



HAL
open science

Travail à la chaleur et confort thermique.

C. Martinet, J.P. Meyer

► **To cite this version:**

C. Martinet, J.P. Meyer. Travail à la chaleur et confort thermique.. [Rapport de recherche] Notes scientifiques et techniques de l'INRS NS 184, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). 1999, 59 p., ill., bibliogr. hal-01420169

HAL Id: hal-01420169

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-01420169v1>

Submitted on 20 Dec 2016

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.



Travail à la chaleur et confort thermique

Travail à la chaleur et confort thermique

Corinne Martinet, Jean-Pierre Meyer

Abstract

While working in the heat has decreased in the last thirty years, several recent surveys have shown that heat stress remains a significant complaint for almost one every five workers. The most hazardous situations can be characterised by their short exposure time with high physical workload. At the opposite, the huge increase of work situations where complaints focus on thermal comfort explains that prevention has to tackle the most frequently with comfort conditions which satisfy the largest number as with hazardous heat exposures.

This booklet reports the physical and physiological aspects of thermal strain and thermal comfort conditions. Its objective is to give the most practical tools to answer the questions of thermal comfort and strain. The second part of this work shows that the recording of heart rate (HR) allows a simple determination of safe exposure limits. In this view, the increase of rest HR due to the thermal strain (EPCT) were recorded on 98 workers during 131 actual work periods representing 18 different work situations. The EPCT are the difference in beats per minute (bpm) between sitting at rest HR before the exposure and the mean HR of the 3rd, 4th and 5th minutes of rest after the end of the exposure. Oral temperature was considered as a good evaluation of core temperature. Variation in oral temperature (dtbu) from the beginning to the end of the heat exposure (dtbu) is linked to EPCT through the relationship: $dtbu = 0,04 + 0,029 EPCT$. This relationship is significant ($p < 0,001$) and allows to define an EPCT limit of 20 bpm which implies that the increase in the oral temperature is lower than 1°C rendering the thermal strain acceptable.

This result has been obtained from recordings out of almost one hundred workers in varied working and exposure conditions. The EPCT limit of 20 bpm can be used safely to define the physiological acceptability of the heat exposure at a workplace and, if necessary, to determine TLV. The ease of use of the heart rate recorders makes heart rate a reference parameter for the thermal strain quantification as well as for the evaluation of the physical workload at which heart rate can become hazardous.

Key-words : Thermal stress, prevention, strain index, heart rate

Résumé

Les conditions d'exposition à la chaleur ont beaucoup évolué au cours des 30 dernières années. Cependant, différentes enquêtes montrent que les expositions à des contraintes thermiques élevées perdurent. Les contraintes les plus élevées se caractérisent par des durées d'exposition brèves mais avec une activité physique élevée pendant l'exposition. A l'inverse, les situations de travail où le confort thermique peut être à l'origine de plaintes se sont développées à un point tel que le préventeur est plus souvent confronté à la difficulté de trouver une solution de confort qui satisfasse le plus grand nombre que de régler les quelques cas d'exposition extrêmes à haut risque.

L'objectif de ce travail est en premier lieu de décrire les phénomènes physiques et physiologiques qui caractérisent le travail à la chaleur et en situation de confort thermique. La deuxième partie de ce travail propose une démarche d'analyse de ces contraintes grâce à un indice simple validé à partir des résultats de plusieurs études en situation réelle de travail à la chaleur (18 postes, 98 salariés). Cet indice repose sur le recueil en continu de la fréquence cardiaque (Fc) et le calcul des extra pulsations cardiaques thermiques (EPCT) qui représentent l'augmentation de la Fc de repos entre le début et la fin de l'exposition. Les résultats permettent de conclure que les EPCT (battement par minute) sont étroitement ($p < .001$) liées à l'augmentation de température buccale (dtbu en °C) au cours de l'exposition selon la relation : $dtbu = 0,04 + 0,029 EPCT$

La validité de cette relation basée sur sa concordance avec les données de la littérature, le grand nombre de salariés étudiés et la variété des contraintes thermiques analysées permettent de conclure que des EPCT inférieures à 20 battements par minute traduisent une astreinte acceptable d'un point de vue physiologique.

Mots clés : ambiances thermiques, chaleur, confort, fréquence cardiaque, EPCT, indice d'astreinte.

1. Introduction

Les métiers dans lesquels l'homme était le plus exposé à des ambiances thermiques chaudes se sont profondément modifiés au cours des 30 dernières années. Parmi ceux-ci, les mines, la sidérurgie ou les verreries sont particulièrement démonstratives de ces évolutions. Pour les premières, la réduction de l'activité minière va aboutir à sa disparition dans les dix prochaines années. Dans la sidérurgie, les restructurations économiques ont entraîné un regroupement des centres de production et, grâce à une automatisation accrue, une réduction drastique du nombre de salariés exposés et une modification du mode d'exposition de ceux qui travaillent encore à la chaleur. Cette évolution existe aussi dans les verreries industrielles où, grâce à l'évolution technique, les temps d'exposition des salariés à la chaleur ont été réduits.

Cependant, malgré ces évolutions, les risques liés aux expositions à des contraintes thermiques élevées sont toujours présents. En effet, les chiffres de l'enquête SUMER (DARES 1996) montrent que 19% des salariés sont exposés aux nuisances thermiques (chaleur ou froid). De même, les résultats de l'enquête du Ministère du travail (DARES 1993) sur les conditions et l'organisation du travail révèlent qu'en 1991 plus d'un quart des salariés déclaraient travailler à une température élevée. Ces résultats doivent être replacés dans le contexte d'un fort développement du secteur tertiaire et indiquent alors que les très nombreuses plaintes relatives au travail à la chaleur sont au moins autant liées à des situations d'inconfort thermique qu'à des contraintes thermiques qui exposent à un risque d'accident.

Le médecin du travail est donc confronté à deux types d'astreintes relatives soit au confort thermique soit aux contraintes thermiques élevées. Il dispose d'outils spécifiques pour répondre à ces demandes mais leur utilisation est parfois difficile.

Dans les domaines du confort thermique, les solutions nécessitent la détermination d'indices de confort thermique : Vote Moyen Prédit (PMV) et Pourcentage Prédit d'Insatisfaits (PPD) sont des indices présentés dans la norme X35-203 (AFNOR 1995). Les paramètres d'une ambiance de confort peuvent être calculés à partir de ces normes. L'utilisation de ces indices permet de satisfaire le plus grand nombre de salariés soit, dans le meilleur des cas, 95 % de la population. Pour le préventeur, il persistera toujours au moins 5 % de personnes insatisfaites. L'application de ces indices exige des explications à donner et des solutions à proposer pour satisfaire le plus grand nombre. Le médecin du travail doit alors jouer un rôle central dans les phases de réflexion, de mise en place et de validation du choix d'une situation de confort thermique.

Dans les situations de contraintes thermiques élevées, le médecin du travail a besoin de moyens de surveillance simples, de mise en oeuvre rapide, pour protéger les salariés qui travaillent dans ces conditions. Actuellement, les outils disponibles sont issus de nombreuses recherches qui ont conduit à l'élaboration de 14 normes par l'ISO (International Standard Organisation). Ce nombre important d'indices et d'indicateurs de contrainte ou d'astreinte thermique reflète la complexité des modèles de prédiction de l'astreinte et la difficulté de définir un indice simple utilisable dans des situations de travail variées. Le WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) et l'indice de Sudation Requise (SudReq) sont les plus utilisés. Mais ces deux indices demandent des mesures nombreuses, souvent complexes et nécessitent la compétence de spécialistes. Leur mise en oeuvre n'est donc possible que dans des conditions de contraintes habituelles, planifiées et de durée prolongée.

Actuellement, les expositions à la chaleur se caractérisent plus souvent par des durées d'exposition brèves à des niveaux de contraintes thermique et énergétique élevés au cours d'opération d'entretien d'urgence telles que la maintenance ou la réparation effectuées sans interrompre le processus de production. Des entreprises extérieures, employant souvent des intérimaires, sont parfois sollicitées dans ces tâches. Ainsi, aux conditions thermiques difficiles s'ajoutent le manque d'habitude, la méconnaissance des lieux et l'absence

d'acclimatement pour faire de ces expositions des situations de travail à risque. Dans ces conditions, les indices sont difficiles à utiliser, voire inadaptés lorsque les expositions sont très brèves ou lorsque les salariés interviennent en combinaison isolante. Ainsi, confronté à une demande urgente d'évaluation du risque, le médecin du travail devra utiliser des outils simples de quantification de l'astreinte thermique.

Dans une situation de travail qui présente un risque, il est nécessaire de disposer d'un indice objectif, fiable et facile à utiliser. Parmi les différentes modalités de l'adaptation physiologique à la chaleur, l'augmentation de la fréquence cardiaque de repos est la plus simple à quantifier. Cette augmentation permet de maintenir un débit sanguin cutané suffisant pour dissiper la chaleur accumulée au niveau du noyau. Les extra pulsations cardiaques thermiques (EPCT) permettent d'estimer l'augmentation de la température centrale. Elles ont été définies par Vogt et al. (1970). Cependant, la relation entre les EPCT et la température centrale n'a été validée qu'en situation de laboratoire (Vogt et al. 1971, Vogt et Metz 1981). De plus, les expériences de validation ont été menées sur de petits nombres de sujets, en général jeunes et sportifs. Ces limitations peuvent expliquer que l'utilisation des EPCT soit restée confidentielle en situation réelle de travail. Compte tenu de ce qui précède, les objectifs de ce travail sont :

- en premier lieu de rappeler les données essentielles sur l'adaptation de l'homme au travail à la chaleur, les conditions du confort thermique et les méthodes d'évaluation des contraintes et des astreintes liées à l'exposition à la chaleur;
- en deuxième lieu, de vérifier que la relation entre l'astreinte thermostatique et les EPCT est valable en situation réelle de travail. Pour répondre à cet objectif, la relation entre les EPCT et la variation de température buccale (tbu) a été calculée à partir de mesures réalisées sur un grand nombre de salariés au cours de leur travail habituel;
- enfin, de définir une démarche pratique de prévention et d'amélioration des conditions de travail de salariés qui se plaignent de travailler à la chaleur. Cette démarche se base sur le recueil de la fréquence cardiaque et le calcul des EPCT. Mais, du fait des limites de cet indice dans certaines conditions, les points auxquels il faudra être attentif sont présentés, en particulier en abordant les aspects liés au confort thermique.

2. Travail à la chaleur

L'homme est un homéotherme, il assure le maintien de sa température centrale à un niveau relativement constant proche de 37 °C. Autour de cette valeur de référence, les systèmes de régulation utilisent des mécanismes physiologiques et comportementaux pour assurer l'équilibre du bilan thermique.

2.1 Bilan thermique

La stabilité de la température corporelle chez l'homme implique un équilibre entre la production de chaleur endogène, résultat du métabolisme de base et du travail physique et les pertes de chaleur vers le milieu extérieur. L'équation du bilan thermique à l'équilibre s'écrit :

$$C_{res} + E_{res} + K + C + R + E - H = 0$$

Cette équation impose que la production de chaleur interne du corps (H) est, à l'équilibre thermique, compensée par les échanges de chaleur au niveau des voies respiratoires par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}) ainsi que par les échanges au niveau de la peau par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation (E).

L'équilibre thermique est atteint lorsque le bilan est nul. Dans ce cas, la température centrale du corps ne varie pas. Par convention, les échanges de chaleur sont positifs lorsqu'ils apportent de la chaleur au corps. Ils sont négatifs lorsqu'ils provoquent une déperdition de chaleur. Au repos, la totalité de l'énergie consacrée au métabolisme (M) est

transformée en chaleur et dans ce cas : $H = M$. Chez le sujet au travail, une fraction de cette énergie liée à l'activité peut être transformée en travail mécanique (W), d'où : $H = M - W$.

Plusieurs classes d'ambiances thermiques peuvent être distinguées, le caractère tolérable ou non d'une condition est fonction de la possibilité d'équilibrer le bilan thermique après la mise en jeu des mécanismes de régulation. La figure 1 présente les ambiances thermiques neutres et chaudes avec les réponses physiologiques correspondantes :

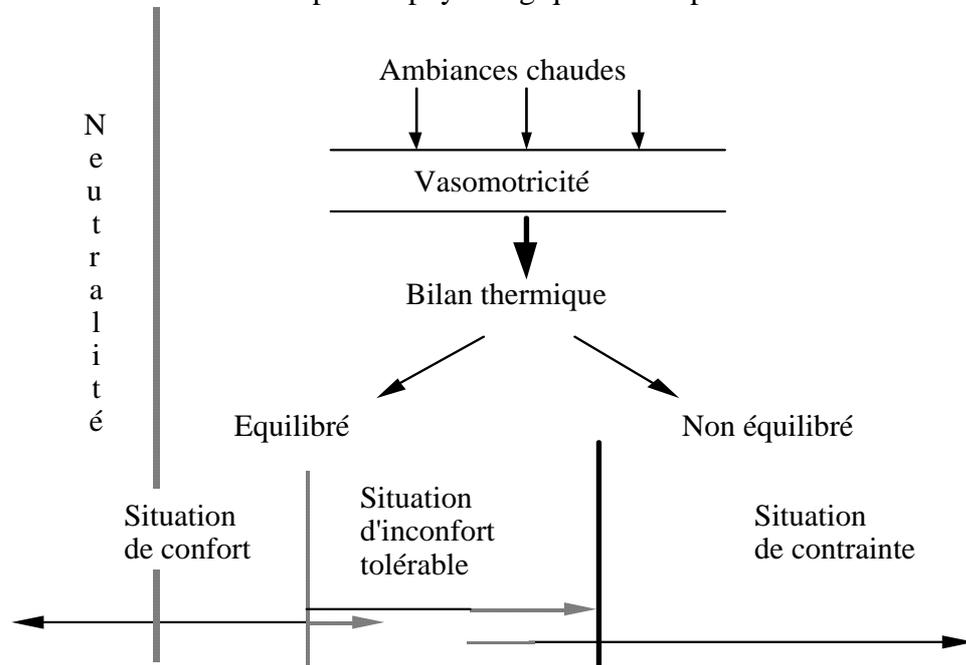


Figure 1 : Caractérisation des ambiances thermiques neutres et chaudes et des réponses physiologiques correspondantes.

2 1.1 Echanges de chaleur avec l'environnement.

L'organisme dispose de deux interfaces pour échanger de la chaleur avec l'environnement : la peau et les voies respiratoires.

a) Echanges par conduction thermique (K)

Les échanges par conduction s'établissent entre deux solides au contact. De tels échanges sont observés entre la peau et des vêtements serrés, les chaussures, les points d'appui, les outils. En pratique en milieu de travail, les échanges par conduction sont le plus souvent négligeables. Ils peuvent influencer la sensation de confort thermique et dans les cas extrêmes, provoquer des brûlures cutanées. Le flux de chaleur de la surface en contact vers la peau est décrit par la relation :

$$K = h_k (t_{sk} - t_m)$$

où K est le flux de chaleur échangé par conduction ($W.m^{-2}$)

h_k est le coefficient d'échange de chaleur par conduction ($W.m^{-2}.^{\circ}C$)

t_m est la température du matériau en contact ($^{\circ}C$) et t_{sk} est la température moyenne de la peau ($^{\circ}C$)

A titre d'exemple, si $h_k = 4$ une différence de $1^{\circ}C$ entre la peau et la surface en contact provoque un transfert de chaleur de $4 W.m^{-2}$.

b) Echanges par convection thermique ($C + C_{res}$)

Les échanges par convection ont lieu entre un solide et un fluide ou entre deux fluides. Au niveau respiratoire (C_{res} en $W.m^{-2}$) les échanges sont fonction du débit ventilatoire et de la différence de température entre l'air inspiré et l'air expiré.

$$C_{\text{res}} = (V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_{\text{ex}} - t_a)) / A_D$$

où V est le débit ventilatoire ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$), ρ est la masse volumique des gaz expirés ($\text{kg}\cdot\text{l}^{-1}$)
 c_p est la chaleur spécifique des gaz ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{air}\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$)
 A_D est la surface corporelle calculée (m^2)
 t_a est la température de l'air inspiré ($^\circ\text{C}$) et t_{ex} est la température de l'air expiré ($^\circ\text{C}$)

Fanger (1972) en a proposé une expression simplifiée :

$$C_{\text{res}} = 0,0014 M (34 - t_a)$$

où C_{res} est exprimée en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
 M le métabolisme en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
 t_a est la température de l'air inspiré en $^\circ\text{C}$

Le débit ventilatoire est exprimé à partir du métabolisme énergétique sur la base d'un débit ventilatoire de $20 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ par litre d' O_2 consommé (Monod et Pottier 1981). La température moyenne de l'air expiré est estimée à 34°C .

Au niveau de la peau (C), les échanges par convection s'établissent entre la surface cutanée et l'air ambiant au contact de la peau, ou entre la peau et l'air emprisonné entre la peau et le vêtement. Ces échanges augmentent lorsque l'air est renouvelé plus rapidement sous l'effet du déplacement de l'air. Le coefficient de convection (h_c) varie avec la vitesse de l'air. Lorsque celle-ci passe de 0 à $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, les échanges par convection sont multipliés par trois (Mairiaux et Malchaire 1990). Le flux de chaleur échangé par convection (C en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) est calculé suivant la formule :

$$C = h_c F_{\text{clC}} (t_{\text{sk}} - t_a)$$

où h_c est le coefficient de convection ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}$) fonction de la densité et de la vitesse de l'air et des forme, dimension et qualité de l'objet.
 F_{clC} est le facteur de réduction des échanges convectifs par le vêtement
 t_{sk} est la température moyenne de la peau et t_a est la température ambiante

En général h_c est de l'ordre de 5 à $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}$

c) Echanges par rayonnement (R)

L'importance des échanges par rayonnement dépend des différences de température entre le corps humain et la source chaude, de la distance qui les sépare et de leur pouvoir d'absorption respectif. Tous les corps quel que soit leur état émettent et absorbent de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique ; la capacité d'un corps à échanger de la chaleur sous cette forme dépend de son émissivité. L'émissivité d'une surface et son pouvoir d'absorption dépendent de la longueur d'onde du rayonnement émis ou reçu et des caractéristiques de la surface. La fraction de la surface du corps participant aux échanges varie avec la posture du sujet.

En milieu de travail, les échanges par rayonnement peuvent avoir un effet redoutable, par exemple chez des ouvriers travaillant à proximité d'un haut fourneau et astreints à un effort physique intense, la chaleur accumulée peut dépasser $600 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$ soit 697 W (Geraut et Dupas 1991). Les écrans et les vêtements appropriés permettent de diminuer ces échanges par rayonnement de façon très efficace (Rapp et al. 1984). Par exemple, un salarié exposé à une source de chaleur intense dégageant $200\,000 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$ ne sera plus exposé qu'à $30 \text{ kcal}\cdot\text{h}^{-1}$ s'il se trouve derrière un écran constitué de tôles galvanisées réfléchissantes entre lesquelles est interposée une couche de laine de verre de 3 cm d'épaisseur (Geraut et Dupas 1991). Le flux thermique échangé par rayonnement est calculé selon la relation :

$$R = h_r A_R / A_D F_{\text{clR}} (t_{\text{sk}} - t_r)$$

où h_r est le coefficient d'échange par rayonnement ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}$)
 A_R/A_D est la fraction de la surface du corps participant aux échanges, elle varie avec la posture (0,66 accroupi, 0,7 assis, 0,77 debout)
 F_{clR} est le facteur de réduction des échanges par rayonnement dû aux vêtements
 t_{sk} est la température moyenne de la peau ($^\circ\text{C}$) t_r est la température moyenne de rayonnement ($^\circ\text{C}$)

d) Echanges par évaporation (E)

Le moyen le plus efficace de perdre de la chaleur pour le corps humain est l'évaporation de la sueur à la surface de la peau. En effet, l'évaporation d'un gramme de

sueur à une température de 35 °C absorbe environ 2,4 KJ et correspond à une déperdition de 0,580 kcal (Vogt et Metz 1981). L'évaporation transporte la chaleur latente et constitue toujours une perte de chaleur pour l'organisme. Chez l'homme, l'eau s'évapore au niveau de l'appareil respiratoire et de la peau. L'intensité de cette évaporation est fonction de l'humidité de l'air, de la vitesse de l'air, de la fraction de surface cutanée mouillée, de la perméabilité à la vapeur d'eau du vêtement et de la température cutanée moyenne.

En ambiance chaude, la perte de chaleur par évaporation respiratoire (E_{res} en $W.m^{-2}$) est le plus souvent minime. Toutefois, l'utilisation de protections respiratoires notamment les appareils à adduction d'air qui utilisent un air relativement sec peut augmenter très sensiblement l'évaporation par voie respiratoire. Le flux thermique est fonction de l'écart entre la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air inspiré (P_a en kPa) et l'air expiré (P_{ex} en kPa) et du débit ventilatoire (V en $l.s^{-1}$) et donc indirectement du métabolisme (M en $W.m^{-2}$). En pratique, ce flux peut être estimé par l'expression proposée par Fanger (1972) :

$$E_{res} = 0,0173 M (P_a - 5,87)$$

E_{res} est exprimé en $W.m^{-2}$

La sueur évaporée au niveau de la peau est produite par deux mécanismes : la sécrétion par les glandes sudoripares et la perspiration insensible, c'est-à-dire la diffusion trans-épidermique.

