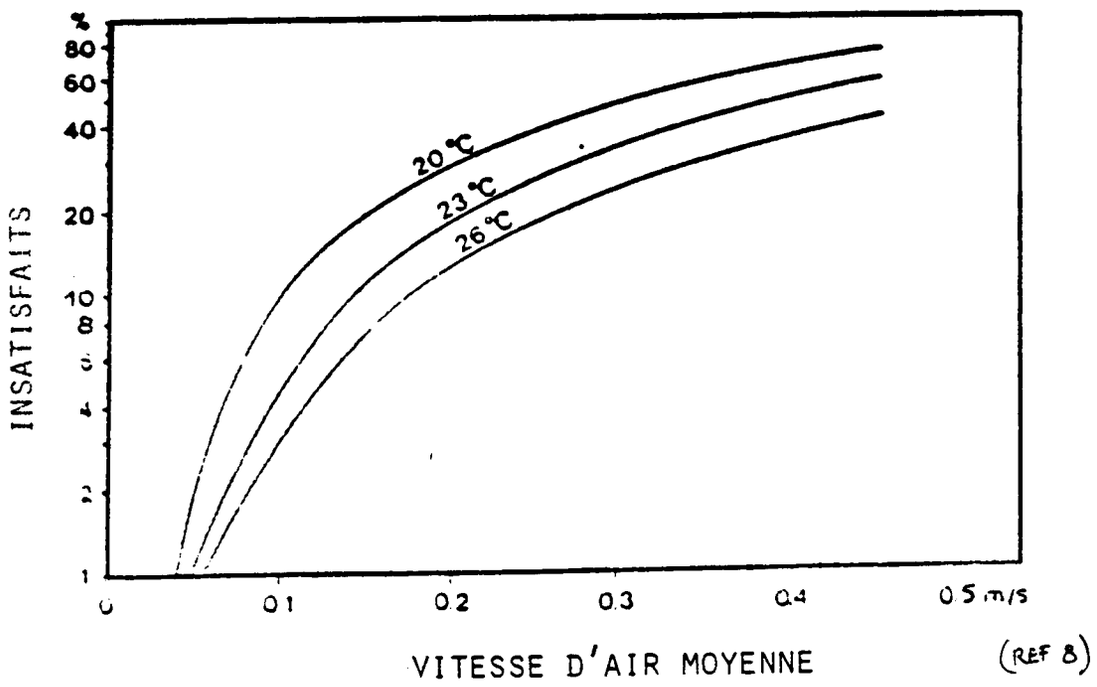


Le taux de métabolisme peut changer au cours de la journée et cela même pour un travail sédentaire. Des recherches menées par FANGER (Université du Danemark) montrent que le changement de métabolisme est dû, de manière générale, à une température opérative variant au cours de la journée de façon à maintenir un même niveau de confort thermique. Le système de régulation optimal devrait maintenir une sensation thermique constante plutôt qu'une température constante ; pour satisfaire cette exigence il devrait suivre un profil de température variable durant la journée.

Pour économiser de l'énergie, il est nécessaire de fixer une limite admissible de température la plus basse possible pour l'hiver et la plus haute pour l'été. La figure montre les possibilités offertes par l'augmentation du niveau d'isolation des vêtements sur l'abaissement des températures opérationnelles. On doit noter cependant qu'une température d'air basse nécessite une faible vitesse d'air.

4.4.2 Effet de courant d'air

L'effet de courant d'air est défini comme un refroidissement local du corps non désiré dû à un mouvement d'air ; la vitesse d'air moyenne admise est limitée à 0.15 m/s pour des conditions d'hiver et à 0.25 m/s pour des conditions d'été. FANGER a réalisé une expérience sur 100 sujets exposés à des vitesses d'air croissantes pour des niveaux de températures de 20°, 23° et 26° C ; les vitesses fluctuant de la même manière que celle observée habituellement dans la zone d'occupation de locaux ventilés.