Le flux sudoral par perspiration insensible est strictement passif. La production de sueur par les glandes sudoripares est déclenchée de façon active par le système thermorégulateur. Pour qu'il y ait dissipation de calories, il faut que l'évaporation soit possible. Cette condition est représentée par la position de la situation d'exposition dans le diagramme psychrométrique (figure 11). Les mouvements de convection facilitent l'élimination de la sueur et donc le refroidissement. Si la peau est entièrement recouverte de sueur, l'évaporation maximale (E_{max}) est définie par l'expression :

$$E_{max} = h_e F_{pcl} (P_{Ssk} - P_a)$$

où h_e est le coefficient d'échange par évaporation ($W.m^{-2}.kPa$)

F_{pcl} est le facteur de réduction des échanges évaporatoires par le vêtement

P_{Ssk} est la pression saturante de vapeur d'eau (kPa) à la température de la peau.

En général, la peau n'est pas recouverte de sueur sur toute sa surface, la mouillure cutanée (w) est le rapport entre la surface corporelle mouillée et la surface corporelle totale du sujet. La perte par évaporation (E) est réduite au prorata de cette mouillure et $E = w E_{max}$.

Une élévation de la température cutanée déclenche une libération d'acétylcholine et augmente la sensibilité des récepteurs situés sur les cellules sécrétrices des glandes sudoripares. Une diminution de la mouillure cutanée permet une meilleure évaporation; en effet le film liquide constitue une barrière qui s'oppose à l'évaporation de la sueur. Les mouillures cutanées locales sont très variées, elles peuvent être totales dans certaines zones alors que d'autres aires cutanées sont encore quasiment sèches. Plus l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique est proche de l'évaporation maximale, plus l'organisme doit sécréter de sueur de façon à mouiller une plus grande fraction de la surface cutanée. Lors de l'augmentation de la mouillure cutanée, une fraction de la sueur n'est pas évaporée mais ruisselle sur le corps sans aucun bénéfice thermique pour l'organisme. Trois situations peuvent se rencontrer (t_a et H constants) : - air sec : mouillure cutanée faible, l'écoulement de la sueur est nul et l'évaporation est favorisée. La situation n'est pas désagréable mais le risque de déshydratation est élevé,

- air humide : mouillure cutanée importante, l'évaporation devient difficile, la sueur ne ruisselle pas, la situation devient désagréable,

- air saturé: mouillure cutanée maximale, l'évaporation devient presque impossible, la sueur ruisselle, la situation est très désagréable et dangereuse.

Dans un air dont la P_{aH_2O} est supérieure à celle de la peau, le flux de chaleur peut s'inverser, la vapeur d'eau se condense sur la peau, la situation est très désagréable et le risque d'astreinte thermostatique excessive est important (Payot et al. 1998).

2.1.2 Production de chaleur métabolique (M)

A partir de la combustion des aliments, l'organisme humain produit l'énergie nécessaire à l'activité musculaire, au fonctionnement des différents organes et au maintien de la vie cellulaire. Mais, étant donné le faible rendement énergétique de toute activité humaine, une grande partie de cette énergie est transformée en chaleur caractérisant la production endogène de chaleur (H).

Si au repos la totalité de l'énergie utilisée par l'homme se transforme en chaleur, au travail une fraction de cette énergie produit du travail mécanique et n'est, en conséquence, pas dégradée sous forme de chaleur. Cependant, selon la nature de la tâche, une quantité importante de chaleur peut être libérée car le rendement énergétique de cette transformation de l'énergie chimique contenue dans les aliments en énergie mécanique (dans le muscle) est faible (1 à 25 %). Par exemple, une activité de pelletage effectuée avec une pelletée de 8 kg déplacée sur une hauteur de 1 m réalisée 12 fois par minute correspond à une puissance de 15,7 W. La dépense énergétique correspondante est de 459 W ($6,6 \text{ kcal}\cdot\text{min}^{-1}$). Le rendement de ce travail est de l'ordre de 3,4 %. La chaleur dissipée au cours de cette tâche est de 443W ($459-15,7$). Pour une activité de pédalage sur bicyclette à $15 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, la puissance physique produite est proche de 100W et la dépense énergétique est d'environ 400W soit une consommation d'oxygène de $1,2 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Le rendement est alors de 25 %. Pour être éliminé, l'excès de chaleur doit être transporté du muscle vers la peau par les flux circulatoire sanguin. L'augmentation du flux sanguin induit une élévation de la fréquence cardiaque.

2.1.3 Isolement thermique vestimentaire.

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

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

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

Les résistances thermiques aux échanges s'expriment en $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$. L'unité d'isolement vestimentaire utilisée est le clo, définie comme l'isolement vestimentaire nécessaire pour maintenir en équilibre le bilan thermique d'un sujet au repos exposé à un air calme, à une température de 21°C . En pratique, il correspond à l'isolement assuré par une tenue de ville classique et les sous vêtements usuels. Le bleu de travail complet est voisin de 0,6 clo.

Exprimé en unités physiques $1\text{clo} = 0,155^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1}$

La norme ISO 9920 permet de déterminer l'isolement thermique et la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire. Par exemple : une chemise en coton manche longue, un pantalon, des sous-vêtements, chaussettes et souliers correspondent à un isolement vestimentaire de 0,6 clo, la même tenue plus une veste aluminisée (s'arrêtant au niveau des hanches) correspond à un isolement de 1,36 clo. Les valeurs de la norme sont susceptibles d'être modifiées par le lavage du vêtement et l'activité de travail (effet de pompage, nombre d'ouvertures...). L'isolement thermique résultant (valeur réelle) est en général inférieur à l'isolement thermique nominal (valeur théorique calculée à partir des tables). La réduction des échanges thermiques par le vêtement est alors surestimée si la valeur réelle n'est pas prise en compte.

2.2 Adaptation de l'homme à la chaleur

Afin de maintenir son homéothermie, l'organisme fait appel à des mécanismes de thermorégulation, à savoir des mécanismes physiologiques et des mécanismes comportementaux. L'acclimatement et des facteurs individuels peuvent également influencer la thermorégulation.

2.2.1 Mécanismes physiologiques

Les organes du tronc et de la tête constituent sur le plan thermique un "noyau" où la température varie peu. L'homéothermie est moins stricte au niveau de l'"écorce" (peau, tissus sous cutanés, muscles périphériques et membres). Le noyau et l'ambiance échangent de la chaleur à travers l'écorce où existent des thermorécepteurs et des systèmes de régulation.

a) Signaux thermiques et mécanismes de la thermorégulation

Le stimulus thermique est détecté par les thermorécepteurs situés à trois niveaux différents. Les récepteurs périphériques sont situés au niveau de la peau, les récepteurs profonds extérieurs au système nerveux central sont situés dans les organes abdominaux, les troncs veineux splanchniques et les muscles squelettiques et enfin, les récepteurs profonds intégrés au système nerveux central. Ces derniers ont également un rôle d'intégration des informations et de modulation des réponses efférentes dans la région pré-optique de l'hypothalamus antérieur et le long de la moelle épinière.

De ces thermorécepteurs naissent des informations qui sont intégrées à différents niveaux du système nerveux central. La réponse efférente est fonction de la sommation et de la pondération de chaque information. Les informations provenant des différentes parties du corps ne possèdent pas la même valeur, la température centrale est prédominante par rapport à la température cutanée. Ainsi, lors de l'exercice, une variation de 1°C de la première équivaut, en terme de stimulation nerveuse, à une variation de 10°C de la seconde (Mairiaux et Malchaire 1990). La température corporelle (t_b) est donc le résultat d'une pondération de la température du noyau et de la température de l'écorce :

$$t_b = 0,1 t_{sk} + 0,9 t_{re}$$

où t_b est la température du corps

t_{sk} est la température de la peau et t_{re} est la température rectale

t_{sk} est représentative de la température de l'écorce, elle est calculée à partir de valeurs locales pondérées selon des formules fonction du nombre de sites de mesure de la température cutanée. t_{re} est considérée comme représentative de la température du noyau. D'autres coefficients de pondération peuvent être utilisés selon les conditions ambiantes ou l'activité physique (Monod 1981, Hardy et Stolwijk 1966, Aoyagi et al. 1996).

Les informations aboutissent à la région pré optique de l'hypothalamus antérieur, considéré comme le centre thermorégulateur le plus puissant de l'organisme. La valeur intégrée des informations thermiques est comparée à la valeur de consigne. De cette

comparaison résulte une action de régulation qui est transmise aux effecteurs de la thermorégulation (Vogt 1987).

b) Régulation vasomotrice et sudorale

- Effets cardio-vasculaires

La vascularisation cutanée joue un rôle primordial dans le transfert de chaleur vers le milieu ambiant grâce à des variations de débits réglées par la vasomotricité. Les structures vasculaires sont richement innervées par des fibres sympathiques adrénérgiques responsables d'une vasoconstriction au repos. La chaleur inhibe l'effet vasoconstricteur de ces fibres et provoque ainsi une vasodilatation périphérique. Le système cardio-vasculaire met en jeu des mécanismes qui augmentent le débit cardiaque en accélérant la fréquence cardiaque et redistribuent le sang vers les muscles au travail et les tissus sous cutanés au dépens du réseau splanchnique et rénal.

Chez une personne au repos et à la neutralité thermique, le débit sanguin cutané est de l'ordre de 0,4 à 0,5 l.min⁻¹. A la chaleur, ce débit peut atteindre 2 à 3 l.min⁻¹ chez une personne au travail et jusqu'à 6 l.min⁻¹ au repos (Mairiaux et Malchaire 1990). Le tableau 1 présente un exemple de distribution du flux sanguin au repos et au travail dans une ambiance neutre et chaude.

organes	repos couché		travail lourd	
	neutralité (ta = 25,6 °C)	chaleur (ta=43,3 °C)	neutralité (ta= 25,6°C)	chaleur (ta =43,3°C)
cerveau	750	750	750	750
coeur	250	250	1000	1000
muscles	850	850	11000	9800
reins + digestif	2700	1550	1700	1000
peau	450	6000	1400	3000
autres	600	300	450	350
débit cardiaque	5600	9700	16300	15900

Tableau 1 : Distribution des débits sanguins régionaux en ml.min⁻¹ selon la nature de la charge imposée au système cardio-vasculaire dans deux contraintes thermiques et deux situations de dépense énergétique (repos = 50W, travail = 750 W).

Ces mécanismes d'adaptation ont des limites. Ainsi lors d'une activité physique intense durant laquelle la fréquence cardiaque maximale théorique (220 - âge) est atteinte, la vasodilatation cutanée ne peut plus augmenter sans provoquer une chute de la tension dans les artères principales. Dans ce cas, la régulation de la pression artérielle devient prioritaire par rapport à la régulation de la température. Les barorécepteurs informent les centres vasomoteurs qui régulent par une vasoconstriction périphérique.

- Sudation

La sudation est un phénomène actif assuré par 2 à 3 millions de glandes sudoripares réparties inégalement sur la peau. La sécrétion sudorale est déclenchée par les centres neurovégétatifs à partir d'informations telles que la température et la mouillure cutanées. La figure 2 résume les mécanismes physiologiques de la thermorégulation (Cuisse- Peduzzi 1996).

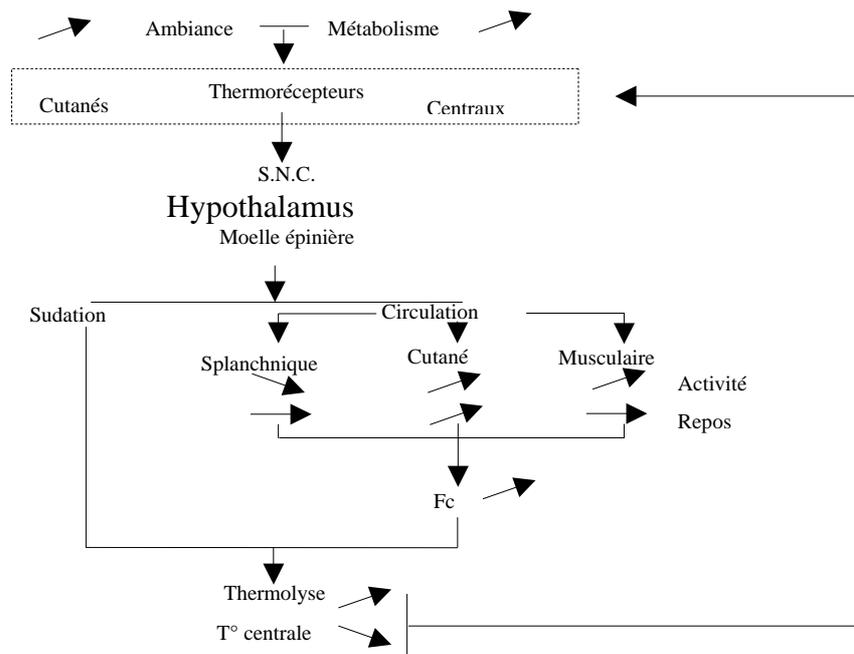


Figure 2 : Schéma synthétique des mécanismes de la régulation thermique.

Une augmentation de la température cutanée déclenche une libération d'acétylcholine et augmente la sensibilité des récepteurs situés sur les cellules sécrétrices des glandes sudoripares. Une diminution de la mouillure cutanée permet une meilleure évaporation; en effet le film liquide constitue une barrière qui s'oppose à l'évaporation de la sueur. Les mouillures cutanées locales sont très variées, elles peuvent être totales dans certaines zones alors que d'autres aires cutanées sont encore quasiment sèches

2.2.2 Mécanismes comportementaux

Pour améliorer sa tolérance à la chaleur, l'individu peut recourir à différentes attitudes comportementales :

- alimentaires avec notamment un apport hydrique supplémentaire et une tendance à alléger sa ration calorique,
- vestimentaire avec le port de vêtements plus légers, de vêtements de protection, dans certains cas de vêtements moins absorbants vis à vis des rayonnements thermiques, par une augmentation de la ventilation sous le vêtement,
- utilisation d'écrans physiques naturels ou artificiels pour se protéger des sources de rayonnements thermiques (Rapp et al. 1984),
- posturales avec la réduction du métabolisme, l'optimisation du temps de repos, la réduction du travail aux heures les plus chaudes.

Ces réactions comportementales sont illustrées par les particularités des modes de vie dans les pays chauds (architecture, horaires d'activité, régimes alimentaires, taille et couleurs des vêtements).

2.2.3 Facteurs influençant la thermorégulation

Si les réactions physiologiques des hommes travaillant à la chaleur sont semblables, leur intensité varie selon les individus. Les variations inter-individuelles sont importantes (Havenith et al. 1998) et principalement influencées par l'acclimatement, l'entraînement physique, l'âge, le sexe, le poids, le régime alimentaire et la prise de médicaments.

- Effet de l'acclimatement

Sous l'effet d'expositions répétées ou prolongées, l'homme développe spontanément des ajustements adaptatifs lui permettant une meilleure tolérance à la chaleur. Cet acclimatement est généralement obtenu en 9 à 12 jours (Pandolf 1998). Toutefois, il n'est que transitoire puisqu'il s'atténue puis disparaît totalement à l'arrêt de l'exposition. Une période de vacances supprime en général complètement les adaptations liées à l'acclimatement. Un sujet acclimaté présente :

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

La figure 3 (Parsons 1993) présente les variations de la température rectale, de la fc et du débit sudoral au cours de l'acclimatement. Des programmes d'acclimatement artificiel ont été réalisés notamment chez les militaires. (Parsons 1993). A travail et conditions climatiques égales, chez le sujet acclimaté, l'élévation de la température centrale est réduite de l'ordre de 0,3°C à 1°C et celle de la fréquence cardiaque de travail est réduite de l'ordre de 10 à 40 battements par minute selon la sévérité des conditions d'exposition (Mairiaux et Malchaire 1990)

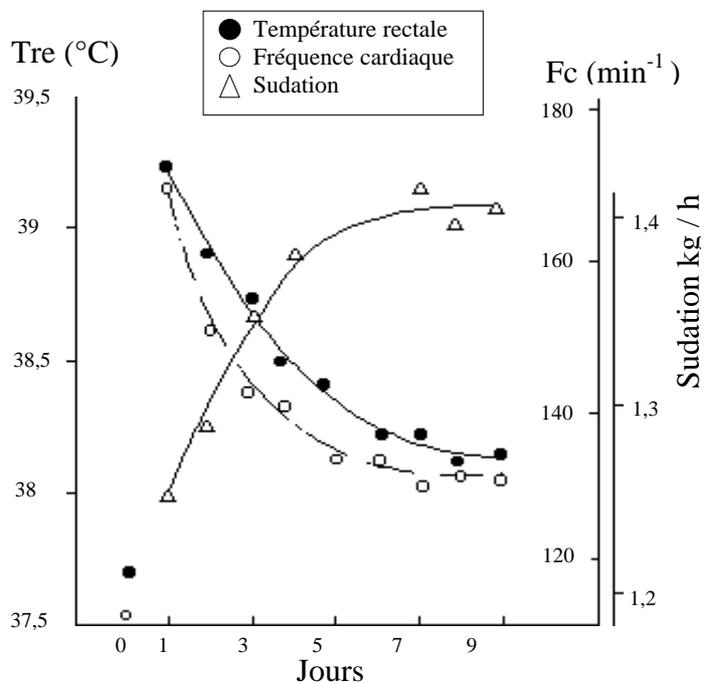


Figure 3 : Variation de la température rectale, de la fréquence cardiaque et du débit sudoral d'un groupe d'hommes pendant la phase d'acclimatement (d'après Parsons 1993).

- Effet de l'entraînement et de la condition physique. L'entraînement améliore la performance à l'effort du système cardio-vasculaire. Pour un effort donné il accroît l'extraction de l'oxygène au niveau du muscle, augmente le volume d'éjection systolique et

réduit l'augmentation de la fréquence cardiaque. Le sujet entraîné dispose donc d'une "réserve" cardio-vasculaire plus importante que le sujet non entraîné lorsqu'il est exposé à la chaleur (Havenith et al. 1998, Pandolf 1998).

- Effet de l'âge. La diminution de la tolérance à la chaleur avec l'âge s'explique par :
 - une diminution de la vasodilatation,
 - une diminution du débit cardiaque et du volume d'éjection systolique à l'effort,
 - une augmentation du seuil de déclenchement de la sudation et une diminution de la sécrétion sudorale,
 - une diminution des capacités cardio-respiratoires qui serait la cause principale de la diminution de la tolérance avec l'âge (Smolander et al. 1990).

Les conséquences de l'exposition à la chaleur des personnes âgées peuvent être graves voire fatales (Semeranza et al. 1996).

- Effet du genre. La femme semble moins bien supporter la chaleur mais cette différence disparaît lors de l'acclimatement (en température sèche). La grossesse est un facteur de réduction de la résistance à la chaleur (Morrissey 1998).

- Effet du poids. L'obésité ou la maigreur excessive sont deux caractéristiques anthropométriques qui réduisent la tolérance à la chaleur (Smolander et al. 1990).

- Effet du régime alimentaire et de la prise médicamenteuse. La consommation d'alcool, la prise de médicaments (neuroleptiques, barbituriques...) peuvent réduire la tolérance à la chaleur, soit par des actions directes sur les mécanismes de la thermorégulation soit en induisant un comportement inadapté. La restriction sodée, les diurétiques peuvent aggraver des troubles électrolytiques.

2.2.4 Effets de la chaleur sur la santé et la performance

a) Effets sur la santé

L'exposition à la chaleur peut conduire à des pathologies du fait soit de la mise en jeu des mécanismes de thermorégulation soit du dépassement de leurs capacités. Une sudation abondante et prolongée peut provoquer un déficit ionique, une déshydratation ou un épuisement thermique :

- Déficit ionique responsable de crampes de chaleur.
- Déshydratation La production horaire de sueur peut atteindre $0,75 \text{ l.h}^{-1}$ chez un sujet non acclimaté et $1,2 \text{ l.h}^{-1}$ chez un sujet acclimaté à la chaleur ou physiquement très entraîné. Des débits de 2 l.h^{-1} ont été mesurés de façon exceptionnelle (Mairiaux et Malchaire 1990). Lorsque ces pertes hydriques ne sont pas compensées par un apport hydrique équivalent, un état de déshydratation apparaît. Une perte sudorale de 1 litre représente 2,5 % du volume d'eau total d'un adulte. Dès que la perte de masse corporelle atteint 1 à 2 % du poids corporel les conséquences du déficit hydrique se font sentir (Candas et Botherel 1989). Une réduction de 2% du poids du corps pour une personne de 75 kg entraîne une baisse des capacités de travail d'environ 20% (Wasterlund 1998). L'accident de déshydratation peut survenir à partir du moment où la perte totale atteint 5 % du volume d'eau total de l'organisme (Geraut et Dupas 1991). Des débits de sueur même faibles, de 100 à 200 g.h^{-1} par exemple, conduiraient au cours d'un poste de travail de 8 heures à des pertes d'eau dépassant 1 litre. (Candas et Botherel 1989). La norme ISO 7933 fixe la limite de 750 g.h^{-1} ou 5 litres par poste de 8 heures.

- Epuisement thermique. Il correspond à un début de coup de chaleur. La vasodilatation cutanée peut provoquer des altérations dont l'une des manifestations extrêmes est la syncope de chaleur. Celle-ci survient généralement après une longue période d'immobilité dans un ambiance chaude. Elle peut également être observée lors de l'arrêt d'un travail physique dur et prolongé en ambiance chaude. Elle se traduit par une perte de

connaissance soudaine et brève, conséquence d'une mise en jeu excessive de la vasodilatation périphérique avec hypotension artérielle et insuffisance du débit sanguin cérébral.

Les effets liés à la décompensation de la thermorégulation sont également importants et en particulier le coup de chaleur (Brinquin et Buffat 1994, Malchaire 1996). Il est rare mais son pronostic est très grave (mortalité dans 15 à 25% des cas). Il est la conséquence de l'arrêt de la sudation qui peut survenir lors de toute exposition à une contrainte thermique sévère ou chez le travailleur portant des vêtements imperméables à la vapeur d'eau. Classiquement, le coup de chaleur comporte trois signes caractéristiques : une peau chaude et sèche suite à un arrêt de la sudation, une température centrale supérieure à 40°C) et des signes neurologiques sévères avec convulsions, coma, délire, agitation, propos incohérents. La destruction progressive des membranes cellulaires et les systèmes enzymatiques thermolabiles explique certaines séquelles du coup de chaleur à type d'insuffisance rénale ou hépatique ou de syndrome de lyse musculaire. La probabilité de survie et de guérison sans séquelle dépend de la précocité du traitement qui consiste à refroidir la personne le plus rapidement possible.

b) Effets sur la performance et la productivité

Des altérations fonctionnelles physiologiques simples sont facilement mises en évidence telles que les modifications de la préhension par la sueur, mais les effets psychologiques sont également présents. De nombreuses études dont les résultats sont parfois contradictoires ont mis en évidence l'augmentation du temps de réponse ainsi que celle des erreurs ou omissions lors de l'exposition à la chaleur (Parsons 1993, Gun 1995)

Les critères de précision d'une tâche sont toujours détériorés par les ambiances chaudes. Les critères de réactivité subissent des fluctuations plus complexes qui peuvent être interprétées en fonction du niveau d'activation des sujets qui elle-même varie avec la situation de travail. La figure 4 d'après Grivel (1975) met en évidence la détérioration constante des indicateurs de précision de la tâche (erreurs ou omissions) par la contrainte thermique.

Les réactions à la chaleur concernant la performance et la productivité sont également fonction de la tâche et de son intérêt (Gun 1995, Parsons 1993). Les altérations de la sécurité et de la productivité observées dans les activités à forte composante musculaire s'expliquent essentiellement par la compétition entre la fonction de transport de l'oxygène et celle de transport de chaleur du débit sanguin (Vogt 1987).

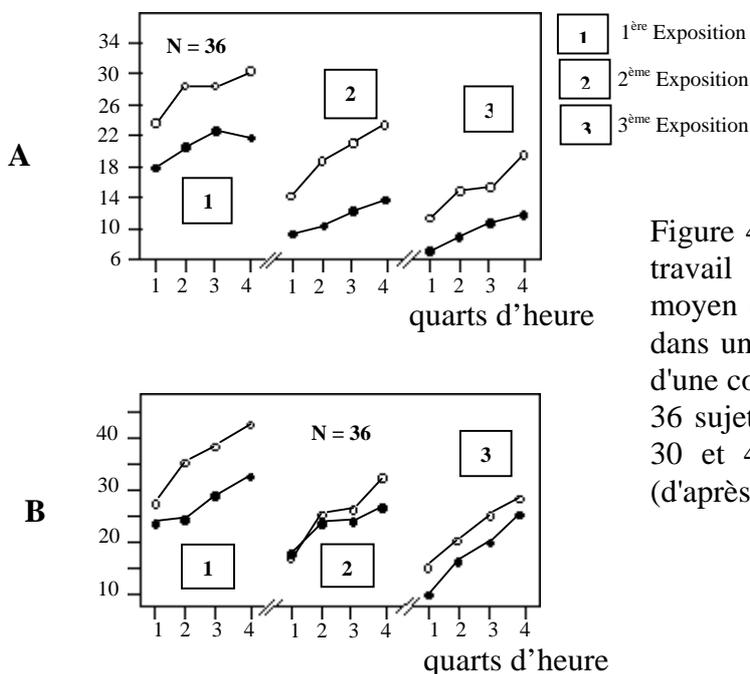


Figure 4 : Effet de la température sur le travail mental. Evolution du nombre moyen d'erreurs (A) ou d'omissions (B) dans une tâche à choix multiple assortie d'une consigne de vigilance effectuée par 36 sujets à 3 occasions successives (15, 30 et 45 min) à 18,5 et 32°C de ta (d'après Grivel 1975).

La figure 5 montre l'augmentation des comportements à risque dans les ambiances chaudes.

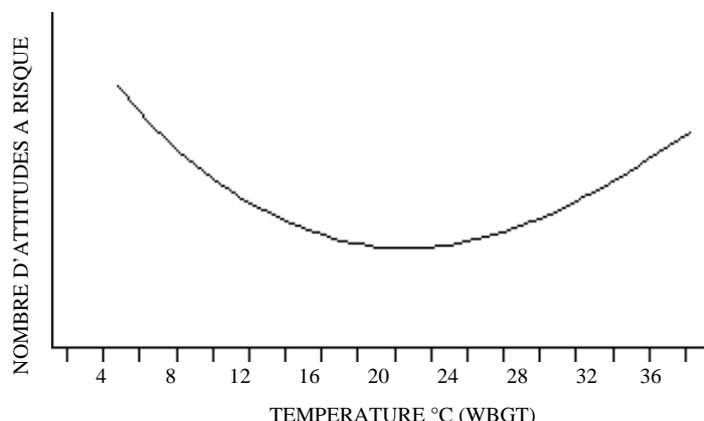


Figure 5 : Effet de la température sur la sécurité. Relation schématisée entre la proportion d'attitudes à risque et le WBGT (Parsons 1993).

2.3 Confort thermique

Le confort thermique est un état de satisfaction vis à vis de l'environnement thermique. Le confort n'entraîne pas de gêne, l'inconfort entraîne une gêne sans pour autant présenter un risque pour la santé. En milieu de travail, des situations d'inconfort thermique peuvent exister dans les bureaux durant la saison chaude et dans les ateliers en été. Certaines circonstances défavorables peuvent aggraver cette situation : locaux confinés sans ventilation, locaux sous toiture, exposition sans protection au rayonnement solaire...

La phrase souvent entendue : "il fait trop chaud pour travailler" doit pouvoir s'appuyer sur des critères plus précis et notamment des indices de confort, le PMV (Predicted Mean Vote ou Vote Prédit Moyen) et le PPD (Predicted Percent of Dissatisfied ou Pourcent Prédit d'Insatisfaits) sont des indices de confort thermique, ils permettent de quantifier le confort d'une ambiance.

2.3.1 Indices PMV et PPD

Le PMV et le PPD correspondent au vote moyen prédit et au pourcentage d'insatisfaits de confort thermique. Fanger (1972) a défini 3 conditions pour qu'une personne soit en situation de confort thermique :

- un bilan thermique équilibré,
- une évaporation sudorale située dans les limites du confort,
- une température moyenne de la peau située dans les limites de confort.

Les niveaux optimums des deux derniers paramètres sont fonction du métabolisme. L'absence d'inconfort thermique est également prise en compte. Dans ces conditions, l'équation du bilan thermique obtenue n'est fonction que de 6 paramètres primaires : t_a , t_r , P_a , V_a , M , clo . Connaissant 5 d'entre eux, le niveau optimal du sixième peut en être déduit. La méthode de Fanger (1972), reprise dans la norme ISO 7730 analyse les conditions de confort thermique et introduit deux des indices analytiques d'astreinte thermique, le PMV et le PPD.

a) Le PMV (vote moyen prédit) permet de calculer le vote moyen de sensation thermique d'un groupe important de personnes (plus de 1000) en se référant à une échelle subjective comportant 7 points de "très chaud" à "très froid" (cf 2.6.3.). La norme ISO 7730 comporte des tables donnant la valeur du PMV en fonction : du métabolisme ($W.m^{-2}$), de l'isolement vestimentaire (clo), de la vitesse de l'air ($m.s^{-1}$) et de la t_o ($^{\circ}C$).

La température opérative (t_o) est définie comme la température d'une enceinte virtuelle où t_a et t_r sont égales et qui induit le même flux d'échange de chaleur par convection et par rayonnement que l'ambiance réelle. La t_o est fonction de t_a , t_r , et des coefficients de convection (h_c) et de rayonnement (h_r) selon la relation :

$$t_o = (h_r t_r + h_c t_a) / (h_c + h_r).$$

A titre d'exemple, pour un travail léger avec un métabolisme de 95 W.m^{-2} (environ 170W), une humidité relative de 50%, une vitesse relative de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$, la t_o optimale pour un sujet vêtu de 1 clo est d'environ 19°C ($\text{PMV} = -0,04$), à 25°C la sensation moyenne sera "légèrement chaud" ($\text{PMV} = 1$) (Mairiaux et Malchaire 1990). Vogt (1985) propose un schéma de la température opérative optimale correspondant à un PMV égal à 0, en fonction de l'isolement vestimentaire (figure 6). La t_o est évaluée au moyen de la température du globe noir et de la température sèche de l'air (Vogt 1985).

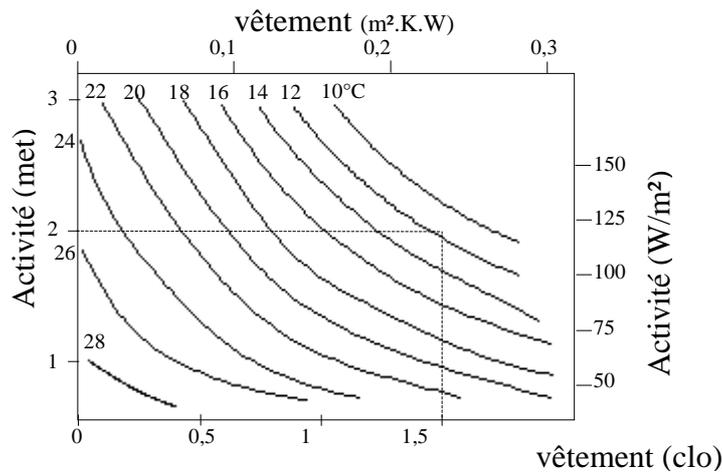


Figure 6 : Température opérative optimale, correspondant à un $\text{PMV} = 0$, en fonction de l'isolement vestimentaire pour un métabolisme de travail très léger (2 met ou 58 W.m^{-2}) et une humidité relative de 50%.

Le tableau 2 donne les valeurs de la t_o pour différents niveaux d'isolement vestimentaire et pour une vitesse d'air de $0,2\text{m.s}^{-1}$. Les valeurs retenues sont celles qui correspondent aux valeurs les plus proches de 0, 1 et -1 de PMV selon la norme ISO 7730.

Le PMV est un modèle et même si cet indice est égal à 0 certains sujets pourront ne pas être en situation de confort. Les perceptions et les sensations individuelles sont différentes les unes des autres, ce qui explique la persistance d'un pourcentage de personnes insatisfaites. En fait, une situation confortable est celle qui contente le plus grand nombre de personnes. Il est donc utile de pouvoir prédire dans une situation donnée le pourcentage de gens satisfaits ou insatisfaits par rapport à l'environnement thermique, c'est le rôle de l'indice PPD.

	PMV = 1	PMV = 0	PMV = -1
0,6 clo	30	26	22
1 clo	28	22	18
1,5 clo	25	18	14

Tableau 2 : Température opérative ($^\circ\text{C}$) correspondant à différents niveaux d'isolement vestimentaire pour des PMV respectifs de 1, 0 et -1.

b) Le PPD (pourcentage de personnes insatisfaites) est présenté dans la figure 7 (en dessous de la courbe) ou satisfaites (au dessus de la courbe) en fonction du PMV. Les indices PMV et PPD sont liés par une relation dont il ressort qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des personnes et que dans le cas le plus favorable il subsiste 5 % d'insatisfaits. La figure 8 présente le pourcentage prédit d'insatisfaits (PPD) en fonction de la température de l'air pour des groupes de personnes occupées soit à des travaux sédentaires (105 W) soit à des travaux légers (170 W), les autres paramètres étant constants.

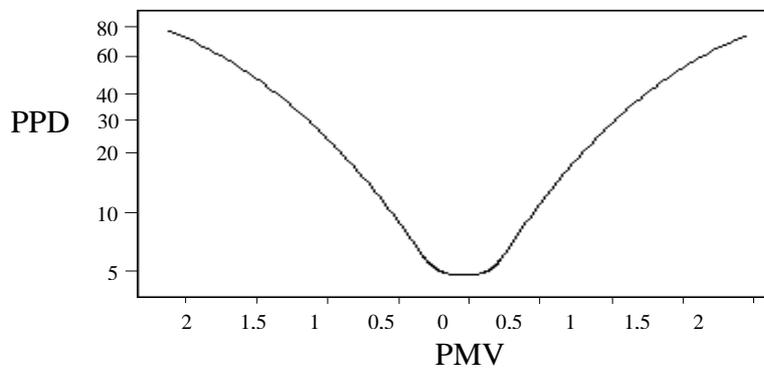


Figure 7 : Pourcentage prédit d'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV) d'après la norme ISO 7730.

Ces courbes montrent qu'une augmentation du métabolisme de travail se traduit par le glissement du minimum de la courbe PPD vers les températures plus basses et l'étalement de cette courbe. Pour un travail sédentaire, la température optimum se situe aux alentours de 26 °C, et pour un travail léger vers 22°C. Les sujets ayant un métabolisme de travail modéré ou léger sont plus sensibles sur le plan du confort à de faibles variations de températures ambiantes.

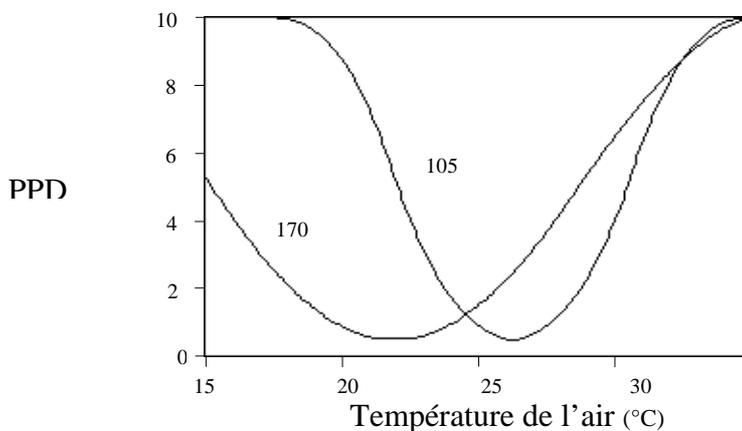


Figure 8 : Evolution du pourcentage prédit d'insatisfaits (PPD) en fonction de la température ambiante selon qu'il s'agit de personnes au repos en position assise (M = 105 W) ou de personnes effectuant un travail léger (M = 170W).

Les limites du PPD dépendent du nombre d'insatisfaits que l'on est prêt à tolérer. La norme ISO 7730 préconise de limiter le PPD à 10%, ce qui revient à limiter l'intervalle acceptable du PMV entre - 0,5 et + 0,5. La norme fixe des chiffres de base qui contentent le plus grand nombre de personnes, il est important d'expliquer cette notion au salarié. Ceci étant, dans de petites structures, ces températures optimales d'ambiance peuvent être rediscutées avec les salariés.

La détermination des indices PMV et PPD n'est applicable que dans certaines limites de variation des paramètres de base au delà desquelles, le confort thermique est impossible. Pour les différents paramètres d'influence, ces valeurs limites de "confort thermique" sont :

ta	entre 10 °C et 30°C,
tr	entre 10 °C et 40°C,

Va	inférieure à 1m.s^{-1}
PaH ₂ O	inférieure à 2,7 kPa,
Isolement vestimentaire	inférieur à 2 clo,
la dépense énergétique (M)	inférieure à 420 W.

Ainsi, selon la norme ISO 7730 pour un travail de bureau sédentaire (70 W.m^{-2}), la température sera comprise entre 20 et 24 °C dans les conditions hivernales (période de chauffage) avec un vêtement de 1 clo et entre 23 et 26 °C dans les conditions estivales avec un vêtement de 0,5 clo. L'humidité relative doit être comprise entre 40 et 60 %.

2.3.2 Situations particulières de confort

Certains dispositifs techniques exigent des conditions d'ambiance strictes pour fonctionner normalement, ces situations peuvent être contraignantes pour les salariés. L'insatisfaction thermique peut être causée par un inconfort "tiède" ou "frais" pour le corps dans son ensemble. Mais cette insatisfaction peut aussi être causée par un refroidissement ou un réchauffement non désiré d'une partie du corps. Ainsi, le confort thermique peut être affecté par les courants d'air, l'asymétrie du rayonnement thermique, un fort gradient thermique vertical de l'air, la température du sol....

- Effet des courants d'air. La perception d'un courant d'air localisé notamment au niveau de la nuque ou du visage est un élément d'inconfort. Cette perception du courant d'air dépend de la vitesse de l'air, de la température de l'air, de la zone du corps concernée et du statut thermique de la personne. La norme recommande une vitesse d'air moyenne inférieure à $0,15\text{ m.s}^{-1}$ en hiver et à $0,25\text{ m.s}^{-1}$ en été lors d'un travail sédentaire.

- Effet de l'asymétrie d'un rayonnement thermique. Cette situation peut se rencontrer par exemple dans le cas d'une personne exposée directement sous une lumière électrique, sous un plafond chauffé ou devant une large fenêtre. Il est généralement admis que la différence de température entre plafond et sol doit être inférieure à 5°C (Fanger 1972).

- Effet de gradient thermique vertical de l'air et de la température du sol. En général, les températures sont plus élevées en hauteur donc au niveau de la tête, ceci est particulièrement vrai dans les espaces confinés comme un véhicule et peut engendrer une sensation de manque d'air. La norme admet une différence de température d'air maximum de 3°C entre 0,1 m du sol (niveau des chevilles) et 1,1 m du sol (niveau de la tête chez une personne assise). La norme ISO 7730 (AFNOR 1995) recommande une température du sol comprise entre 19 et 26°C selon le type de matériau qui va modifier la conduction thermique (Vogt 1995).

- Autres paramètres d'influence. Un métabolisme trop élevé ou des vêtements trop lourds peuvent être source d'inconfort. D'autres éléments influençant le confort thermique ont été étudiés : l'âge, le sexe, le rythme circadien, la nourriture, la localisation géographique, l'ethnie, la couleur des murs, le bruit, la lumière. Fanger (1972) a conclu que ces éléments n'ont pas une influence suffisante pour agir sur les 6 paramètres de l'équation du bilan thermique et sur le PMV. Toutefois, il ne peut exister de règles de confort universelles du fait de grandes variations géographiques ou inter et intra-individuelles (Metz 1961, Parsons 1993, Vogt 1995).

2.4 Risques liés aux contacts avec des surfaces chaudes

Le contact de la peau avec une surface chaude entraîne une augmentation de la température de la peau qui va entraîner successivement une vasodilatation, la transpiration puis douleur et brûlure. L'inconfort ou la douleur causés par ce contact peuvent être réduit

par les vêtements (NF EN 563, ISO 7730, Parsons 1993, Morin et Bushnell 1998, Bernard et Foley 1993). Les facteurs qui influencent le risque de brûlure sont la température de surface, le matériau et la durée de contact entre la peau et la surface. La figure 9 (Parsons 1993) indique le seuil de la douleur lors d'un contact du bout du doigt avec différents matériaux chauds.

La norme EN 563 (AFNOR 1995) donne un schéma explicatif des relations existant entre les seuils de brûlure et la durée de contact lorsque la peau touche une surface chaude. Un point sur la courbe des seuils de brûlure indique pour une durée de contact déterminée de la peau avec une surface chaude, la valeur de température de surface qui correspond à un état entre l'absence de lésion de la peau et l'apparition d'une brûlure superficielle.

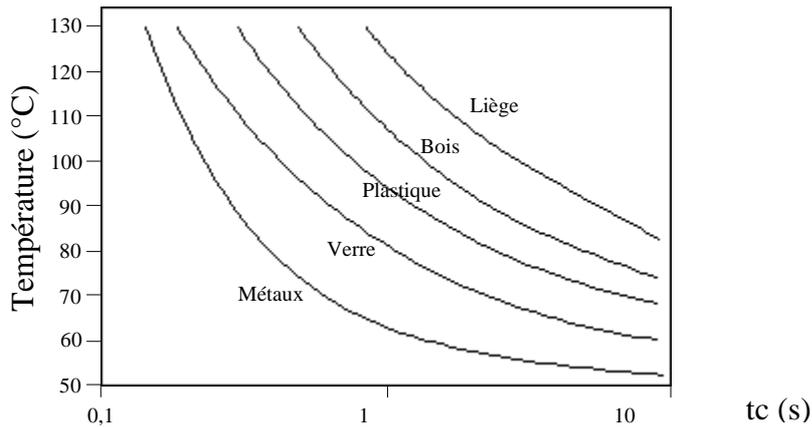


Figure 9 : Température limite de contact de la peau avec la surface de différents matériaux en fonction de la durée de contact (t_c en s).