Pourcentage d'insatisfaits (personnes ressentant un courant d'air) en fonction de la vitesse moyenne de l'air pour 3 températures d'air différentes.

4.4.3 Exigences de confort pour des conditions d'hiver et pour une activité légère, principalement sédentaire

. Température opérative comprise entre 20 et 24° C

. Différence de température d'air entre 1.1 et 0.1 m au-dessus du sol (niveaux tête et chevilles) inférieure à 3° C

. Température de surface du sol comprise normalement entre 19 et 26° C, les systèmes de chauffage par le sol pouvant être conçus pour 29° C

. Vitesse moyenne de l'air inférieure à 0.15 m/s

. Asymétrie de température radiante vis-à-vis d'une fenêtre ou tout autre paroi verticale froide inférieure à 10°C (pour une petite surface plane verticale située à 0.6 m au-dessus du sol)

. Asymétrie de température radiante vis-à-vis d'un plafond chaud (chauffé) inférieure à 5°C (pour une petite surface plane horizontale située à 0.6 m au-dessus du sol).

Exigences de confort pour des conditions d'été et une activité légère, principalement sédentaire

. Température opérative comprise entre 23 et 26°C

. Différence de température d'air entre 1.1 m et 0.1 m au-dessus du sol (niveaux tête et chevilles) inférieure à 3°C

. Vitesse moyenne de l'air inférieure à 0.25 m/s.

d'après P.O. FANGER (SFT 1983)

4.4.4. La température effective (E.T.)

La température effective est la température d'une ambiance dont l'atmosphère calme et saturée en humidité produirait la même sensation thermique qu'une situation donnée.

La détermination expérimentale pour l'établissement des diagrammes se fait en chambre bioclimatique. Deux chambres sont reliées par une porte, chacune d'entre elles pouvant avoir des conditions climatiques imposées différentes. Dans l'une, on impose les conditions à étudier, dans l'autre, dont l'humidité est maintenue à 100 %, on fait varier la température jusqu'à ce qu'un sujet placé alternativement dans l'une ou dans l'autre, ne ressente plus aucune différence thermique ; la sensation étant exprimée immédiatement après le changement de situation.

Cet indice présente plusieurs inconvénients :

- la température radiante et la température d'air doivent être égales,
- l'habillement et l'activité ne sont pas ramenés à des valeurs standard. Pour chaque cas d'habillement et d'activité, il est nécessaire d'établir un diagramme,
- il conduit à sous-estimer l'effet de l'humidité à basse température et à le surestimer à haute température,
- l'utilisation comme référence d'une ambiance saturée en humidité rend impossible l'estimation des effets physiologiques de l'humidité.

4.4.5. La température effective standard = SET

La température effective standard est la température d'une ambiance, dont l'atmosphère calme et saturée à 50 % en humidité, entraînerait les mêmes pertes thermiques pour une température de peau et une mouillure identiques par rapport à une situation donnée.

L'individu considéré a une activité de 1.1 Met et porte un vêtement de 0.6 clo ; il est soumis à un air agité de 0.15 m/s.
Les niveaux d'activité sont considérés comme compensables par l'habillement, ce qui est reconnu comme inexact (DEVAL et BERGER).

Interprétation de la SET

S E T	Sensation	Etat physiologique d'une personne sédentaire
22,2 à 25,6	confortable	neutralité
25,6 à 30,0	tiède, à peine acceptable	légère sudation, vasodilatation
30,0 à 34,5	assez chaud, inconfortable, inacceptable	sudation

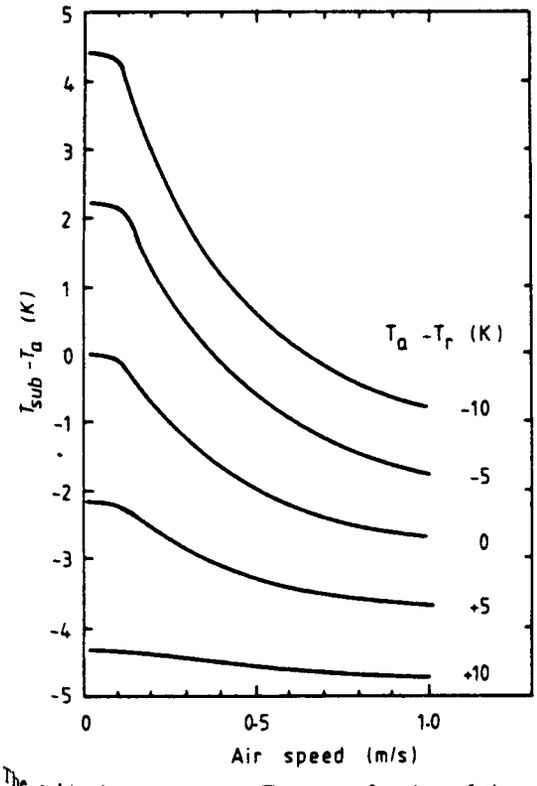
4.4.6. Température résultante = Tres

La température résultante Tres, définie par MISSENARD (1948-1959), inclut les effets de la température radiative et s'appuie sur la température de peau et la mouillure comme indicateurs.
Comme la température effective, elle correspond à un environnement saturé en humidité.
La Tres est définie immédiatement après le changement de conditions, puis lorsque la situation et les caractéristiques physiologiques sont stables, ce qui conduit à la définition de deux températures résultantes.
Elle est reconnue comme meilleure que la E.T.
Seuls quelques diagrammes, avec peu de sujets, ont été établis.

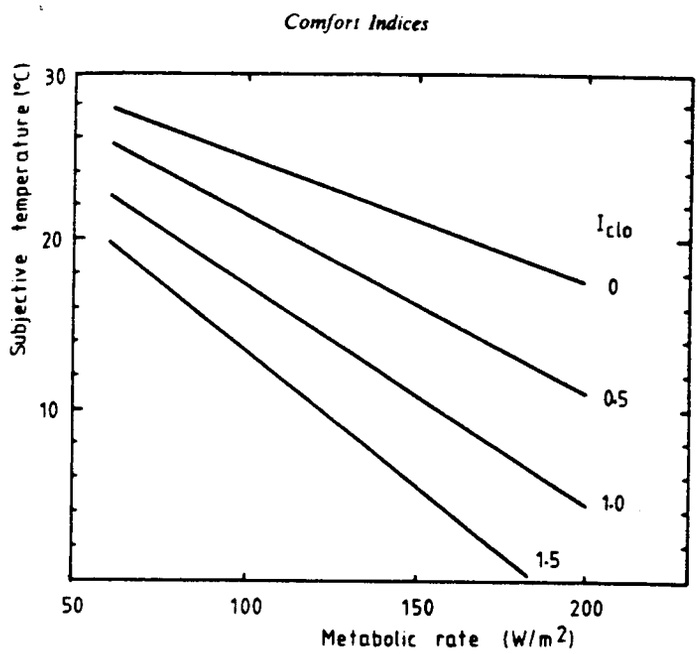
4.4.7. La température subjective

C'est la température d'une enceinte uniforme avec Tair = TMR, V = 0.1 m/s et HR = 50 %, qui produirait la même sensation de chaleur que l'environnement réel.
Elle est fonction de l'isolation des vêtements et du métabolisme, et basée sur les équations de FANGER dont elle constitue une bonne approximation.

Cette formulation n'est valable que pour des conditions intérieures et pas trop éloignées des conditions de confort. Son extension pour des situations chaudes implique nécessairement l'introduction de l'humidité.



The subjective temperature T_{sub}, as a function of the air speed, air temperature and mean radiant temperature.



The subjective temperature required for comfort as a function of activity and clothing insulation.