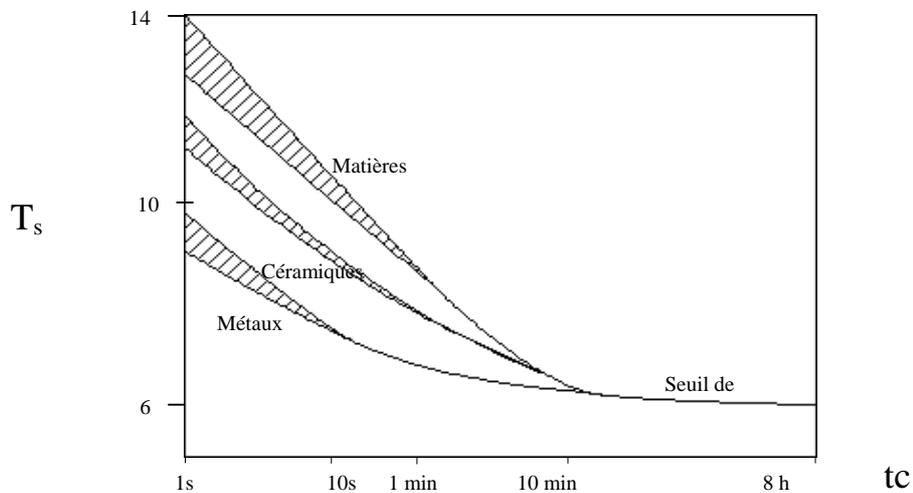


Figure 10 : Relations schématisées entre les seuils de brûlure et la durée de contact (t_c) lorsque la peau touche une surface chaude.

2.5 Méthodes d'évaluation des contraintes

L'équilibre du bilan thermique dépend essentiellement des quatre paramètres de l'ambiance thermique : la température de l'air (t_a), la température moyenne de rayonnement (t_r), l'humidité de l'air (P_{aH_2O}) et la vitesse de l'air (V_a), et de deux facteurs liés à l'individu

exposé : sa dépense énergétique et son habillement. Afin de calculer le bilan thermique, il est nécessaire d'évaluer ou de mesurer chacun de ces paramètres.

2.5.1 Paramètres de base de l'ambiance thermique

Les appareils et méthodes de mesure des paramètres physiques de l'environnement font l'objet de la norme ISO 7726 qui décrit les différents capteurs à utiliser et recommande certaines procédures de mesure.

- La température de l'air (t_a) intervient dans les échanges de chaleur par convection. Pour la mesurer il faut s'affranchir de l'influence de toute source de rayonnement thermique. Le psychromètre est l'appareil de choix puisqu'il assure une protection contre le rayonnement thermique et une convection suffisante. L'appareil doit être étalonné à intervalles réguliers ; lorsque les conditions thermiques sont variables au cours du temps il faut tenir compte du temps de réponse de l'appareil.

- L'humidité de l'air intervient dans les échanges de chaleur par évaporation dans les voies respiratoires et à la surface de la peau.

L'humidité de l'air peut être exprimée en 5 grandeurs :

- la pression partielle de vapeur d'eau (P_{aH_2O} en kPa);
- l'humidité relative (en pour cent) mesurée par un hygromètre;
- la température humide (t_h en °C) mesurée par le psychromètre;
- la température de rosé (t_r en °C) est mesurée par l'hygromètre à chlorure de lithium ou à condensation sur un miroir refroidi;
- la température humide naturelle est mesurée par un thermomètre non protégé contre le rayonnement et non ventilé. Elle sert au calcul du WBGT (cf 2.6.1).

Le diagramme psychrométrique permet de relier 4 grandeurs (figure 11). Il comporte en ordonnée la pression partielle de vapeur d'eau (en kPa) et en abscisse la température de l'air (t_a en °C) et permet de déterminer l'humidité relative (RH en %) et la t_h (°C).

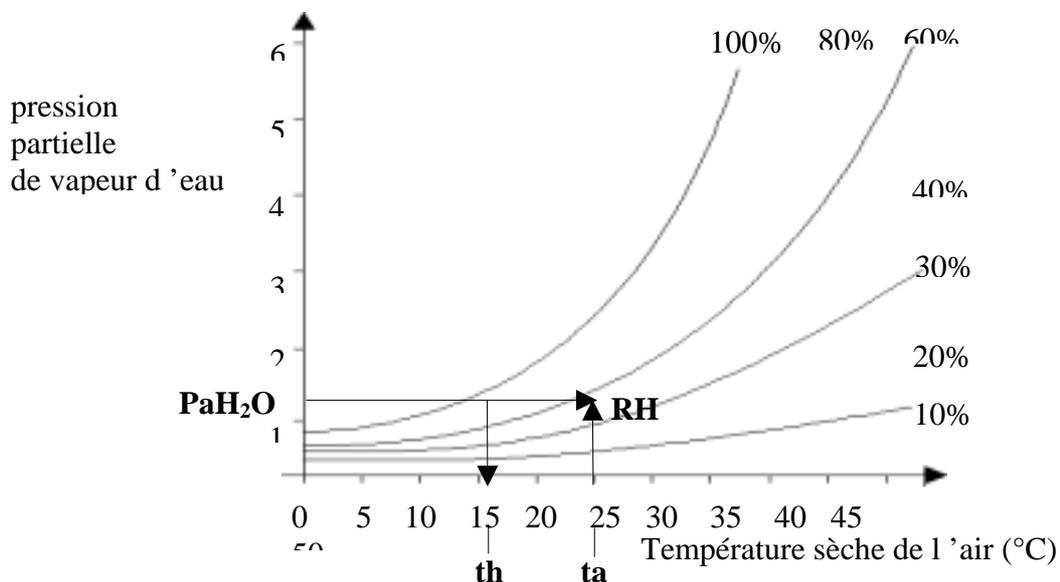


Figure 11 : Schéma explicatif des paramètres du diagramme psychrométrique. Les données mesurées sont la t_a et la P_{aH_2O} . L'humidité relative (RH) et la température humide (t_h) sont déterminées selon la construction présentée dans la figure.

- La température moyenne de rayonnement (t_r) est la température virtuelle d'une sphère noire et mate de grand diamètre et de température uniforme qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel. Elle peut être

déterminée soit au moyen du globe noir, soit à partir des températures planes de rayonnement dans les différentes directions, soit enfin par intégration des flux provenant des différentes sources de rayonnement thermique. Ces deux dernières techniques nécessitent des calculs importants. Le thermomètre à globe noir est l'appareil le plus couramment utilisé. Son temps de réponse est de 20 à 30 minutes, la mesure n'est valable que si le climat est stable pendant cet intervalle de temps.

- La vitesse de l'air (V_a) influence les échanges par convection et par évaporation. Les appareils de mesure utilisés sont des anémomètres à ailettes qui comptent le nombre de rotations des ailettes durant un intervalle de temps, ils ne permettent pas de mesurer des V_a inférieures à $0,3 \text{ m.s}^{-1}$ ou des anémomètres thermiques qui mesurent le transfert de chaleur entre un élément chaud et l'air ambiant (ex : anémomètre à fil chaud).

	Grandeurs fondamentales				Grandeur dérivée
	ta en °C	tr moyenne en °C	V_a en m.s^{-1}	Humidité (kPa)	thn en °C
Appareils	-Thermomètre mercure -Sonde à résistance -Couple thermoélectrique	-Globe noir de diamètre 0,15 m revêtu d'une peinture mate (émissivité = 0,95) -Capteur plan réponse immédiate	Sonde de mesure omnidirectionnelle (boule chaude)	-Psychromètre -Sonde cLi	Thermomètre humide ventilé naturellement
Précautions générales d'emploi	Protéger la sonde de mesure contre le rayonnement thermique	Pour le globe noir, il faut :-attendre 20 à 30 min avant d'effectuer une mesure, -mesurer la vitesse d'air autour du globe noir avec précision	Les sondes de mesure à élément chaud doivent être compensées en température	Mesures psychrométriques -vitesse d'air sur la sonde 4 à 5 m.s^{-1} -sondes protégées du rayonnement -utilisation d'eau distillée	Veiller à l'eau distillée

Tableau 3 : Paramètres physiques des ambiances thermiques. Données relatives à la mesure des grandeurs fondamentales et des grandeurs dérivées.

2.5.2 Evaluation du métabolisme

Dans le cas de certaines activités telles que pédaler à bicyclette, monter un escalier ..., le travail extérieur fourni peut être estimé. Il est cependant relativement faible et pour la plupart des activités pratiquement toute l'énergie issue du métabolisme est transformée en chaleur ; cette approximation surestime la production de chaleur réelle et constitue donc un facteur de sécurité dans l'évaluation de la contrainte thermique. En situation de travail, la dépense énergétique peut être évaluée au moyen de l'une des méthodes suivantes : la détermination de la consommation d'oxygène, la mesure de la fréquence cardiaque ou l'analyse de la tâche.

a) Dépense énergétique calculée directement par mesure de la consommation d' O_2 . La détermination de la consommation d'oxygène (VO_2 en l.min^{-1}) est basée sur la mesure des concentrations en O_2 et CO_2 dans l'air expiré et sur la mesure du débit ventilatoire. Elle permet d'évaluer le métabolisme avec une précision moyenne de 5 % (ISO 8996) à 10 % (Astrand et Rodhal 1994). De telles mesures sont difficiles à réaliser sur le lieu de travail ; en effet l'appareillage est cher et fragile et le mesurage peut perturber l'exécution du travail (inconfort de l'appareillage, gêne visuelle du masque) (Nielsen et Meyer 1985, Mairiaux et Malchaire 1990, Malchaire 1996).

b) Dépense énergétique calculée à partir de la fréquence cardiaque (Fc) qui est un paramètre physiologique facile à enregistrer sur le lieu de travail. Les équipements d'enregistrement en continu de la Fc sont fiables, peu coûteux, légers, bien acceptés par les salariés et faciles à utiliser. L'intérêt de la Fc réside dans sa relation directe avec la consommation d'oxygène et par conséquent avec le métabolisme. La relation FC- VO₂ varie en fonction de la capacité physique et du degré d'entraînement du sujet, elle doit donc être établie pour chaque sujet. La relation peut être obtenue lors d'une épreuve d'effort (Meyer et Flenghi 1994) ou être déduite du poids et de l'âge de la personne (Mairiaux et Malchaire 1990, Astrand et Rodhal 1994).

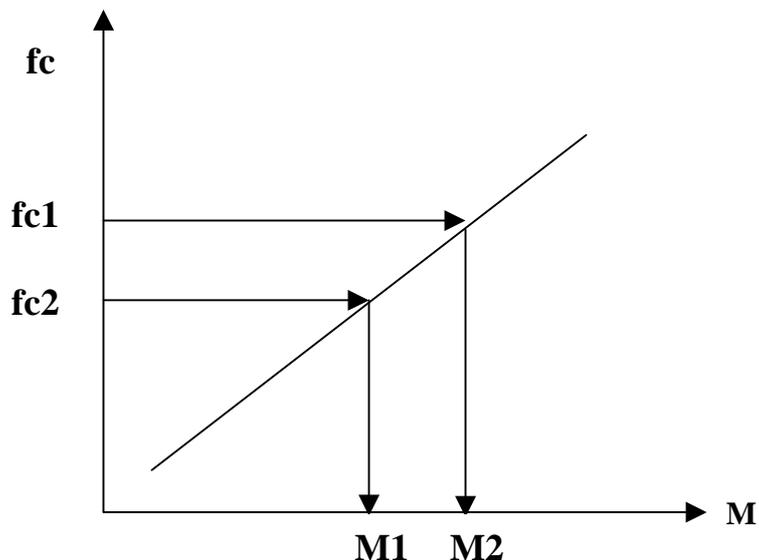


Figure 12 : Relation entre fc et le métabolisme au cours d'une épreuve d'effort. Principe d'évaluation de la dépense énergétique (M1 et M2) pour deux fc de travail.

La relation entre la Fc et le métabolisme (M) est déterminée à partir des couples de valeur Fc – VO₂max ou Fc - charge relevés aux paliers successifs d'une épreuve d'effort sous maximale sur bicyclette ergométrique ou au moyen d'un step-test. La figure 12 illustre le principe de l'estimation du métabolisme de travail à partir de la fréquence cardiaque. La relation Fc - M, dérivée de l'épreuve d'effort, est utilisée pour convertir la Fc de travail en métabolisme de travail "équivalent".

Les épreuves d'effort ne peuvent pas toujours être réalisées sur le lieu du travail, dans ce cas, la relation Fc - métabolisme peut être prédite à partir des caractéristiques de la personne d'une part des valeurs au repos de la fréquence cardiaque (Fc₀) et du métabolisme (M₀) (estimé à 105 W pour un homme) et d'autre part, des valeurs maximales de la fréquence cardiaque (Fc_{max} = 220 – âge) et du métabolisme (M_{max}) calculé selon la formule :

$$M_{max} = (18 - 0,1 \text{ âge}) \times \text{Poids.}$$

Les couples de valeurs (Fc₀, M₀) et (Fc_{max}, M_{max}) sont liés par une relation linéaire :

$$M = a (Fc) + b$$

où a est la pente de la droite, avec $a = (M_{max} - M_0) / (Fc_{max} - Fc_0)$,
 b est l'ordonnée à l'origine, avec $b = M_0 - a Fc_0$.

Le métabolisme ainsi évalué à partir de la fréquence cardiaque n'est acceptable que dans la mesure où la Fc mesurée est fonction uniquement de ce métabolisme de travail. Or, cette assertion n'est pas vérifiée car la Fc subit également l'influence des efforts musculaires isométriques, de l'ambiance thermiques (cf.2.6.2) et des émotions. Selon l'importance de ces composantes, le métabolisme estimé peut être supérieur au métabolisme réel.

c) Dépense énergétique calculée indirectement à partir de l'analyse de la tâche et la référence à des tables de métabolisme (tableau 4 et 5) qui permettent d'évaluer par décomposition de la tâche ou par analogie la dépense énergétique associée au travail étudié (Spitzer et Hettinger 1982, Ainsworth et al. 1993, ISO 8996).

	M (moyennes, watts)	Intervalle (watts)
Travail manuel		14-84
- léger (écrire)	27	
- moyen	54	
- lourd (taper à la machine)	72	
Travail avec un bras		49-175
- léger	63	
- moyen	99	
- lourd (martelage de clous)	135	
Travail des deux bras		70-245
- léger	117	
- moyen	153	
- lourd	189	
Travail avec le corps		175-1050
- léger	225	
- moyen	342	
- lourd (creuser)	504	

Tableau 4 : Accroissements du métabolisme selon l'importance des groupes musculaires sollicités et l'intensité de l'effort fourni.

La tâche est analysée par observation. Le métabolisme correspondant à chaque phase de travail est la somme du métabolisme de base (80 W), du métabolisme lié à la position du corps (assis 20W, debout 45 W, marche de niveau 140 à 210 W selon la vitesse, marche en montée 54 W par mètre d'élévation par minute), du métabolisme lié aux mouvements des mains, des bras, du corps et à l'intensité de l'effort fourni (léger, moyen, lourd). Ces valeurs de métabolisme sont fournies par le tableau 4 (Mairiaux et Malchaire 1990). Par exemple un travail debout consistant à retirer des plaques métalliques d'un four correspond à un métabolisme $M = 80 + 45 + 189 = 314$ W.

La précision de ce type d'estimation serait de l'ordre de 15 % (Spitzer et Hettinger 1965), elle est fonction de la compétence et de l'expérience de l'observateur et de la nature de la tâche (une tâche répétitive d'opérations stéréotypées est plus facile à évaluer qu'une tâche variable). La norme ISO 8996 donne des exemples d'activités et définit cinq classes de métabolisme (Tableau 5). Les valeurs du métabolisme qui figurent dans la norme s'appliquent aux environnements thermiques modérés. Dans les conditions chaudes, le métabolisme peut augmenter de 5 à 10 W.m⁻² en raison de l'augmentation de la fréquence cardiaque et de la sudation.

2.5.3 Evaluation de l'isolement vestimentaire

Actuellement un grand nombre de données permettent d'évaluer l'isolement thermique d'ensembles vestimentaires ou de pièces de vêtement. Ces valeurs figurent dans la norme ISO 9920. Ainsi, pour évaluer l'isolement vestimentaire d'un vêtement de travail ordinaire, il suffit de se reporter au tableau 6. Si le vêtement porté ne correspond à aucun des ensembles répertoriés, l'isolement pourra être estimé en effectuant la somme des isolements unitaires selon la procédure indiquée par la norme ISO 9920. Ces valeurs sont susceptibles d'être modifiées chez l'homme au travail par le "pompage" consécutif aux mouvements du corps. L'isolement thermique intrinsèque peut être réduit de 5 à 50 % selon le nombre

d'ouvertures dans le vêtement, la texture et la nature de l'activité (Mairiaux et Malchaire 1990).

Classe	Valeur à retenir pour le calcul du M moyen en $W.m^{-2}$	Valeur à retenir pour le calcul du M moyen en W	Exemples
Repos	65	115	Repos
1 M faible	100	180	Assis à l'aise : travail manuel léger (écriture, frappe à la machine, dessin, couture, comptabilité), travail des bras et des mains (petits outils, inspection, assemblage ou triage de matériaux légers), travail des bras et des jambes (conduite de véhicule dans des conditions normales, manoeuvre d'un interrupteur à pied ou à pédale). Debout : perceuse (petites pièces), fraiseuse, bobinage, usinage avec outils de faible puissance, marche occasionnelle.
2 M modéré	165	295	Travail soutenu des mains et des bras (cloutage, limage), travail des bras et des jambes (manoeuvres sur chantiers de camions ou tracteurs, travail des bras et du tronc, travail au marteau pneumatique, plâtrage, manipulation intermittente de matériaux modérément lourds, sarclage, binage, cueillette de fruits ou de légumes), poussées ou traction de charrettes légères ou de brouettes, marche à une vitesse de 3,5 à 5,5 $km.h^{-1}$.
3 M élevé	230	415	Travail intense des bras et du tronc, transport de matériaux lourds, pelletage, travail au marteau, sciage de bois dur, marche à une vitesse de 5,5 à 7 $km.h^{-1}$. Poussée ou traction de charrettes à bras ou de brouettes lourdement chargés, enlèvement de copeaux de pièces moulées, pose de blocs de béton.
4 M très élevé	290	520	Activité très intense à allure rapide proche du maximum, travailler à la hache, pelleter ou creuser avec intensité, monter des escaliers ou une échelle, courir ou marcher à une vitesse > 7 $km.h^{-1}$.

Tableau 5 : Classification du métabolisme (M) par type d'activité (ISO 8996).

La réduction du débit évaporatoire consécutif au port d'un vêtement de protection augmente le stockage de chaleur et limite le temps de travail à la chaleur (Tanaka et al.1978, Meyer 1998). En milieu de travail, un bleu de travail classique présente un isolement vestimentaire de 0,6 clo. Lors d'opérations de retrait de l'amiante, l'opérateur porte une combinaison étanche avec des surbottes, des gants et une protection respiratoire, l'isolement vestimentaire est alors estimé à 1,4 clo.

Vêtements courants	I_{cl} isolement thermique intrinsèque exprimé en clo
T-shirt, short, caleçon, chaussettes mi-mollet et basquets	0,33
Chemise manches courtes, jupe d'été, slip, bas nylons, sandales	0,54
Idem + un pull léger col en V	0,78
Robe d'hiver, pull ras du cou en laine, slip, bas, soutien-gorge, souliers	0,93
Chemise manches courtes, pantalon léger, caleçon, chaussettes légères, souliers	0,55
Idem mais avec une chemise en coton manches longues	0,61

Idem mais avec en plus un veston demi-saison	1,01
Chemise flanelle, gilet, pantalon flanelle, caleçon, chaussettes, souliers	0,89
Chemise manches courtes, pull léger col en V, pantalon léger, caleçon, chaussettes, souliers	0,71
Chemise manches longues, pull léger col en V, pantalon flanelle, caleçon, chaussettes, souliers	0,95
Chemise coton manches longues, pantalon normal, caleçon, chaussettes, souliers	0,75
Idem avec veste de travail en coton	0,87
Idem avec en plus T-shirt sous la chemise	0,98
T-shirt, bleu de travail, caleçon, chaussettes, chaussures	0,65
Chemise manches longues légère, bleu de travail, caleçon, chaussettes, souliers	0,81

Tableau 6 : Isolement thermique d'ensembles vestimentaires (norme ISO 9920).