(Extraits de Mc INTYRE - Indoor climate)

4.4.8. P4SR (Predicted Four Hours Sweat Rate)

Développé pendant la deuxième guerre mondiale. Il tient compte du niveau métabolique et de deux types d'habillement en plus des paramètres climatiques.
Cet indice est basé sur le taux de sudation prédit après 4 heures d'exposition dans des conditions données. Il est donc un moyen d'apprécier l'acclimatement.
Il se présente sous forme graphique, à partir de la température sèche, la température humide et de la vitesse de l'air.
Les différentes études de cet indice, menées par GIVONI, Mc PHERSON, SMITH, ont montré qu'il était généralement en accord avec les résultats expérimentaux.
Il semble donc que ce soit un bon indice ; cependant il ne peut être utilisé que graphiquement.

4.4.9. Predicted Mean Vote : PMV

Si l'environnement climatique satisfait aux équations de confort, l'individu est dans un état optimum ; dans le cas contraire cependant, les équations de donnent pas d'indication sur l'inconfort ressenti.

FANGER a donc introduit le PMV, qui est la sensation, sur l'échelle en 7 points de l'ASHRAE, qui traduirait le vote de la majorité d'un groupe de personnes dans une situation donnée.
Il donne de bons résultats pour des conditions standard d'activité sédentaire et de vêtements légers.
Pour un métabolisme élevé, les résultats sont moins satisfaisants.

4.4.10. The Index Thermal Stress : ITS

L'indice de stress thermique est un modèle décrivant les mécanismes d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement, au-dessus de la zone de confort.
Il détermine le taux de sudation pour maintenir le corps en équilibre thermique et en tenant compte du rendement de la sudation.
En-dessous de la zone de confort, il est négatif.

Tair	: 20 - 50°C
Pression de vapeur	: 5 - 40 mmHg
Vair	: 0.1 - 3.5 m/s
Rayonnement solaire	: 600 kcal/h
Métabolisme	:100 - 600 kcal/h

Il tient compte du rayonnement solaire pour le calcul en conditions extérieures, par l'intermédiaire de coefficients expérimentaux.
D'après BERGER, le taux de sudation ainsi déterminé présente des divergences jusqu'à 30 % plus faibles pour des mouillures supérieures à 0.12, par rapport à celui obtenu par CANDAS.
L'ITS est un bon indice de l'acclimatement et de la fatigue pour la zone où l'équilibre thermique peut être maintenu.

4.4.11. The Heat Stress Index : HSI

Il détermine le taux de sudation à partir des échanges de chaleur entre le corps et l'environnement.
Il se décompose en deux indices ; l'un est le rapport de l'évaporation requise (EREQ) à l'évaporation maximum et tient compte de la vitesse et de l'humidité de l'air; l'autre est le rapport de EREQ à l'évaporation maximum d'une personne, après une période de 8 heures (600 kcal/h)

D'après GIVONI, malgré son importance théorique, cet indice ne représente pas un bon indicateur quantitatif de la réponse physiologique.

4.5. Evaluation du confort thermique

L'être vivant est un système thermodynamiquement ouvert, qui se trouve perpétuellement en régime stable. Ce régime stable peut avoir des phases transitoires plus ou moins longues mais le noyau thermique est en permanence en régime stable, il reçoit des entrées et il a des sorties.

Tout sujet homéotherme va donc être menacé, soit par une hypothermie lorsque les entrées sont insuffisantes ou les sorties trop importantes, ou par une hyperthermie lorsque les entrées sont trop importantes ou les sorties trop faibles.