Pour les vêtements de protection peu ou pas perméables à la vapeur d'eau, des tableaux tenant compte de l'indice de perméabilité et du type de tissu figurent également dans la norme. Le tableau 7 en présente quelques exemples.

Vêtements de protection thermique	I _{cl} (clo) isolement thermique intrinsèque	i _m index de perméabilité à la vapeur d'eau
Caleçon, pantalon, chaussettes, chaussures, chemise manche longue + tablier aluminisé.	0,77	0,40
Idem + veste aluminisée (s'arrêtant au niveau des hanches)	1,36	0,33
Idem + veste aluminisée (s'arrêtant à mi-mollet)	1,74	0,30
Caleçon, T-shirt, bleu de travail, chaussettes et chaussures + surpantalon et sur veste aluminisés	1,48	-

Tableau 7 : Isolements thermiques de vêtements de protection.

2.6 Indices de contraintes ou d'astreintes thermiques

Les indices thermiques sont des indicateurs de contrainte ou d'astreinte thermique qui permettent (en théorie) de déterminer si une situation de travail donnée fait courir un risque au travailleur, si la durée d'exposition doit être limitée ou sur quel paramètre il convient d'agir pour rendre la situation acceptable. Les indices de contrainte prennent en compte les paramètres liés à l'ambiance. Les indices d'astreinte identifient le retentissement sur l'organisme des différentes contraintes.

2.6.1 Indices de contraintes thermiques

De nombreux indices de contrainte ont été proposés, à savoir :

- les indices globaux calculés à partir des paramètres thermiques intégrés au niveau de l'appareil de mesure. Il s'agit du WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, Yaglou et Minard 1957) du WGT (Wet Globe Temperature, Botsford 1971) et de l'indice minier (Mas 1990).
- les indices analytiques empiriques déterminés à partir des paramètres primaires (t_a , P_a , t_h , t_g , V_a) au moyen d'abaques. Les principaux indices sont la Temperature

Effective ET (Yaglou 1927), l'indice P4SR (Predicted Four Hour Sweat Rate, Mc Ardle et al. 1947) et la Température Opérative.

- les indices analytiques basés sur le bilan thermique sont des indices d'astreinte déterminés à partir des paramètres primaires de la situation de travail et utilisent des équations mathématiques pour établir le bilan thermique. Les plus connus sont le HSI (Heat Stress Index, Belding et Hatch 1955), L'ITS (Index of Thermal Stress, Givoni 1963), le PMV-PPD (Fanger 1972) et la sudation requise SWreq (Vogt et al. 1981) .

L'indice WBGT et la sudation requise sont les plus utilisés, ils seront décrits succinctement.

a) L'indice WBGT (ISO 7243) requiert la mesure de la température du globe noir (tg) et de la température humide naturelle (thn) (cf 2.5.1). Il est défini sous abri par la relation :

$$WBGT = 0,7 \text{ thn} + 0,3 \text{ tg}$$

La ta, la Pa et la Va interviennent indirectement sur le WBGT par l'influence qu'elles exercent sur les échanges par convection du globe noir et sur le processus d'évaporation au niveau du thermomètre humide. Cet indice peut estimer le caractère tolérable d'une situation de travail à la chaleur et fixe des cycles de travail et de repos en vue de réduire les contraintes. La norme propose des valeurs limites de WBGT en fonction du métabolisme et de l'acclimatement, pour des travailleurs en bonne santé, habillés d'un vêtement de travail ordinaire (0,6 clo). Le tableau 8 tiré de la norme ISO 7243 donne des valeurs repères de l'indice WBGT pour un travail continu de 4h.

Les valeurs de WBGT sont plus faibles lorsque le travailleur porte un vêtement de protection imperméable, le port d'une combinaison étanche impose une diminution de la valeur limite du WBGT de 5°C (Mairiaux et Malchaire 1990) Lorsque la valeur limite du WBGT est dépassée, un repos doit être octroyé. La durée de ce repos est telle que le WBGT moyen sur la séquence travail-repos totale soit inférieur au WBGT limite moyen calculé sur la même séquence. Par exemple, lorsque le WBGT limite est de 30°C, que le travail est réalisé à 35 °C de WBGT, la durée de repos à 15 °C de WBGT est de 10 minutes toutes les 90 minutes.

métabolisme (W)	sujet acclimaté (WBGT °C)		sujet non acclimaté (WBGT °C)	
<118	33		32	
118 - 234	30		29	
235 - 360	28		26	
361 - 468	25 / 26	*	22 / 23	*
> 468	23 / 25	*	18 / 20	*

Tableau 8 : Valeurs limites du WBGT pour un travail continu et un isolement vestimentaire de 0,6 clo (* le premier chiffre est préconisé en l'absence de courant d'air, le second lorsque les mouvements de l'air sont perceptibles) (Mairiaux et Malchaire 1990).

L'indice WBGT a des limites, sa simplicité d'utilisation n'est souvent qu'apparente car il nécessite de nombreuses mesures. Il est basé sur deux températures la tg et la thn ; la tg n'est pas représentative de la tr si les conditions ambiantes ne sont pas stables ; la thn nécessite la réalisation de mesures à différentes hauteurs, elle est difficilement mesurable en ambiance instable. Les paramètres de base ne sont pas connus, l'indice ne permet pas de déterminer sur lequel des paramètres on peut agir pour réduire la contrainte ; l'indice WBGT ne s'applique pas à l'évaluation des contraintes thermiques subies pendant de très courtes périodes.

En pratique, l'indice WBGT sert au dépistage de situations à risque de contrainte thermique ; si le résultat du WBGT est supérieur à 25°C, la situation doit être analysée de façon plus approfondie (Meyer et al. 1997).

b) L'Indice de sudation requise (ISO 7933) comporte les 3 étapes suivantes :

- a) la détermination à partir des 6 paramètres de base (t_a , Pa, tr, Va, M, Icl) de l'évaporation requise (E_{req}) pour conserver l'équilibre thermique.
- b) l'estimation de l'évaporation maximale (E_{max}), selon les possibilités de mouillure et de variation de Pa. La mouillure cutanée requise (W_{req}) est déterminée par E_{req}/E_{max} .
- c) la sudation requise (SW_{req}) est déterminée à partir de l'évaporation requise, de la mouillure cutanée requise et du rendement évaporatoire (r). Le calcul de la sudation prédite prend en compte deux limites physiologiques : le débit sudoral maximal (SW_{max}) et la mouillure cutanée maximale (W_{max}).

Les durées limites d'exposition (DLE) se calculent sur deux bases :

- l'astreinte thermostatique, lorsque la température centrale risque de s'élever.
- le risque de déshydratation, lorsque la perte sudorale cumulée devient excessive.

A court terme, il peut être nécessaire de limiter l'exposition à la chaleur pour éviter que le stockage de chaleur ne dépasse sa valeur seuil (Q_{max} en $W.h.m^{-2}$, tableau 9) qui correspond à une élévation maximale admissible de la température interne de 1°C. Si l'évaporation prédite (E_p en $W.m^{-2}$) est inférieure à l'évaporation requise (E_{req} , $W.m^{-2}$), la chaleur est stockée. La durée limite d'exposition (DLE, min) recommandée est alors estimée par l'expression :

$$DLE = 60 Q_{max} / (E_{req} - E_p)$$

A long terme, pour éviter le risque de déshydratation, la durée d'exposition doit être limitée pour que la perte hydrique cumulée ne dépasse pas une valeur critique (D_{max} , g) ; la valeur de la perte sudorale est limitée quelque soit les possibilités de réhydratation du salarié. La durée d'exposition (DLE, min) est donnée par l'expression suivante où la sudation prédite (SW_p) est exprimée en $g.h^{-1}$:

$$DLE = 60 D_{max} / SW_p$$

La norme ISO 7933 donne des valeurs limites de mouillure cutanée (W_{max}), de débit sudoral (SW_{max}), de stockage maximal de chaleur (Q_{max}) et de perte hydrique cumulée (D_{max}) en fonction de l'acclimatement. Le tableau 9 présente ces limites en fonction du niveau de protection souhaité. En adoptant le seuil d'alarme, tous les salariés seront en sécurité. Le seuil de danger ne protège que 95% des sujets.

critères	sujet non acclimaté		sujet acclimaté	
	alarme	danger	alarme	danger
Wmax	0,85		1,0	
SW max :				
- repos W. m ⁻²	100	150	200	300
- travail W. m ⁻²	200	250	300	400
Qmax Wh.m ⁻²	50	60	50	60
Dmax g	2600	3250	3900	5200

Tableau 9 : Valeurs limites de mouillure cutanée (Wmax), débit sudoral maximal (SWmax), stockage maximal de chaleur (Qmax) perte hydrique cumulée (Dmax). Le débit sudoral est exprimé en W.m⁻², 100 W.m⁻² sont équivalent à 260 g.h⁻¹. Les valeurs proposées sont calculées pour un sujet moyen de 1,70 m et 70 kg (ISO 7933).

2.6.2 Indices physiologiques

L'évaluation de l'astreinte thermique par mesurages physiologiques est décrite dans la norme ISO 9886. Cette norme présente les moyens de mesurer les différents paramètres de l'astreinte thermostatique et de l'astreinte sudorale.

a) Astreinte thermostatique

L'astreinte thermostatique peut être évaluée par le mesurage des températures corporelles ou de la fréquence cardiaque.

- Mesure des températures corporelles. La norme (ISO 9886) présente cinq sites de mesure permettant d'approcher la température centrale. Il s'agit de l'oesophage, du rectum, du tympan, du conduit auditif et de la cavité buccale. Les températures internes, mesurées dans le rectum ou l'oesophage sont les valeurs de référence de la température du noyau chez l'homme. Cependant, en situation de travail et lors de mesures réalisées sur un grand nombre de salariés, ces sites de mesure sont difficiles à utiliser.

La température tympanique peut être utilisée. Cependant, l'utilisation des instruments du commerce si elle est acceptable pour déterminer la fièvre n'est pas assez précise pour mesurer une variation de température centrale. La température du conduit auditif constitue une évaluation acceptable de la température du noyau si le capteur est maintenu en bonne position pendant la durée de la mesure et si le pavillon de l'oreille est isolé des conditions ambiantes. Ce site de mesurage est toléré comme un compromis acceptable entre la précision et la facilité d'utilisation d'une mesure de température corporelle (ISO 9886, Beard et al. 1996).

Pour mesurer la température buccale (tbu), le capteur doit être placé sous la langue, la bouche reste fermée pendant la durée de la mesure. La tbu peut être influencée par de brutales variations de la température de la peau au niveau du visage. Une approximation satisfaisante de la température centrale peut être obtenue si la température ambiante est supérieure à 18 °C et si la durée de fermeture de la bouche est d'au moins 5 minutes, le sujet ne doit pas boire, manger ou fumer dans les 15 minutes qui précèdent la mise en place du capteur. Plusieurs études montrent la bonne concordance entre la variation de température centrale et la variation de tbu d'où l'intérêt de l'utilisation de cette mesure en situation de travail (Mairiaux et al.1983, Beard et Bauman 1996, Aoyagi et Mac Lellan 1996).

La variation de la température entre le début et la fin d'un travail à la chaleur permet d'évaluer l'astreinte thermique. L'élévation de 1 °C de température centrale est considérée comme la valeur limite admissible (ISO 9886).

La norme ISO 9886 propose également une démarche de mesure de la température cutanée (tsk). En effet, cette dernière varie fortement sur toute la surface corporelle en

fonction du site de mesure et de l'ambiance, la tsk moyenne peut être estimée en pondérant un certain nombre de tsk locales. La tsk moyenne ne permet pas de mesurer l'astreinte thermique, mais elle constitue un critère important pour l'évaluation des conditions de confort thermique, la tsk optimale de confort peut être déterminée en fonction du métabolisme selon l'expression suivante : $tsk = 35,7 - 0,0153 M$ (Parsons 1993). La valeur limite de la tsk locale au seuil de douleur est de 45°C (ISO 9886).

- Mesurer la fréquence cardiaque (Fc) permet d'évaluer l'astreinte thermostatique. La méthode de recueil la plus simple est le comptage manuel au niveau de l'artère radiale ou carotide, mais cette technique est dépassée à l'heure actuelle. L'enregistrement continu de la Fc à l'aide d'un cardiofréquencemètre est la méthode de choix de recueil de la Fc, c'est une technique fiable, simple et n'interférant pas avec le travail. La Fc a un temps de réponse court. A tout moment, elle peut être considérée comme la somme de différentes composantes. La méthode développée par Vogt et al.(1973) considère que l'élévation de Fc par rapport au repos est la somme d'une composante thermique (dFCT) liée à l'augmentation de température centrale et d'une composante motrice (dFCM) liée aux efforts musculaires. Le profil de la fréquence cardiaque présentée dans la figure 13 permet d'illustrer cette approche.

La Fc de repos (FC_0) est mesurée au cours du repos précédent l'exposition à la chaleur. Pendant le travail, la Fc s'élève du fait de la dépense énergétique et de la charge thermique. A l'arrêt du travail, la composante dFCM tend à disparaître en 3 minutes (si le métabolisme de travail est très élevé, ce temps est plus long) alors que la récupération thermique est beaucoup plus lente. La courbe de décroissance de la Fc en fonction du temps présente donc une discontinuité : après une décroissance rapide liée à la récupération motrice qui est en moyenne de 3 minutes, apparaît la composante liée à la décroissance de la température corporelle. Cette dernière est fonction de l'environnement et de l'isolement vestimentaire.

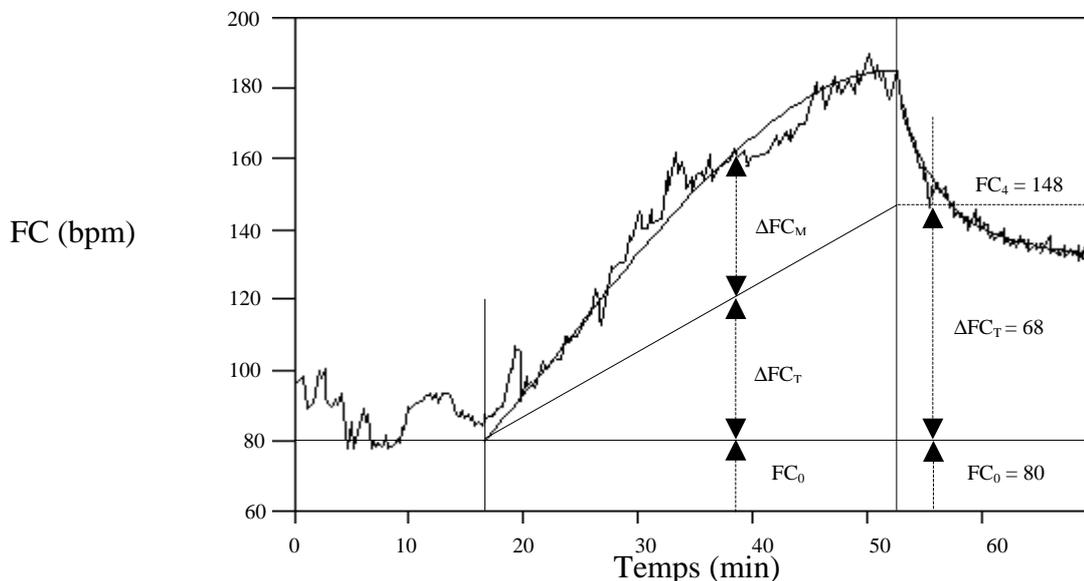


Figure 13 : Décomposition de fc en composantes thermique (dFCT) et métabolique (dFCM) à partir de la fc de la 4^{ème} minute de récupération. En pratique cette décomposition de Fc n'est appliquée que si la tâche dure plus de 10 min (Mairiaux et Malchaire 1990).

L'augmentation de la Fc d'origine thermique est en moyenne de 33 bpm par degré d'élévation de la température corporelle, cette réactivité thermique cardiaque varie d'un individu à un autre. La valeur de 30 bpm ne doit pas être dépassée (ISO 9886). La composante liée à l'astreinte thermique ou extra pulsation cardiaque thermique (EPCT) à la fin de la période de travail est estimée par :

$EPCT = F_{C_R} - F_{C_0}$ où F_{C_R} est la moyenne des F_c de récupération des 3, 4 et 5^{ème} minutes de repos assis en ambiance neutre à la fin du travail
 F_{C_0} la F_c de repos en ambiance neutre avant l'exposition

b) Astreinte sudorale

L'astreinte sudorale peut être évaluée grâce à des pesées des sujets. La variation de masse corporelle au cours d'un intervalle de temps est fonction principalement de l'évaporation et des variations entre les ingestions et les excréments aussi bien liquides que solides, et de façon négligeable aux écarts de poids entre le CO₂ expiré et l'O₂ inspiré.

En pratique, la mesure de la variation de poids exige certaines précautions. La précision de la balance ne doit pas être inférieure à 20 g, le sujet doit être pesé nu et vêtu en début et en fin de poste. Les ingestions doivent être pesées avec une balance de précision. Une pesée doit être réalisée avant et après chaque passage aux toilettes. De façon anecdotique, il est nécessaire d'être attentif aux outils que le salarié porte sur lui au cours des pesées successives.

2.6.3 Indices subjectifs

Les indices subjectifs sont utilisés autant dans des situations d'astreintes élevées que dans des situations de confort. Le fait qu'une norme ait été développée sur ces indices montre leur importance.

a) Situation de contrainte thermique

En situation de contrainte thermique, les données fournies par l'évaluation subjective sont utilisées pour compléter les méthodes physiques et physiologiques d'évaluation des charges thermiques. Il s'agit d'une approche psychologique qui consiste à recueillir les opinions émises en situation réelle par des personnes exposées à la chaleur. La réalisation d'un questionnaire simple est proposé d'après Parsons (1990) dans la figure 14.

b) Situation de confort

Du fait du développement de l'activité tertiaire, les différents éléments constitutifs du confort thermique sont devenus importants. En situation de confort, les indices PMV et PPD permettent de prédire les conditions climatiques moyennes pour le confort thermique dans le cas général. Il s'agit d'un modèle qui s'applique à des populations. En pratique, tous les individus ne correspondent pas nécessairement au modèle, il est donc nécessaire de compléter les valeurs proposées par une approche subjective des personnes au travail en ce qui concerne l'ambiance climatique et leur état individuel correspondant.

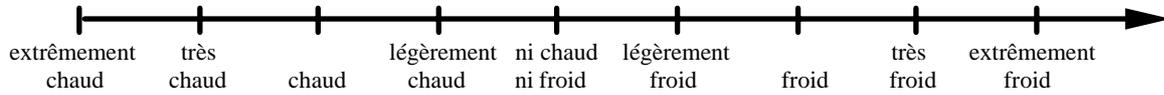
- Les échelles de jugement. La norme ISO 10551 propose la construction et l'utilisation d'échelles de jugement relatives à l'aspect subjectif du confort thermique ou de la contrainte thermique.

Des entretiens non directifs ou des questionnaires administrés peuvent être utilisés. La formulation des questions et des échelles de jugement subjectif est très importante et peut influencer les réponses (Parsons 1993). Les échelles de jugement subjectif existantes abordent deux aspects selon le type de jugement recherché : jugement perceptif ou jugement de tolérance.

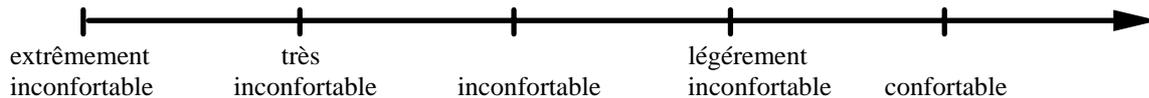
- Echelles de jugement perceptif, évaluatif et préférentiel.

Les trois échelles doivent être appliquées dans l'ordre. Ci-dessous sont présentés 3 exemples de questions relatives aux items de l'échelle de jugement.

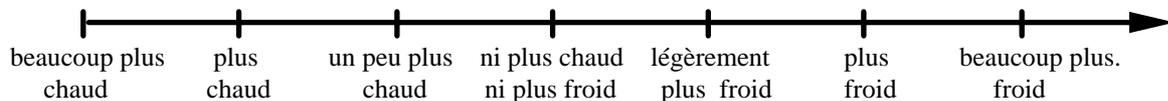
- échelle de perception : " comment vous sentez vous ?" (échelle à 9 niveaux)



- échelle évaluative : " trouvez-vous cela ?" (échelle à 5 niveaux)

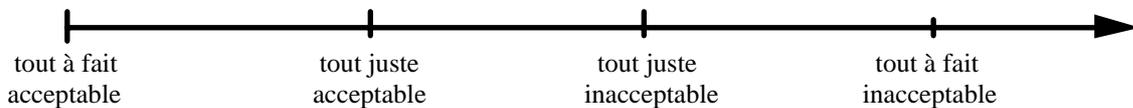


- échelle de préférence : " veuillez indiquer comment vous préféreriez être maintenant ?" (7 niveaux)

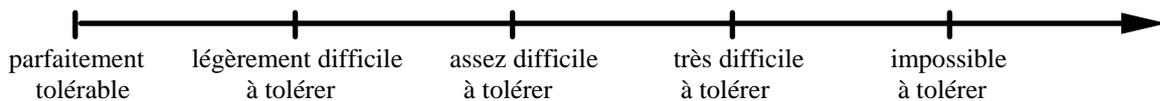


- Expressions de l'acceptabilité personnelle et échelle de tolérance sont abordés par des questionnaires dont des exemples sont présentés ci-dessous.

jugement d'acceptabilité personnelle : "comment jugez vous cet environnement d'un point de vue personnel ?" (échelle à 4 niveaux)



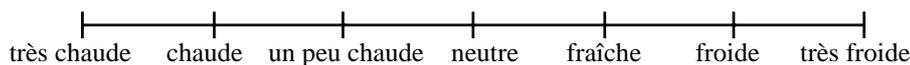
jugement de tolérance personnelle : "Cet environnement est..... ?". (échelle à 5 niveaux)



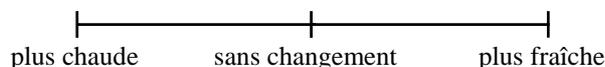
La figure 14 présente un exemple d'outil d'évaluation subjective de l'astreinte thermique d'une situation de travail.