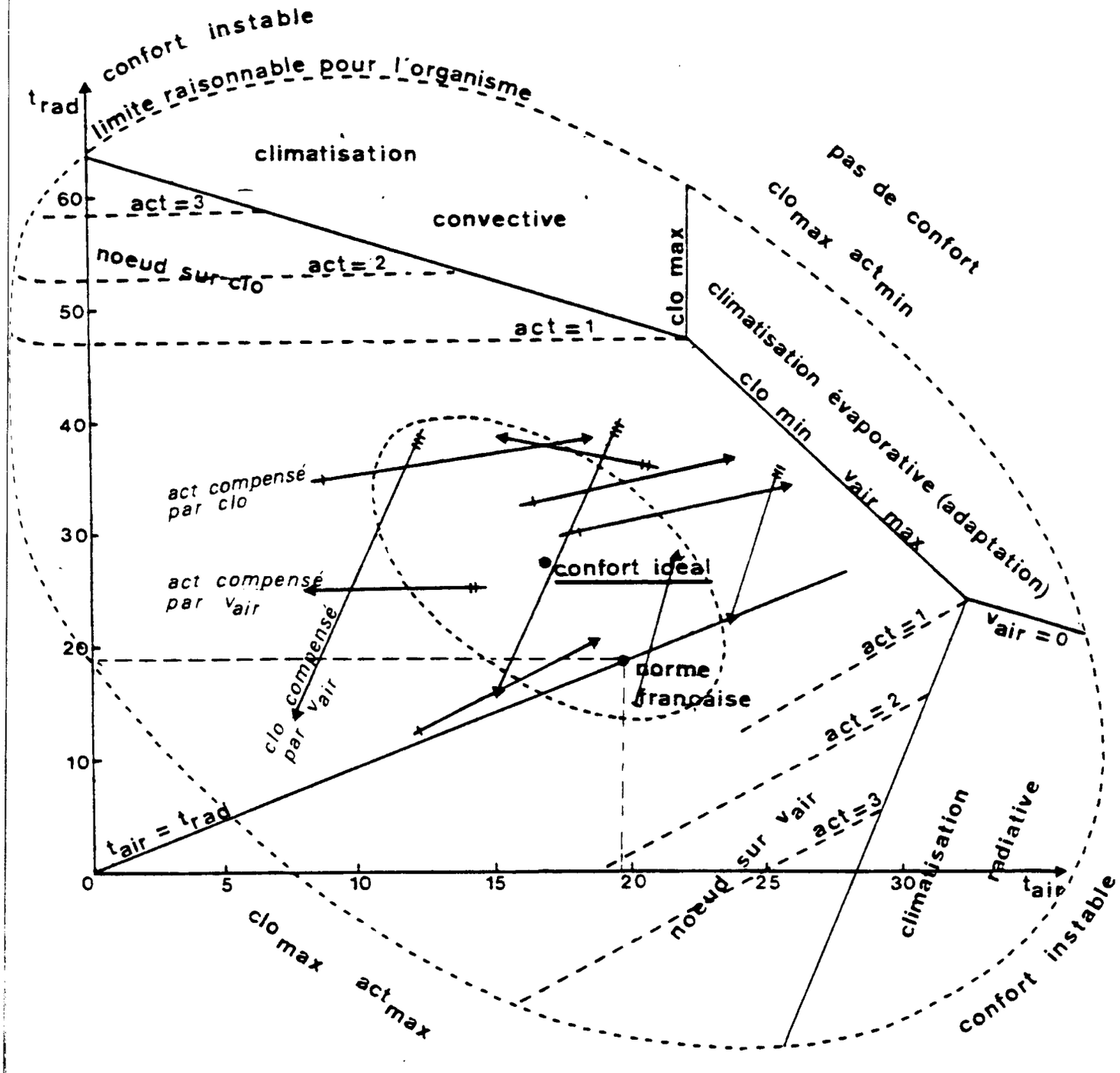
Après avoir déterminé son équation, passé en revue tous les paramètres possibles et réalisé concrètement des environnements satisfaisants, FANGER a examiné des populations importantes. Il a découvert qu'il existe toujours une fraction de 5 % de la population non satisfaite par l'environnement quelle que soit la perfection de l'environnement créé.

La sensation de confort de l'être humain est le résultat des divers échanges énergétiques avec l'environnement. La gestion optimale du confort se fait par action sur les paramètres appropriés à chaque situation : hygrométrie, agitation ou température de l'air, rayonnement, habillement. La modélisation informatique du comportement de l'individu permet de rechercher les actions qui minimisent la dépense énergétique.