Pouvez-vous, s'il vous plaît répondre aux questions suivantes concernant votre **confort thermique** ?

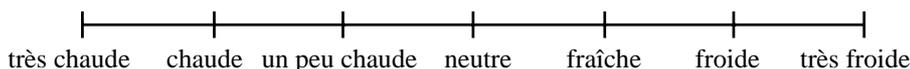
1. Indiquez sur l'échelle suivante comment vous percevez la température **maintenant**.



2. Pouvez - vous indiquer comment vous souhaiteriez qu'elle soit **maintenant** ?



3. Indiquez comment vous vous percevez la température **généralement** au travail.



grand nombre de sujets présentant de grandes variabilité inter-individuelles et dans des situations de travail très différentes, ceci participe à la validation de cette méthode en milieu de travail.

3. Méthodes

Trois groupes d'études ont été réalisées en situation de travail. Ils concernent des salariés exposés à différents types de contraintes en milieu industriel pour le premier (expérience A) ; des salariés travaillent dans la sécherie d'une papeterie pour le deuxième (expérience B) et des travailleurs participant à des opérations de retrait de l'amiante pour le troisième (expérience C). Les 18 postes de travail étudiés seront présentés par classe de contrainte thermique.

3.1 Postes de travail étudiés

Les postes de travail étudiés regroupent une grande variété de classes de contraintes thermiques. Pour classer les situations de travail, les valeurs suivantes ont été choisies arbitrairement ; une t_h supérieure à 20 °C, une t_r et une t_a supérieure à 40 °C sont considérées comme des valeurs élevées. La classification de la dépense énergétique respecte les valeurs de la norme ISO 8996 soit :

- métabolisme faible : inférieur à 180 W
- métabolisme modéré : de 180 à 295 W
- métabolisme élevé : de 295 à 415 W
- métabolisme très élevé : supérieur à 415 W

3.1.1 Salariés exposés à une t_h élevée.

a) Egaliseur dans une fromagerie industrielle. Le salarié égalise la présure du fromage dans des moules en plastique. Le poste de travail se situe le long d'un tapis qui déplace les moules de fromage qui défilent en continu imposant ainsi le rythme de travail. Le travail des membres supérieurs est important. La contrainte reste modérée mais l'humidité relative est élevée.

b) Laveur dans une fromagerie industrielle. La tâche consiste à rassembler les moules à fromage sur un plateau et les transporter pour les mettre dans une machine à laver industrielle à l'aide d'un transpalette. La contrainte à ce poste de travail est proche de celle du poste précédent.

c) Opérateur dans la sécherie d'une papeterie. Les opérateurs interviennent lors des changements de bobines de papier et pour des opérations de maintenance ou de contrôle.

Lorsque la machine à papier fonctionne sans incident ils sont au poste de contrôle. Les opérateurs ne pénètrent dans la sécherie en fonctionnement qu'en cas de casse du papier. Ces casses constituent un problème technique majeur ; elles sont imprévisibles et les opérateurs doivent réagir rapidement sans arrêter la machine. L'ouverture des portes de la sécherie (arrivée d'air moins chaud et moins humide) rend le séchage du papier moins homogène et augmente le risque de casse, l'intervention doit donc être la plus brève possible. Elle comporte une course, un décrochage du papier et l'évacuation des débris ; puis lorsque la feuille glisse à nouveau correctement il faut la remettre en place dans l'enrouleuse.

La température de l'air est très élevée, la température humide (t_h) dans la sécherie est élevée compte tenu du procédé de fabrication qui utilise l'évaporation de l'eau contenue dans la feuille de papier. La dépense énergétique est très élevée mais sur un temps bref.

3.1.2 Salariés exposés à une th élevée et présentant un métabolisme élevé.

a) Couleur de produits réfractaires. Les pièces réfractaires (2 à 4 kg) sont fabriquées à partir de ciment très liquide coulé dans des moules en plâtre. Les salariés effectuent le remontage du moule après séchage, la coulée de ciment (seaux de 15 à 20 kg), et le démontage du moule (2 à 4 kg). La manutention manuelle est l'activité principale, le poids des objets est faible mais les manipulations sont nombreuses. La contrainte thermique à ce poste est moyenne, mais l'humidité relative est importante, la dépense énergétique est élevée.

b) Couleur de cuvette. Ce poste est semblable au précédent mais les pièces fabriquées sont plus lourdes (cuvettes de WC), de ce fait des aides à la manutention ont été mises en place ce qui permet de réduire la charge physique.

3.1.3 Salariés exposés à une ta élevée et présentant un métabolisme élevé.

a) Le poste de mineur dans une mine de potasse correspond à un poste de travail situé en bout d'exploitation dans la zone du puits d'extraction de la potasse à 850 mètres de profondeur. Le travail du mineur consiste à entretenir et surveiller le réseau de convoyeurs à bande qui centralisent vers des silos la potasse venant des différents chantiers. Le mineur doit assurer l'alignement des convoyeurs, cette activité comporte une dépense énergétique très élevée. La ta est élevée.

3.1.4 Salariés exposés à une tr élevée.

a) Boulanger dans une boulangerie industrielle. Le boulanger surveille le bon fonctionnement d'un four de cuisson de bretzels, il doit maintenir une température de cuisson très précise dont le contrôle exige des déplacements continuels le long et parfois sur des fours de 10 m de long. Quatre à cinq fois par heure, le boulanger doit réapprovisionner son four en pâte (boules de pâte de 10 à 20 kg). La contrainte thermique reste modérée elle est surtout composée par une exposition à une température de rayonnement élevée.

b) Lamineur. L'obtention de profilé en fonte impose un passage dans des filières de laminage plus ou moins nombreuses. Le lamineur attrape avec une pince le profilé en fonte à sa sortie du tambour et l'introduit dans un autre tambour. Le travail physique à ce poste est dur, de ce fait, chaque période de travail de 30 minutes est suivie d'une période de repos de 30 minutes. Le principal facteur de contrainte thermique est la température de rayonnement.

c) Expérimentation en cellule chaude. Il s'agit d'une situation expérimentale. L'activité physique dans l'enceinte chaude consiste à déplacer sur une tablette une petite caisse avec une poignée à la fréquence de 15 fois par minute. Les sujets restent debout dans la cellule chaude pendant 4 séances de 30 minutes chacune. Entre chaque séquence, ils restent au repos assis devant la cellule chaude dans une ambiance de neutralité. Cette situation comporte une contrainte radiante très forte.

d) Trempeur. Certains matériaux très durs sont obtenus par des méthodes de trempage. Le trempeur sort la pièce à tremper d'un four à l'aide d'un crochet puis il la positionne dans un cadre où elle est noyée dans un bain d'huile en même temps que sa forme est contrôlée. Cette activité alterne avec celle d'approvisionnement du four qui implique une charge physique élevée. La contrainte thermique est principalement radiante et localisée essentiellement à la partie supérieure du corps.

e) Machiniste en verrerie. La fabrication de bouteilles de verre est réalisée sur une machine en ligne à trois moules. Le verre en fusion, en provenance du four, arrive sur le haut de la machine où il est automatiquement sectionné en gouttes de verre dont chacune remplit un moule. L'injection d'air sous pression colle le verre à la paroi du moule qui après un

mouvement de retournement s'ouvre et dépose la bouteille sur un tapis transporteur qui la transporte jusqu'à l'aire de conditionnement. Le machiniste doit surveiller le bon déroulement des opérations, il doit être prêt à tout moment à intervenir car tout incident non récupéré en quelques secondes aboutit à un amoncellement de verre fondu. Les incidents, dont la fréquence est très variable ont pour conséquence une augmentation importante et en général brève de l'activité physique. L'exposition à des températures de rayonnement élevées est la composante principale de la contrainte.

f) Tappeur tunnel en fonderie. Ce poste de travail se trouve en fin de chaîne de démoulage de pièces de fonte fabriquées par coulée dans des moules en sable. Les pièces une fois sorties du châssis qui contient le moule sont vibrées mécaniquement pour évacuer les noyaux (éléments en sable qui permettent de réaliser des évidements dans la pièce) et le sable qui adhère. Le tappeur de tunnel doit surveiller l'état des pièces et au besoin donner des coups de masse dans la pièce qui passe devant lui suspendue à un rail. La dépense énergétique est en général importante. La principale contrainte thermique à ce poste est la température de rayonnement élevée.

g) Soudeur. Ce travail est situé à l'intérieur d'un générateur de vapeur de centrale nucléaire, le soudeur réalise les finitions de soudure au niveau des raccords. Le soudeur est confiné dans un espace très réduit dont les parois sont chauffées de l'extérieur à une température de 180°C mais du fait de la ventilation importante dans l'enceinte de travail, la température des parois intérieures est de 50 à 55°C. Le soudeur est assis en tailleur sur un petit support qui l'isole de la paroi et il soude devant lui en adoptant une position très penchée en avant. La durée du travail dans le générateur est laissée à l'appréciation du soudeur, elle est en général de 15 à 30 minutes. Pendant le temps de récupération, le salarié se repose dans l'atelier où règnent des conditions de neutralité thermique. Pendant le travail, il est exposé à des tr, ta et Va élevées.

3.1.5 Salariés exposés à la chaleur avec isolement vestimentaire élevé.

Cinq situations de travail peuvent être définies en fonction du travail réalisé et du type d'isolement vestimentaire utilisé.

- 1) déflocage d'un local technique par grattage. Dans ce chantier, les contraintes posturales sont importantes pour atteindre les zones à nettoyer. L'activité musculaire principale concerne les membres supérieurs.

- 2) déflocage simple d'un plafond par humidification et grattage du flocage. Il s'agit d'un travail en posture debout avec les bras au-dessus de la tête.

- 3) décalorifugeage de conduites de vapeur d'eau d'un réseau de chauffage urbain. Cette situation comporte une contrainte thermique importante, car l'amiante à enlever enveloppe des conduites de vapeur d'eau en fonctionnement pendant l'opération de retrait. Le poste de travail est situé dans une galerie souterraine où le salarié accède à l'aide d'une échelle verticale de 6 mètres de hauteur.

- 4) opération de maintenance de vannes sur un réseau de chauffage urbain. Dans cette situation les salariés ne sont pas directement exposés à l'amiante mais ils portent un vêtement de protection étanche. La dépense énergétique est modérée.

- 5) opération de déflocage simple par grattage dans un local. Dans cette situation, les salariés ont réalisé le même type de travail à deux reprises, une fois avec une combinaison de type Tyvek et une autre fois avec une combinaison de type Mururoa.

Les équipements de protection utilisés sont une combinaison étanche avec des surbottes, des gants et un masque entier à ventilation assistée munie d'un filtre P3, les salariés sont vêtus d'un slip sous la combinaison (situation 1) ou de sous vêtements en coton

dans les autres situations. La combinaison étanche est de type Tyvek dans les situations 1, 2, 3, 4 et une partie de la situation 5, ce qui correspond à un isolement vestimentaire de 1,4 clo, elle est de type Mururoa pour l'autre partie de la situation 5 dans ce cas l'isolement est estimé à 0,4 clo. Dans la situation 4 le masque à ventilation assistée est remplacé par une cagoule à ventilation assistée munie d'un filtre P3. Tous les salariés sont habitués au port des équipements de protection et leur ancienneté dans la profession est toujours supérieure à 4 mois.

3.2 Variables mesurées

Les données suivantes ont été recueillies : les caractéristiques anthropométriques du sujet, sa consommation de tabac, la consommation maximale d'O₂ par minute (VO₂max), la fréquence cardiaque, la température buccale, la dépense énergétique, les facteurs de l'ambiance thermique et les caractéristiques du poste de travail.

3.2.1 Caractéristiques du sujet

L'âge, le poids et la taille des sujets ont été recueillis par questionnaire. Le poids a été contrôlé par pesée des salariés. L'indice de masse corporelle (IMC en kg.m⁻²) ou indice de Quetelet a été calculé selon la relation :

$$IMC = P.T^{-2} \quad \text{où} \quad P \text{ est le poids en kg et } T \text{ la taille en m.}$$

La surface corporelle (AD) a été calculée selon la formule de Hardy et Dubois (1935) :

$$AD = 0,202 * P^{0,425} * T^{0,725} \quad P \text{ et } T \text{ sont définis ci dessus.}$$

Les sujets ont été répartis en trois classes selon le nombre de cigarettes fumées par jour comme suit : classe 1 : non-fumeurs, classe 2 : fumeurs de 1 à 15 cigarettes par jour, classe 3 : fumeurs de plus de 15 cigarettes par jour. L'acclimatement à la chaleur des sujets a été vérifié par leur ancienneté au poste. Ils étaient considérés acclimatés s'ils avaient travaillé régulièrement au cours des deux semaines qui précédaient les mesures (Pandolf 1998). Les capacités cardio-respiratoires maximales des sujets ont été déterminées soit à l'aide d'une bicyclette ergométrique soit à l'aide du step-test, épreuve d'effort sous maximale validée (Meyer et Flenghi 1995). La relation entre la fréquence cardiaque (Fc) et la consommation d'oxygène (VO₂) permet de déterminer les capacités physiques maximales d'un sujet. VO₂max est déterminée par extrapolation de la relation $Fc = f(VO_2)$ à la valeur maximale théorique de Fc soit 220 - âge (en années) du sujet.

3.2.2 Grandeurs physiologiques

a) Fréquence cardiaque

La fréquence cardiaque (Fc) est mesurée dans l'expérience A l'aide d'une télémétrie par comptage électronique des ondes R d'un ECG (Hellige Servomed). Dans les expériences B et C la Fc a été mesurée en continu au moyen d'un cardiofréquencemètre (Polar PE 4000 ou Polar Vantage NV). La période de comptage était de 15 secondes. Pour éviter la détérioration de l'appareil notamment dans la sécherie et lors des douches pour les salariés exposés à l'amiante, la montre a été enrobée d'une mousse humidifiée et placée dans un sachet en plastique.

Les Fc sont exprimées en battements par minute (bpm). Pour chaque exposition à la chaleur, les paramètres suivants de Fc ont été recueillis ou calculés :

- la Fc de repos (Fc₀) correspond à la Fc moyenne mesurée pendant 5 minutes en position assise avant l'exposition.
- la Fc de repos après l'exposition (Fc_R) est calculée sur la période située entre les minutes 3 et 5 de récupération après la fin du travail, en position assise et en ambiance neutre.

- la Fc de travail (F_{c_w}) est la Fc moyenne observée pendant la période de travail et d'exposition à la chaleur.
- le coût cardiaque absolu (CCA) est la différence entre la Fc moyenne de travail et la Fc de repos avant l'exposition.
- les extrapulsations cardiaques thermiques (EPCT), c'est-à-dire la variation de la Fc de repos entre le début et la fin de l'exposition, sont calculées selon la méthode proposée par Vogt et Metz (1981) : $EPCT = F_{c_R} - F_{c_0}$

b) Température buccale

La température buccale (tbu en °C) a été mesurée à l'aide d'une thermistance (Craftemp^R) positionnée sous la langue et maintenue bouche fermée pendant 6 minutes au minimum. Cette mesure a été réalisée pendant les phases de repos avant et après l'exposition, sujet au repos assis. La précision des capteurs est donnée à 0,1°C (fabricant). La variation de température buccale (dtbu) entre le début et la fin de l'exposition a été calculée.

3.2.3 Dépense énergétique

Pour les salariés de la première étude (expérience A), la dépense énergétique de travail (M) a été déterminée à partir de la mesure du VO_2 . Cette mesure a été effectuée au moyen d'un appareil portable (OxyconP., Mijnhardt), la précision de la mesure est de 2% et le temps de réponse de l'appareil est inférieur à 20 secondes. La durée des mesures était variable et fonction de l'activité des sujets, elle s'échelonnait de 8 à 20 min par séquence. Le calcul du métabolisme énergétique sur la période de travail était réalisé grâce à la relation $VO_2 = f(Fc)$ établie à partir des résultats de VO_2 et fréquence cardiaque (Fc) obtenues au cours des séquences de mesure de travail (Nielsen et Meyer 1987). A partir des couples de valeur ($VO_2 - Fc$) on obtient une relation linéaire qui permet à partir de la fréquence cardiaque moyenne de travail d'obtenir la VO_2 pour cette période de travail. La consommation d'oxygène est transformée en dépense énergétique en utilisant un équivalent énergétique de 340 W par litre d' O_2 consommé (Monod et Pottier 1981).

Au poste de mineur, au cours du travail au fond (- 850 m), le volume ventilé (V_e) a été mesuré avec un respiromètre de Muller. Pour chaque mineur la VO_2 est déterminée au poste de travail à partir de la relation $VO_2 = f(V_e)$ établie préalablement au jour sur bicyclette ergométrique.

Dans la situation expérimentale en chambre chaude, la méthode des sacs de Douglas a été utilisée pour recueillir l'air expiré dont le volume était mesuré dans une cuve de Tissot. Les concentrations de CO_2 (Beckmann LB2) et d' O_2 (Beckmann OM11) dans l'air expiré sont mesurées dans un deuxième temps.

Pour le groupe des salariés de la papeterie (expérience B), le métabolisme a été déterminé à partir de l'enregistrement de la fréquence cardiaque. La connaissance de la fréquence cardiaque aux différents paliers standardisés du step-test permet pour chaque sujet de déterminer par régression des équations qui permettent de calculer le métabolisme énergétique à partir de la fréquence de travail (Meyer et Flenghi 1995).

Pour les salariés travaillant en combinaison étanche (expérience C), la dépense énergétique de travail (M) a été estimée par observation et évaluée en Met selon les propositions de Ainsworth et al.(1993). Les métabolismes estimés ont ensuite été exprimés en watt (1 Met = 90 W pour une personne de 70 kg, 1 met = 3,5 ml. kg⁻¹. min⁻¹). L'activité des salariés a été observée en continu dans les situations 1, 2, 4 et 5, pour des raisons pratiques, ceci n'a pas été possible dans la situation 3, les salariés ont alors décrit leur activité à la fin de l'intervention.

Toutes les dépenses énergétiques ont été exprimées en watt et en watt par mètre carré (watt.m⁻²) afin de rapporter les résultats à la surface corporelle (AFNOR 1985).

3.2.4 Métrologie des ambiances thermiques

Dans l'expérience A, une cartographie thermique a été réalisée à chaque poste de travail. Dans chaque zones homogènes, cinq grandeurs physiques ont été mesurées : la température du globe noir (tg), la température de l'air (ta), la température humide de l'air (th), la vitesse de l'air (Va), la température humide naturelle (thn). Les globes noirs étaient mis en place au moins 30 minutes avant la mesure pour obtenir une température stabilisée. La ta et la th étaient mesurées par un psychromètre, la thn par une sonde YSI, la Va par un anémomètre à fil chaud ou un anémomètre à ailettes.

Dans les expériences B et C, la température de l'air (ta) et la température humide (th) ont été recueillies dans la zone de travail des salariés au moyen d'un psychromètre. La pression partielle de vapeur d'eau (Pa) a été calculée à partir de ces valeurs par l'intermédiaire du diagramme psychrométrique et par l'utilisation du logiciel de Malchaire et Piette (1995). La vitesse de l'air (Va) a été estimée compte tenu des conditions ambiantes. Dans l'expérience B des mesures des ambiances thermiques (ta, Va, tg, tr) avaient été réalisées antérieurement par le Centre Interrégional de Mesures Physiques de l'Est .

3.2.5 Organisation du poste de travail

L'horaire et la durée du travail à la chaleur ont été notés. L'isolement vestimentaire exprimé en clo est pris en compte dans chaque étude. Pour les vêtements de travail classiques, l'isolement est déterminé à partir des tables de la norme ISO 9920. En ce qui concerne les combinaisons étanches, l'isolement est basé sur des données des fabricants.

3.2 6 Indices mesurés

Chez les 60 salariés de la première étude (expérience A), un indice de contrainte, le WBGT (ISO 7243) et un indice d'astreinte, la sudation requise (ISO 7933), ont été calculés selon les recommandations des normes (Meyer et al. 1997). Pour les autres postes, les mesures nécessaires au calcul de ces indices n'ont pas été réalisées.