L'inconfort peut être causé par une sensation générale de chaud ou de froid ou bien par un chauffage ou un refroidissement intempestif d'une zone particulière du corps (inconfort local) ; il peut l'être aussi par une condition psychologique suscitée pour tout ou partie par des phénomènes physiologiques ou physiques mais incontrolable dans un modèle de calcul.

DEVAL et BERGER proposent une modélisation décomposée en deux parties : le bloc calcul, qui détermine le bilan énergétique (soit un stockage dans l'organisme) et le bloc qui optimise la valeur d'une des six variables d'entrée indépendante (température de l'air, température moyenne radiante, hygrométrie et vitesse de l'air, activité du sujet et résistance thermique de son vêtement) pour annuler le bilan.

Ils obtiennent ainsi des réseaux de courbes dans un système d'axes température d'air, température radiante, choisi pour faire ressortir l'effet des températures ; un point du diagramme caractérise une situation d'ambiance de confort.



les zones de confort (D'après DEVAL Réf 15)

Zone de confort

Les lignes de confort qui correspondent aux différents paramétrages des situations de confort, s'enchevêtrent les unes dans les autres. Il y a ainsi passage possible d'une combinaison de paramètres à une autre avec maintien du confort. Dans ce cas, il y a compensation d'un paramètre par un autre. Dans les cas réels, en effet, et contrairement aux expérimentations en chambres bioclimatiques, l'être humain modifie consciemment ou non son activité et son habillement quand il ne lui est pas possible d'agir sur les paramètres climatiques.

MC INTYRE (AMSTERDAM, 1981) fait remarquer que les ajustements concernant l'appareil vestimentaire opérés par l'individu, lui permettent d'élargir la bande de confort jusqu'à 6° K. Toutefois, le régime établi n'étant pas immédiat, le succès de l'ajustement implique une certaine constance dans les températures ; des enquêtes ont montré que de faibles fluctuations des variables climatiques favorisaient des ajustements individuels et donc la satisfaction des usagers en climat intérieur.

A une ambiance donnée, définie par une température d'air et une température de rayonnement, peuvent correspondre jusqu'à trois combinaisons distinctes des paramètres Vair, Rclo et Act pour une situation de confort.

La zone de confort optimal est principalement localisée dans l'espace TMR $>$ Tair :

- l'être humain est fait pour vivre dans une ambiance radiative (soleil-vie en extérieur) ;

- le chauffage radiatif est plus particulièrement adapté, notamment pour des variations d'activités ; la vitesse d'agitation de l'air augmente par suite des mouvements du sujet, ce qui amplifie les déperditions convectives et, d'autant plus que l'air est frais, maintient le confort.

Zone de climatisation

Climatisation radiative froide et climatisation convective.

Ce sont des zones à confort instable où toute variation de l'un des paramètres définit le confort (il n'y a plus compensation) ; le sujet doit maintenir un même taux d'activité et un même habillement pour assurer son confort. La mode vestimentaire ne peut pas s'offrir les excentricités qu'elle se permet en climat tempéré. Dans ces zones, l'organisme est en adaptation permanente ; néanmoins, s'il dispose d'un nombre d'heures suffisant par jour pendant lesquels il est en situation de confort optimal, l'homme peut supporter sans ennui ces situations de climatisation.

Zones de défense de l'organisme

Ces zones correspondent aux climats chauds et froids pour lesquels une isolation du milieu extérieur est indispensable en même temps qu'une adaptation comportementale et une acclimatation doivent être adoptées : clo élevé et activité forte en climat froid, protection contre le rayonnement et contrôle de l'évapo-transpiration ainsi qu'activité faible en climat chaud.

Au delà de ces zones, il n'y a plus de confort possible et l'organisme souffre.

4.6. Aspects de l'inconfort

* La température radiante est importante pour le confort en extérieur, mais cette idée ne peut être transposée pour le confort en intérieur. Il est très difficile de compenser la température d'air avec une température radiante, du point de vue du confort.

  Le calcul de la température moyenne radiante doit s'accompagner de celui du vecteur de température radiante. Il varie, en effet, suivant la hauteur et, de par le fait d'une assymétrie des températures radiantes, le chauffage par le plafond peut provoquer des inconforts locaux sur un individu.

* Le refroidissement radiatif : l'utilisation des panneaux est limitée en température par la température de rosée de l'air.

* Les changements de température

  Lors d'un changement de température, le corps met un temps important à retrouver une nouvelle température d'équilibre. Cependant, le changement dans la sensation thermique précède les variations de température du corps.

L'état thermique général du corps a une grande importance dans l'influence de l'inconfort local.
Les individus, dèjà en neutralité thermique complète, sont généralement résistants aux inconforts locaux produits par des facteurs tels que parois froides ou courants d'air. Une personne déjà sensible au froid est affectée plus durement par un courant d'air local qu'une autre qui ne l'est pas.
Pour résoudre un problème d'inconfort, le premier remède est d'obtenir le meilleur niveau de température ambiante.

Il existe une réduction importante des performances physiques dans les hautes et les basses températures. Les performances mentales et les possibilités de travail physique sont considérablement diminuées aux environs de 33°C de SET.

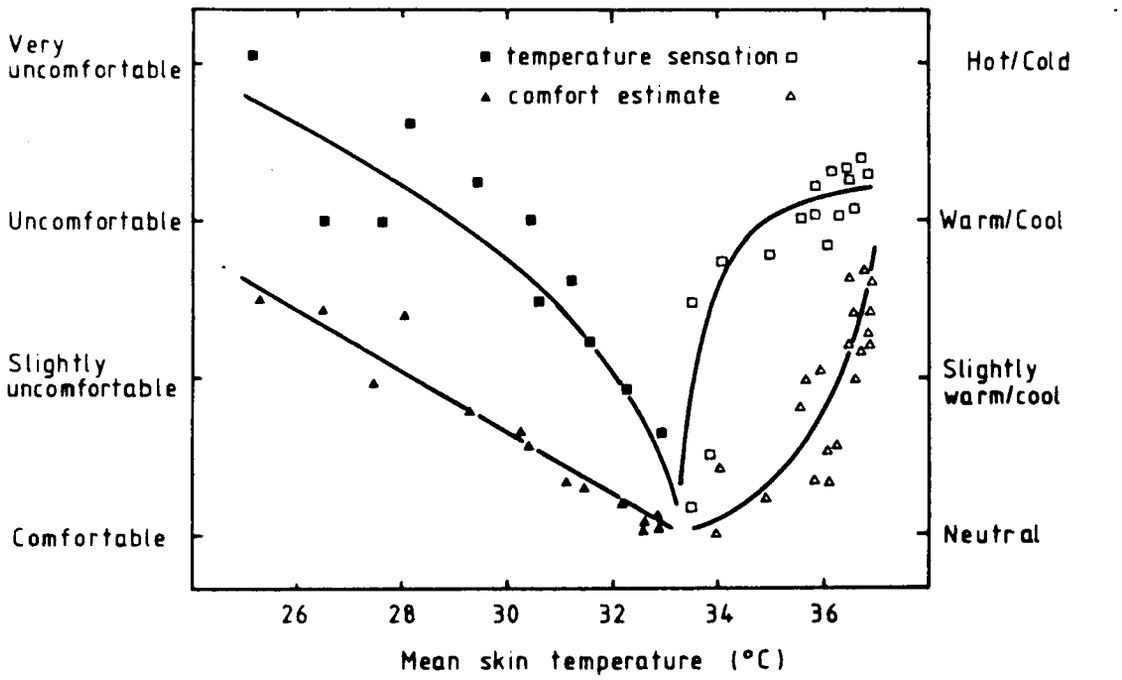
L'habileté manuelle dans le froid est réduite quand la température de la main tombe en dessous de 15°C et le froid réduit les performances du travail mental. Ces effets apparaissent à des températures qui sont inconfortables, en chaud ou froid, et qui seraient tolérables seulement dans des situations de travail où il n'y a pas d'amélioration possible des conditions. De telles conditions peuvent être aussi physiologiquement contraignantes et des précautions doivent être prises pour préserver la santé et la vie des individus.