3.3 Traitement des données

Les paramètres classiques tels que les moyennes, les écarts types et les quartiles ont été calculés pour les grandeurs physiques des ambiances thermiques. Les moyennes des fréquences cardiaques avant et après exposition à la chaleur ont été calculées. Pour les expériences A et B, les données de fréquence cardiaque ont été traitées à l'aide du logiciel CARDLOG.

Des corrélations simples et multiples entre les variables ont été déterminées selon la méthode des moindres carrés de PEARSON. Des régressions simples et multiples pas à pas ont permis de déterminer les relations entre la variation de fréquence cardiaque, la variation de température buccale et les différents paramètres d'influence. Le logiciel STATGRAPHICS pour micro ordinateur a été utilisé pour le traitement des données.

4. Résultats

Dans ce chapitre sont présentés successivement les caractéristiques anthropométriques des sujets, leurs capacités fonctionnelles puis les caractéristiques des contraintes thermiques étudiées, les astreintes physiologiques mesurées et enfin les relations entre ces variables.

4.1 Sujets.

La population étudiée se compose de 98 hommes, en bonne santé, qui ont été volontaires pour participer à l'étude. L'âge et les principales caractéristiques

anthropométriques des sujets sont présentés dans le tableau 10. Les extrêmes illustrent la grande variabilité interindividuelle rencontrée.

	moyenne	écart-type	extrêmes	quartile
âge (année)	32,8	8,1	19 - 52	27 - 38
poids (kg)	72,6	10,3	53 - 103	64 - 79
taille (m)	1,74	0,07	1,56 - 1,91	1,7 - 1,8
IMC (kg.m ⁻²)	23,9	3,1	17,7 - 31,4	21,6 - 26,2
AD (m ²)	1,86	0,15	1,53 - 2,22	1,75 - 1,96

Tableau 10 : Age et caractéristiques anthropométriques des sujets. Valeurs moyennes, écart-type, valeurs extrêmes et valeurs des quartiles supérieurs et inférieurs des distribution de l'âge, du poids, de la taille, de l'indice de masse corporelle (IMC) et de la surface corporelle (AD).

Les différents paramètres fonctionnels recueillis chez les salariés sont la consommation maximale d'oxygène (VO₂max) et la fréquence cardiaque de repos en posture assise pendant au moins 5 minutes. Le tableau 11 présente les différents paramètres statistiques de la distribution des VO₂max mesurées.

	moyenne	écart type	extrêmes	quartile
VO ₂ max (ml. kg ⁻¹ .min ⁻¹)	41,8	10,0	21,7 - 70,7	34,4 - 45,9

Tableau 11 : Consommation maximale d'oxygène (VO₂max). Résultats moyens de 88 salariés.

La mesure de la VO₂max a été réalisée chez 88 sujets. Pour des raisons techniques et notamment pour des raisons d'horaire de travail, le step-test n'a pas été réalisé chez 10 sujets. La VO₂max moyenne est de 41,8 ml.kg⁻¹.min⁻¹. Pour l'âge de la population étudiée, il s'agit d'une valeur qui traduit des capacités légèrement supérieures à la moyenne (Meyer et Flenghi 1995).

La moyenne des Fc de repos (Fc₀) est de 77,5 battements par minute (bpm) avec un écart type de 12,4 bpm, les valeurs extrêmes sont respectivement de 51 et 105 bpm pour les limites inférieure et supérieure. Les relations entre les caractéristiques individuelles et les capacités fonctionnelles ont été recherchées pour ce qui concerne la VO₂max et le tabac.

La VO₂max est liée à l'âge des salariés, à leur corpulence, à la Fc₀ et aux habitudes tabagiques. Ces différentes relations sont détaillées ci-dessous :

- La VO₂max diminue avec l'âge ;

$$\text{VO}_2\text{max} = 58,78 - 0,52 \text{ âge} \quad (\text{équation 1})$$

$r = -0,45; \quad n=88; \quad p < 0,0001; \quad se = 8,7$

- L'âge, l'IMC et le tabac sont liés à la VO₂max ;

$$\text{VO}_2\text{max} = 84,8 - 0,45 \text{ âge} - 1,15 \text{ IMC} - 2,6 \text{ tabac} \quad (\text{équation 2})$$

$r^2 = 0,28; \quad n=88; \quad p < 0,02; \quad se = 8,4$

- L'âge, l'IMC et la Fc₀ sont liés à la VO₂max ;

$$\text{VO}_2\text{max} = 104,5 - 0,43 \text{ âge} - 1,02 \text{ IMC} - 0,31 \text{ Fc}_0 \quad (\text{équation 3})$$

$r^2 = 0,39; \quad n=88; \quad p < 0,001; \quad se = 7,8$

Lorsque Fc₀ est introduite dans le modèle de l'équation 2 (équation 3) le lien entre la consommation de tabac et la VO₂max n'est plus significatif du fait de l'influence du tabac sur

F_{c0} ($F_{2,92} = 13,4$; $p = 0,0001$). Le tableau 12 présente la F_{c0} moyenne des 3 classes de salariés en fonction de leur consommation de tabac. Les résultats du tableau 12 montrent une augmentation supérieure à 10 bpm de la fréquence cardiaque de repos chez le fumeur de plus de 15 cigarettes par jour par rapport au non-fumeur. Les salariés qui fument ont un IMC significativement supérieur à ceux qui ne fument pas ($F_{2,92}=4,7$; $p = 0,01$).

Classe	n	F_{c0} (bpm)
non-fumeur	50	72,0
moins de 15 cig/J.	21	81,2
plus de 15 cig/J.	27	84,9

Tableau 12 : Influence du tabac sur la fréquence cardiaque de repos (F_{c0}). Pour chaque classe est indiqué le nombre de salariés (n) et la valeur moyenne de F_{c0} .

Les résultats de cette étude montrent que la relation entre la VO_{2max} et la consommation de tabac ne devient significative que lorsque la VO_{2max} est corrigée des effets de l'âge et de l'IMC (équation 2).

4.2 Contraintes thermiques

Sont considérés dans ce travail comme composantes de la contrainte thermique, les paramètres physiques de l'ambiance, l'isolement vestimentaire et la dépense énergétique.

4.2.1 Paramètres physiques de l'ambiance thermique

Une grande variété d'ambiances thermiques a été étudiée lors de cette étude. Les valeurs moyennes, les écarts-type et les valeurs extrêmes de la température de l'air (t_a) de la température humide (t_h) de la pression de vapeur d'eau (Pa) et de la vitesse de l'air (V_a) sont présentées dans le tableau 13.

	t_a (°C)	t_h (°C)	Pa (kPa)	V_a (m. s ⁻¹)
moyenne	30,7	21,1	2,34	0,64
écart type	9,8	8,5	2,93	0,39
extrêmes	18 - 67	11,5 - 56	0,69 - 16,0	0,13 - 1,5

Tableau 13 : Paramètres physiques de la contrainte thermique. Valeurs moyennes, écarts-type et valeurs extrêmes de la t_a , de la t_h , de la Pa et de la vitesse de l'air.

4.2.2 Isolement vestimentaire

L'isolement vestimentaire moyen est de 0,82 clo avec un écart type de 0,46. La valeur inférieure de 0,1 clo correspond à un sujet en short, la valeur supérieure de 1,4 clo est retrouvée lors de travaux où les salariés portent des vêtements de protection étanches.

4.2.3 Dépense énergétique

La valeur moyenne du métabolisme (M) est de 293 W (156 W.m⁻²) avec un écart-type de 144 W (73,1 W.m⁻²) et des extrêmes de 109 W (60 W.m⁻²) et 1076 W (558 W.m⁻²). Les valeurs indiquées dans la norme ISO 8996 permettent de définir 4 classes de métabolisme :

- métabolisme faible : inférieur à 180 W
- métabolisme modéré : de 180 à 295 W
- métabolisme élevé : de 295 à 415 W
- métabolisme très élevé : supérieur à 415 W

Le tableau 14 présente le nombre de situation de travail dans chaque classe de métabolisme, la valeur moyenne de M en watts, son écart-type et ses valeurs extrêmes.

	nombre	M (moy)	écart type	extrêmes
métabolisme faible	20	157	17	109 - 178
métabolisme modéré	57	232	34	182 - 292
métabolisme élevé	43	342	20	299 - 387
métabolisme très élevé	12	651	189	424 - 1076

Tableau 14 : Métabolisme M, moyennes, écarts type et extrêmes pour les 4 classes de M.

L'histogramme de la figure 15 présente la distribution de M par classes de 50 W. Ce résultat montre que des métabolismes supérieurs à 350 Watts sont rares en situation réelle de travail.

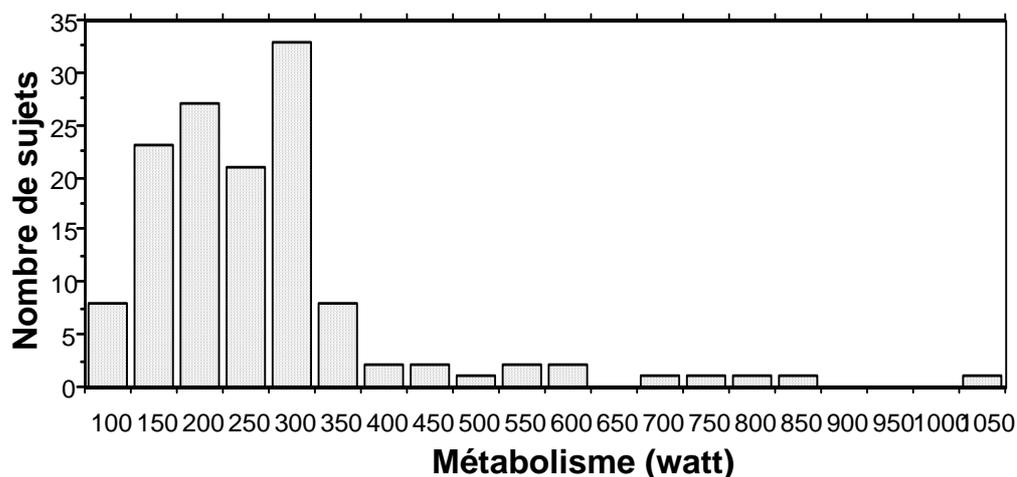


Figure 15 : Distribution du métabolisme (M en watt). Histogramme du nombre de situations de travail par classe de M de 50 W.

4.3 Astreintes thermiques

Les résultats des astreintes cardiaques, thermostatiques et sudorales sont successivement rapportés, le métabolisme M a été décrit précédemment dans les contraintes.

4.3.1 Astreinte cardiaque

Les résultats de Fc sont présentés dans le tableau 15, ils sont accompagnés des valeurs du coût cardiaque absolu et des extrapulsations cardiaques thermiques.

	Fc repos	Fc _w	CCA	EPCT
moyenne	77,5	110	32,78	9,5
écart type	12,4	20,6	17,01	9,3
limites	51 - 105	69 - 165	8 - 99	-8 à 36

Tableau 15 : Astreintes cardiaques : moyennes, écarts type et extrêmes (en bpm) de la Fc de repos (Fc₀), de travail (Fc_w), du coût cardiaque absolu (CCA) et des extra pulsations cardiaques thermiques (EPCT).

La Fc moyenne de 110 bpm correspond à un travail musculaire modéré d'après la classification de Frimat et Chamoux (1989). La Fc de 160 bpm qui est communément admise comme la fréquence de crête à ne pas dépasser, compte tenu de l'âge des salariés, a été atteinte 3 fois (Minnesota Code, 1967). La valeur moyenne du coût cardiaque absolu est de 32,8 bpm.

Ce CCA correspond à un travail plutôt lourd selon la grille d'évaluation de la pénibilité des postes de travail de Frimat et Chamoux (1989). La moyenne des EPCT est

nettement inférieure aux limites couramment admises (Vogt et Metz 1981). Toutefois, 4 sujets dépassent la limite de 30 bpm.

4.3.2 Astreinte thermostatique

La variation de température buccale entre le début et la fin de l'exposition (dtbu) est en moyenne de 0,32 °C avec un écart type de 0,33. La valeur moyenne des astreintes thermiques n'est donc pas excessive. La valeur la plus basse est de - 0,5 °C, soit une diminution de la température buccale mesurée. La variation la plus élevée est de 1,4°C. Une dtbu supérieure à la limite de 1°C (norme ISO 7933) a été mesurée dans 8 cas.

4.3.3 Astreinte sudorale

La sudation requise a été calculée dans 60 cas (expérience A). La Sudreq moyenne est de 298 g.h⁻¹ avec un écart type de 140 g.h⁻¹. La valeur inférieure est de 98 g.h⁻¹, et la valeur supérieure de 653 g.h⁻¹. La sudation requise est liée à VO₂max (ml. kg⁻¹.min⁻¹), à ta (°C) et à M (W) selon la relation :

$$\text{Sudreq.} = - 587,94 + 22,94 \text{ ta} + 1,87 \text{ VO}_2\text{max} + 0,55 \text{ M} \quad (\text{équation 4})$$

$$r^2 = 0,79; \quad n=60; \quad p < 0,02; \quad \text{se} = 64$$

$$\text{sudobs} = 0,97 \text{ sudreq} + 9,8 \quad n = 60, r = 0,84, \text{ se} = 11,6 \quad \text{eq 4 bis (meyer et al. 1997)}$$

$$\text{sudreq} = - 694 + 2,3 \text{ mW} + 15,3 \text{ ta} + 6,5 \text{ tr} \quad r^2 = 0,89 \quad \text{se} = 45$$

$$\text{sudreq} = - 454 + 16,8 \text{ ta} + 4,2 \text{ tr} + 50,8 \text{ pa} \quad r^2 = 0,76 \quad \text{se} = <55$$

$$\text{sudreq} = - 747 + 341 \text{ M} + 15,4 \text{ ta} + 6,9 \text{ tr} + 38,4 \text{ pa} \quad r^2 = 0,89 \quad \text{se} = 45$$

4.4 Relations entre les variables mesurées

a) Relations entre Fc et dépense énergétique

Le CCA de travail n'est pas lié à la VO₂max des salariés. La dépense énergétique (M) et le coût cardiaque absolu (CCA) sont liés par les relations suivantes selon que M est exprimé en watt (équation 5) ou en watt par mètre carré de surface corporelle (W.m⁻², équation 6):

$$\text{CCA} = 10,9 + 0,075 \text{ M} \quad (\text{équation 5})$$

$$r = 0,63; n=131; \quad p < 0,0001; \quad \text{se} = 13,2$$

$$\text{CCA} = 10,5 + 0,15 \text{ M} \quad (\text{équation 6})$$

$$r = 0,61; n=131; \quad p < 0,0001; \quad \text{se} = 13,4$$

La ta et la durée d'exposition sont liées au coût cardiaque absolu (CCA) :

$$\text{CCA} = 17,4 + 0,32 \text{ ta} - 0,062 \text{ durée} + 0,050 \text{ M} \quad \text{M en W} \quad (\text{équation 7})$$

$$r^2 = 0,54; \quad n=131; \quad p < 0,007; \quad \text{se} = 11,6$$

b) Relations entre les variations de température buccale et de Fc

La relation liant la variation de température buccale et les EPCT est essentielle, d'autres paramètres seront ensuite pris en compte pour contrôler leur poids dans cette relation. La variation entre le début et la fin de l'exposition de la température buccale mesurée au repos (dtbu) et la variation parallèle de Fc de repos (EPCT) sont liées par les relations suivantes :

$$\text{dtbu} = 0,03 \text{ EPCT} \quad (\text{équation 8})$$

$$r^2 = 0,70; \quad n=131; \quad p < 0,0001; \quad \text{se} = 0,18$$

$$\text{dtbu est en } ^\circ\text{C et EPCT en bpm}$$

Cette relation a été calculée à partir de l'ensemble des résultats (n=131). Certains sujets ont été exposés plusieurs fois et leur poids relatif dans la régression est plus important

que celui des sujets qui n'ont été exposés qu'une fois. Afin de contrôler cet effet, la relation $dtbu = f(EPCT)$ a été recalculée en ne prenant en compte qu'une exposition par sujet. Dans ce cas, la relation est identique à la précédente.

La relation liant les EPCT et la dtbu permet de définir une limite de sécurité d'EPCT pour laquelle 95 % des sujets ne dépassent pas une dtbu de 1°C. Cette limite de confiance unilatérale à 95 % d'EPCT (21bpm) correspond à une dtbu de 0,67 °C. Si les EPCT sont inférieurs à 20bpm, la dtbu sera inférieure à 1°C.

Des facteurs de correction peuvent être utilisés pour affiner et améliorer cette équation de prédiction de l'astreinte thermostatique. Ces modèles sont de peu d'intérêt pratique mais les interprétations physiologiques qu'ils autorisent montrent la robustesse de l'équation de prédiction de dtbu. Ces explications sont présentées en discussion.

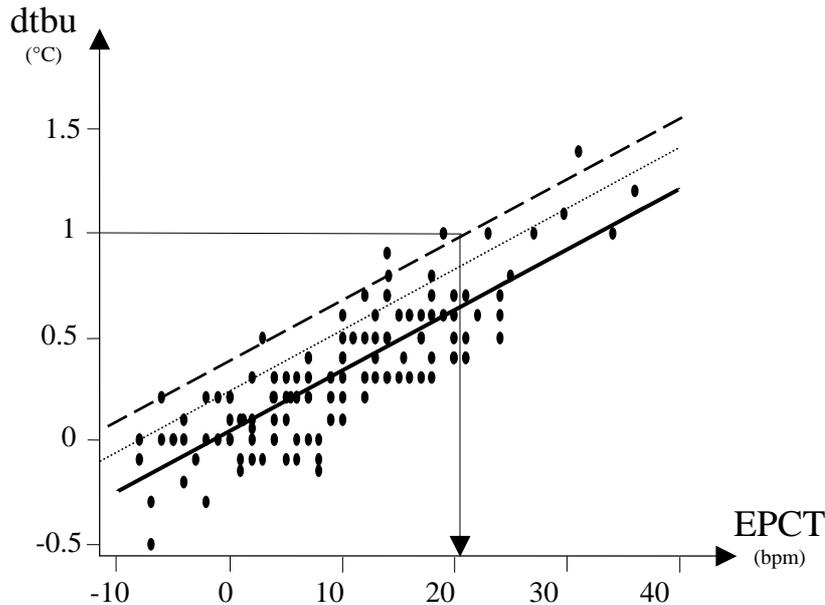


Figure 16 : Relation entre dtbu et EPCT. Représentation schématisée du calcul de la limite de sécurité de 20 bpm d'EPCT (131 expositions chez 98 salariés).

Les modèles affinés (équations 9 à 11) de cette relation sont, en introduisant successivement la VO_2max , le métabolisme M et l'isolement vestimentaire, de la forme :

- pour la VO_2max ($ml.kg^{-1}.min^{-1}$) des salariés

$$dtbu = - 0,19 + 0,029 EPCT + 0,0056 VO_2max \quad (\text{équation 9})$$

$$r^2 = 0,71; \quad n=111; \quad p < 0,01; \quad se = 0,17$$

pour une même variation de Fc, plus la VO_2max est élevée plus la variation de température buccale est importante.

- Le métabolisme (M en watt)

$$dtbu = - 0,27 + 0,028 EPCT + 0,005 VO_2max + 0,0003 M \quad (\text{équation 10})$$

$$r^2 = 0,73; \quad n=111; \quad p < 0,02; \quad se = 0,16$$

pour une même variation de Fc et pour deux sujets à même VO_2max , plus le métabolisme de travail est élevé, plus la variation de dtbu est importante.

- l'isolement vestimentaire (clo, M est en $W.m^{-2}$).

$$dtbu = - 0,36 + 0,026 EPCT + 0,006 VO_2max + 0,008 M + 0,1 clo$$

$$r^2 = 0,74; \quad n=111; \quad p < 0,02; \quad se = 0,16 \quad (\text{équation 11})$$

Plus l'isolement vestimentaire (clo) est important plus la variation de Fc sous estime la variation de dtbu.

Bien que ces facteurs de correction de la relation $dtbu = f(EPCT)$ soient significatifs ($p < 0,02$) la prévision de la relation n'est pas améliorée de façon sensible, l'erreur standard de l'équation 11 est de 0,16 alors qu'elle est de 0,18 dans l'équation 8.

5. Discussion

Au cours de la discussion quatre points seront abordés successivement, à savoir a) les problèmes techniques rencontrés lors des études en milieu de travail, b) les difficultés à définir un indice simple reflétant l'exposition à la chaleur, c) la pertinence de l'équation liant la variation de tbu et la variation de Fc et d) l'intérêt et les limites de l'utilisation de la Fc comme indice d'astreinte thermique.

5.1 Problèmes techniques et méthodes de recueil

L'évaluation d'une situation de travail à la chaleur comporte d'une part, l'évaluation de la contrainte thermique et, d'autre part, l'analyse de l'activité du salarié dans cette contrainte. Ainsi, vont se cumuler des problèmes de métrologie physique liés au recueil des paramètres de la contrainte thermique et des problèmes physiologiques propres aux mesures sur l'homme dans son environnement de travail.