La sensation de confort thermique peut être réalisée seulement localement sur une partie du corps ou bien temporairement, dans un contexte donné qui est en lui-même inconfortable. La sensation de plaisir thermique, étendue sur une période de plusieurs heures, est difficilement réalisable.
Le sens du mot confortable ou inconfortable ne peut être le même pour tous les individus, chacun y intégrant son expérience ou ce à quoi il s'attend.

D'après Mc INTYRE (Réf. 16)

4.7. La sensation de confort et la température moyenne cutanée

La relation entre la sensation de confort et un état physique différent de la neutralité thermique est fonction de la sudation. Quand la température ambiante augmente, la température de peau croît et la sensation de température éprouvée varie dans le même sens. Quand la sudation commence, la température de peau reste presque constante et alors, la sensation de température varie lentement.



Comfort and sensation as a function of mean skin temperature. In the warm, sweating limits the rise in skin temperature, making the increase of sensation appear very steep—Gagge *et al.* (1967).

La variation d'inconfort ne suit pas la sensation de température. Les résultats de plusieurs expériences au Pierce Foundation Laboratory ont montré que l'humidité de la peau est un bon indicateur de l'inconfort dû à la chaleur.

La mouillure

Une personne placée dans un environnement chaud a besoin des pertes par sudation pour maintenir son équilibre thermique.

La mouillure est le rapport entre les pertes réelles, par évaporation au niveau de la peau, et les pertes maximum qui se produiraient dans un même environnement, si la peau était complètement mouillée.

Une augmentation de l'humidité atmosphérique ne change pas la production de la sueur, mais réduit les pertes maximum théoriques, et par conséquent, l'humidité de la peau.
Autour de la zone de neutralité théorique, la sensation de température croît plus vite que la sensation d'inconfort.
Pour des températures de peau d'environ 33°C, les sensations de confort et de température varient de façon identique.
La température de peau et donc la température d'air sont de bons indicateurs de la sensation de confort.
Les effets dus à la thermorégulation peuvent être en eux-mêmes inconfortables, par exemple le grelottement ou la vasoconstriction qui s'accompagnent du raidissement des muscles et d'effets d'engourdissement.

Conditions transitoires

Quand la température ambiante change rapidement, la sensation thermique varie plus vite que les températures corporelles.
Dans le cas d'une augmentation brutale de la température, la sensation peut être identique à la sensation provoquée par la même température mais stable, alors même que, physiquement, elle est loin d'avoir atteint sa stabilité.

5. Conclusion

Pour la mise au point du programme **CONFOR**, seul l'aspect physique des échanges thermiques a été pris en compte ; les situations dites "confortables" le sont donc en fonction des échanges entre l'individu et son environnement, la condition à satisfaire étant d'obtenir un bilan nul (homéothermie).

Cet aspect physique du confort ne doit pas cependant faire oublier les deux autres champs d'intervention : physiologie et psychologie, et ramener la notion de confort à ce seul aspect d'échanges thermiques serait réducteur.

Le programme constitue donc une approche particulière du confort, à savoir son rôle thermique. Il permet de déterminer des champs de variation pour les six paramètres, ainsi que des séries de combinaisons qui annulent le bilan, et aide de cette façon à la compréhension des phénomènes thermiques.

Il conviendrait, dans une étape ultérieure, de croiser ces résultats avec des études physiologiques et psychologiques. Ces domaines ont été explorés par des équipes de recherche, au cours d'expériences nombreuses, faites directement sur des individus. Une idée précise est alors donnée sur la sensation de confort éprouvée dans des situations particulières.