- Recueil des données physiques

La mesure des paramètres physiques d'une ambiance thermique en milieu de travail s'avère difficile car ces paramètres sont nombreux, ils varient dans le temps et dans l'espace de travail du salarié et doivent, pour représenter la contrainte, être recueillis à l'endroit où le salarié travaille. Le schéma de la figure 17 présente une synthèse des facteurs qui agissent sur l'astreinte thermique d'un salarié exposé à la chaleur.

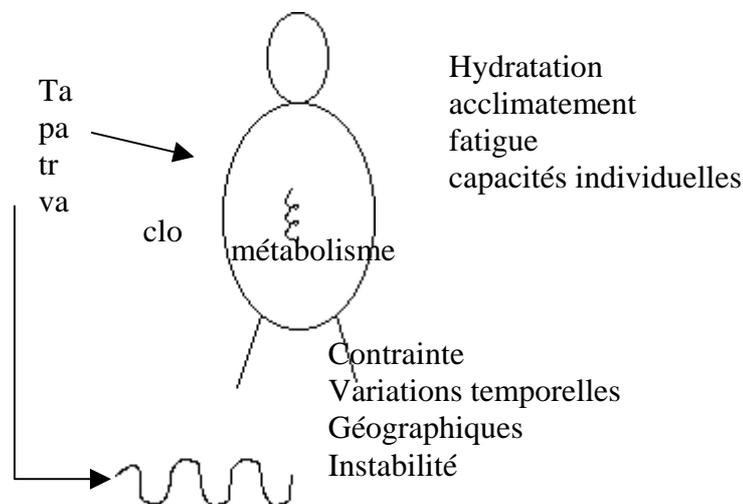


Figure 17 : Paramètres d'influence sur l'astreinte thermique d'un salarié. Sont représentés les grandeurs physiques, leur variabilité et les paramètres individuels qui modulent l'astreinte thermique. Le clo est l'unité d'isolement vestimentaire.

La première difficulté de recueil des paramètres physiques est d'effectuer les mesures à l'endroit précis où travaille le salarié. Afin de ne pas gêner celui-ci, cette exigence est satisfaite en réalisant les mesures à plusieurs points de l'espace de travail. Selon l'activité du salarié, ces points de mesure seront déplacés afin de couvrir l'ensemble de la zone de travail. Afin de répondre aux exigences des normes relatives au recueil des grandeurs physiques, les mesures doivent être réalisées à trois hauteurs qui dépendent de la posture du salarié. Ainsi, les 3 hauteurs et les nombreux points de mesure nécessitent un grand nombre de capteurs d'autant plus que les mesures des différentes grandeurs

physiques doivent être simultanées. Les résultats de ces mesures permettent de déterminer des zones dans lesquelles les différents paramètres physiques sont stables. La division de l'espace de travail en ces différentes zones permet de bâtir une cartographie thermique de l'espace de travail. Celle-ci devra être répétée dans le temps lorsque la contrainte évolue au cours du poste (Meyer et al. 1997).

Afin de permettre un calcul précis de la contrainte physique, il est nécessaire d'observer de façon détaillée les déplacements du salarié. Cette observation permet de connaître à tout moment la situation du salarié dans les différentes zones de la carte thermique de l'espace de travail. Ces relevés sont très contraignants pour les préventeurs lorsque le sujet se déplace dans un espace où la cartographie thermique a définie plusieurs zones (Meyer et al. 1997).

Des appareils de mesure des paramètres physiques et de calcul des indices WBGT et SudReq sont proposés dans le commerce. Cependant, ces appareils sont chers et ne dispensent pas du recueil aux différents points de mesure afin de construire une cartographie thermique de la zone de travail. Ces appareils sont intéressants à utiliser lorsque l'ambiance thermique est homogène, c'est-à-dire lorsque la cartographie se résume à une seule zone.

Les 4 paramètres de base de la contrainte thermique ne présentent pas les mêmes difficultés de mesure. En effet, la t_a et la t_h sont facilement mesurées à l'aide d'un psychromètre dont la précision de mesure peut être estimée à 1°C. La pression partielle de vapeur d'eau dans l'ambiance est calculée à partir de ces deux grandeurs.

La vitesse de l'air (V_a) est obtenue à l'aide d'anémomètres unidirectionnels (ailettes) ou omnidirectionnels (fil chaud). Cette mesure est souvent délicate car la direction du flux aérien est difficile à déterminer en situation de travail où le flux n'est jamais laminaire. Elle est souvent imprécise du fait de la variabilité de la v_a . En conséquence, la v_a est exprimée par sa valeur moyenne calculée sur des mesures relevées pendant plusieurs minutes.

La t_r est le paramètre le plus délicat à recueillir. En effet, sa mesure nécessite l'utilisation d'un globe noir dont le résultat, la température de globe (t_g), ne peut-être lu qu'après un temps de stabilisation de 30 minutes. La t_r est calculée à partir de la t_g , de la t_a et de la v_a . Ce calcul est simple à l'aide d'un ordinateur, mais le résultat comporte les imprécisions relatives aux résultats des 3 grandeurs de base.

En résumé, les mesures des paramètres physiques de l'ambiance thermique et la quantification de l'exposition réelle du salarié demande un appareillage lourd pour obtenir des résultats précis et une observation continue du salarié. Il s'agit d'une charge de travail importante pour les préventeurs qui s'attachent à l'analyse précise de la contrainte thermique physique.

5.1.2 Evaluation du métabolisme et de l'astreinte thermique

Les mesures sur l'homme doivent répondre aux critères de simplicité et d'innocuité. Trois grandeurs doivent être quantifiées : la dépense énergétique et les astreintes sudorale et thermostatique.

La dépense énergétique est quantifiable selon trois méthodes :

- La mesure directe de la consommation d'oxygène qui nécessite un appareillage spécifique, cher et d'utilisation délicate en situation de travail car il est susceptible de modifier les conditions de réalisation de la tâche.
- L'évaluation du métabolisme par observation du travail qui décompose la tâche en activités élémentaires dont le coût énergétique est connu. Dans un deuxième temps, l'addition des coûts élémentaires permet une évaluation acceptable de la dépense énergétique. Cependant, cette méthode, basée sur l'observation, exige une grande expérience de la part de l'observateur (Horwat et al. 1988).

- Enfin, l'estimation de la dépense énergétique à partir de la Fc de travail qui est plus simple. Elle peut être basée sur des équations générales qui lient la Fc à la dépense énergétique (Mairiaux et Malchaire 1990) ou sur une relation individuelle, calculée pour chaque salarié lors d'un étalonnage (Nielsen et Meyer 1987). Le recueil de la Fc au cours du travail permet de calculer un équivalent énergétique de travail. En pratique, la Fc est un critère global de la charge de travail (Frimat et Furon 1986). Des durées de comptage courtes (5 ou 15 s) de la Fc permettent de mettre en évidence des contraintes physiques brèves. Dans ce contexte, la Fc est un indice d'astreinte thermique car elle permet d'orienter les actions de prévention lorsque l'astreinte est induite par un travail physique modéré ou dur.

L'un des points encore discutés pour l'utilisation de la Fc est sa valeur de référence ; fréquence de repos ou fréquence calculée à partir d'un enregistrement de l'ensemble de la période de travail (premier percentile) ou de 24 h (dixième percentile de nuit) (Frimat et al. 1989). Dans l'analyse de l'astreinte thermique, ce problème ne se pose pas. En effet, il est nécessaire de disposer d'un enregistrement au repos juste avant et juste après la période de travail à étudier (Meyer et al. 1996). Dans la présente étude, a été retenue comme Fc de repos la valeur moyenne de Fc des 5 dernières minutes du repos assis de 10 minutes qui précédait l'exposition. Ce repos était pris en ambiance de "confort thermique".

L'astreinte thermostatique est exprimée par la variation des températures corporelles. Plusieurs sites de mesure de ces températures sont possibles. Cependant, la température buccale (tbu) est la plus simple à mesurer en situation de travail. Si des conditions strictes de recueil sont respectées, la tbu est une approximation satisfaisante de la température centrale (Mairiaux et al. 1983). Le capteur doit être placé sous la langue et un temps de repos de 5 min bouche fermée doit être respecté avant le relevé de température. Pour quantifier l'astreinte thermostatique, ce recueil est réalisé avant et après l'exposition à la chaleur (ISO 9886, Mairiaux et al. 1983).

Du fait de sa simplicité, l'utilisation de la température tympanique a été proposée comme indice d'astreinte thermostatique (Beaird et al. 1996). Cependant, sa corrélation avec la température rectale est moins bonne que celle de la tbu. De plus, il s'agit d'une méthode dont la précision n'est pas suffisante pour déterminer des durées limites d'exposition. En effet, les capteurs de température tympanique disponibles dans le commerce ne sont pas assez fiables pour calculer une dérive de température corporelle qui permettrait de déterminer des DLE sûres. En médecine du travail, l'utilisation de la température buccale reste donc la plus indiquée.

L'astreinte sudorale est représentée par les pertes sudorales, qu'il s'agisse de la sueur évaporée ou qui mouille les vêtements ou qui coule au sol. Cette astreinte se quantifie par la perte de poids des salariés obtenue par pesées successives sur une balance de précision. Une précision à 20 grammes est nécessaire. Une balance romaine permet une évaluation tout à fait satisfaisante de la perte sudorale d'un salarié. Cette mesure simple doit respecter quelques conditions. Les pesées doivent être réalisées dans la même tenue vestimentaire tout au long de l'expérience. Des pesées successives à intervalle régulier, toutes les 30 ou 60 minutes, permettent la meilleure quantification de l'astreinte sudorale. Les excréments et ingestats des salariés doivent être contrôlés attentivement et retranchés ou ajoutés à la perte de poids pour calculer une astreinte sudorale précise. Enfin, des aspects pratiques comme la stabilité de la balance sur le sol et les outils que les salariés ont dans leurs poches peuvent fausser les mesures. Il faut donc tenir compte de différents points "de détail" pour assurer une quantification précise de l'astreinte sudorale.

5.2 Difficulté d'utilisation des indices

Les indices d'astreinte et de contrainte thermiques sont très nombreux. Ils sont différents dans leur principes : indices empiriques ou analytiques. Mais les études réalisées

dans le passé ont montré qu'aucun de ces indices n'est assez précis pour répondre aux spécificités de l'indice idéal proposé par Mairiaux et Malchaire (1990). Ne seront analysées ici que les limitations des deux indices les plus utilisés; le WBGT qui est un indice empirique et l'indice analytique le plus élaboré la sudation requise. Ces deux indices sont normalisés.

Le WBGT est un indice de mise en oeuvre assez facile mais peu précis. Pour être fiable, il nécessite le recueil des paramètres de base prenant en compte les variations temporelles et spatiales de la contrainte thermique (cf. 5.1.1). Il peut être employé en première intention pour le dépistage des situations à risque. Cet indice permet seulement d'affirmer qu'une situation ne présente pas de risque thermique excessif lorsque sa valeur est inférieure à 25°C (Meyer et al. 1997).

L'indice de sudation requise est basé sur le calcul du bilan thermique, il permet de prévoir les pertes sudorales et le stockage de chaleur. Un des intérêts de cet indice est de proposer une durée limite d'exposition à partir des pertes sudorales et du stockage de chaleur. Les études de comparaison des validités respectives de différents indices de contraintes thermiques montrent que cet indice permet la meilleure prévision de l'astreinte thermique (Meyer et al. 1997). Cependant, ce modèle ne prend pas en compte les variations inter-individuelles. Son calcul nécessite la mesure de nombreuses grandeurs physiques, ce qui augmente les sources d'erreur. Ainsi, Meyer et al. (1997) ont montré que les DLE estimées par l'indice de sudation requise sont en général supérieures aux DLE déterminées sur des bases physiologiques (mesure de la température buccale ou du débit sudoral). L'indice de sudation requise ne peut prévoir une DLE sûre. Car, l'intervalle de confiance à 95% de la prévision de la sudation requise est de +/- 160 g.h⁻¹. Un tel intervalle de confiance équivaut à un stockage de chaleur qui entraîne une augmentation de la température centrale de 1,6°C en 1 heure pour un sujet de 70 kg. Soit une imprécision de la prévision supérieure à la limite acceptable de 1°C d'augmentation de la température centrale (Meyer et al. 1997).

Ces imprécisions de la prévision peuvent être en partie expliquées par l'isolement réel du vêtement qui est encore insuffisamment connu, notamment dans le cas où le rayonnement est important ou lorsque l'humidité est élevée (Meyer et al. 1997). En conséquence, dans les conditions extrêmes de rayonnement et d'humidité ou lorsque des vêtements de protection spéciaux doivent être portés, les indices s'avèrent trop imprécis et ne sont pas applicables. Il est donc préférable de recourir à des mesures physiologiques pour déterminer l'acceptabilité des conditions de travail (Malchaire 1996).

La prise en compte par l'indice sudation requise de l'ensemble des paramètres qui influencent l'astreinte thermique en fait un modèle complexe. Pour que ce modèle complexe soit exact, le recueil des paramètres de base doit être précis. En effet, plus le nombre de données pris en compte est important plus les erreurs peuvent s'additionner et la précision des indices diminuer. Si le recueil des données est peu précis, les calculs peuvent aboutir à des résultats peu applicables. A titre d'exemple, une étude de Wasterlund et al.(1998) réalisée chez des forestiers a montré qu'une erreur de 10 % sur la détermination de la dépense énergétique entraîne une variation de 176 % de la durée limite d'exposition à la chaleur.

L'un des intérêts indiscutables de l'indice de Sudation Requise est qu'il détaille la contrainte thermique, et permet ainsi de reconnaître les composantes les plus importantes de celle-ci et d'orienter les améliorations les plus urgentes. Une fois les modifications réalisées, il reste un élément comparatif des situations de travail et permet la validation des améliorations apportées au poste de travail.

Les indices PMV et PPD analysent le confort ou l'inconfort thermique. Dans le cas le plus favorable, il persiste toujours 5 % de sujets insatisfaits (PPD) des conditions thermiques. Ce n'est qu'un modèle qui s'applique à des populations, mais tous les individus n'obéissent pas au modèle. Cependant, le PMV-PPD permet d'optimiser une situation de

confort qui sera acceptable par le plus grand nombre. Le confort thermique n'est pas qu'un chiffre. Pour arriver à satisfaire le maximum de personnes, les résultats du modèle doivent être expliqués et des solutions individuelles trouvées.

En conclusion, la détermination des indices d'astreinte et de contrainte thermique est en général complexe et nécessite la compétence de spécialistes. L'utilisation de ces indices est nécessaire dans les cas où la situation de contrainte thermique perdure, la mise en place de moyens lourds est alors justifiée. Actuellement, les expositions variables, irrégulières et brèves sont le plus souvent la règle. Dans ce cas, les indices de contrainte thermique sont inadaptés, d'une part la lourdeur de leur mise en oeuvre est incompatible avec les exigences économiques et d'autre part leur fiabilité est inconstante dans les situations brèves.

Pour qu'une surveillance effective des salariés soient réalisées, la méthode à utiliser doit être simple. Aucun indice précédemment décrit ne répond à ce critère même si les mesures d'entrées de ces indices sont recueillies avec précision.

5.3 Relation dtbu /EPCT

La relation établie sur la base des résultats de la présente étude permet d'évaluer la variation de température centrale à partir du recueil de la Fc de récupération. Ce recueil, qui permet le calcul des EPCT, est simplifié grâce à l'utilisation du cardiofréquence-mètre. Cependant, pour qu'une relation soit utilisable, il faut qu'elle soit validée, précise et que ses limites soient reconnues. En fin de chapitre sera discuté le choix entre la mesure des EPCT ou le calcul de la dérive de la Fc au cours du travail pour quantifier l'astreinte thermostatique. La validité de la relation générale liant la dtbu et les EPCT et en conséquence le fait que son utilisation soit sûre dans toutes les conditions thermiques repose sur deux arguments :

a) La concordance entre la relation proposée et les données de la littérature qui confirme les bases physiologiques du modèle. La relation $dtbu = f(EPCT)$ déterminée au cours de la présente étude de terrain, indique qu'en moyenne 32 bpm d'EPCT sont associés à une augmentation de 1°C de dtbu. Ce résultat est similaire aux quelques valeurs proposées dans la littérature. En laboratoire, Vogt et Metz (1981) retrouve 33 bpm pour une augmentation de 1°C de température centrale. Au cours de séances de sauna, qui se caractérisent par une dépense énergétique faible, l'étude de Jezova et al. (1994) décrit une augmentation de 22,7 bpm par °C de dtbu chez les hommes et 32,7 bpm chez les femmes. L'étude de Kukkonen et al. (1989), également menée dans un sauna, montre une augmentation de 31,2 bpm par degré d'augmentation de température centrale. Hasan et al. (1967), toujours lors d'expositions au sauna, montrent qu'à 1°C d'élévation de température centrale correspond des EPCT de 30,4 bpm. Plus récemment, Boisvert et al. (1993) ont mesuré des EPCT de 32 bpm en condition humide et 36 bpm en condition sèche pour une augmentation de température rectale de 1 °C. Ainsi, les résultats de la présente étude sont en accord avec les données de la littérature bien que les conditions de recueil soient très différentes. En effet, les résultats cités ont tous été calculés à partir de données recueillies en situation de laboratoire, sur un petit nombre de sujets et sur une ou deux contraintes thermiques. La relation $dtbu = f(EPCT)$ de la présente étude a été établie à partir de résultats recueillis sur un grand nombre de salariés en situation réelle de travail. A notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée sur un nombre aussi important de sujets dans des conditions thermiques aussi variées.

Par ailleurs, les résultats de la présente étude confirment, en situation réelle de travail, des particularités des adaptations à la chaleur déjà décrites en situation expérimentale. Les résultats de la présente étude montrent que des facteurs de correction peuvent être proposés pour améliorer le modèle de prédiction de l'astreinte thermostatique à partir des EPCT. Ces facteurs de correction apportent des explications physiologiques concernant les liens entre la Fc et l'astreinte thermostatique. En premier lieu, la capacité

physique des sujets peut être introduite dans le modèle (équation 9) qui montre alors que plus les capacités physiques du sujet, sa $VO_2\text{max}$, sont élevées, plus la variation de température buccale est importante par rapport à la variation de F_c . La dtbu peut donc être sous estimée par le calcul des EPCT. Ce facteur rappelle l'importance des caractéristiques individuelles dans les phénomènes de tolérance à la chaleur et, en particulier, de l'entraînement physique et de l'acclimatement qui diminuent la F_c lors d'expositions à la chaleur (Brouha 1963). La dépense énergétique M (équation 10) a une influence prépondérante sur le stockage de chaleur bien démontré lors d'activités sportives (Noakes et al. 1991). Sa prise en compte améliore le modèle prédictif de la dtbu. Enfin, l'isolement vestimentaire modifie également la relation entre les EPCT et la dtbu ; plus il est important plus la variation de F_c sous estime la dtbu. Cet effet n'a pas d'explication connue actuellement.

Bien que ces facteurs expliquant les variations de température buccale entraînent une sous estimation de la dtbu, ce qui pourrait présenter un risque, leur effet est trop faible pour induire un risque réel. En effet, l'erreur standard de l'évaluation est de $0,2\text{ }^\circ\text{C}$ pour le modèle qui ne prend en compte que les EPCT (équation 8), cette erreur diminue très peu ($0,19\text{ }^\circ\text{C}$) lorsque les trois paramètres cités ci-dessus sont pris en compte (équation 11). De plus, leur évaluation, en particulier celle des capacités cardio-respiratoires maximales est délicate. Ainsi en pratique, il est de peu d'intérêt de les intégrer dans le modèle prédictif de la variation de tbu en fonction des EPCT. Cependant, l'enregistrement continu de la F_c et l'évaluation des capacités cardio-respiratoires restent importants dans la détermination de l'aptitude au travail à la chaleur, ce point sera revu dans la démarche pratique (cf 6.2.3).

b) un recueil de mesure dans des conditions qui couvrent l'ensemble des situations de travail à la chaleur. En effet, de nombreux facteurs peuvent modifier la F_c : le travail musculaire, l'ambiance de travail, chaleur ou bruit, la température corporelle, la posture, la digestion, le stress auxquels s'ajoutent de nombreux facteurs individuels (Meyer 1996). A titre d'exemple, l'augmentation de l'ordre de 10 bpm de F_{c0} décrit dans la présente étude chez les fumeurs est retrouvée dans la littérature (Yotsukura et al. 1998). Les conditions dans lesquelles ont été recueillies les données de la présente étude permettent de considérer que tous ces facteurs d'influence ont été pris en compte.

Il en va ainsi de la variabilité interindividuelle des sujets dont les caractéristiques recouvrent une large plage de données:

- la $VO_2\text{max}$ moyenne est de $41,8\text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ soit un résultat supérieur à la moyenne communément admise pour l'âge des salariés étudiés ; ses valeurs extrêmes s'échelonnent de $21,7$ à $70,7\text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$, soit des résultats qui correspondent à des capacités faibles pour les premières et des résultats de sportifs de haut niveau pour les deuxièmes.

- l'indice de masse corporelle (IMC) et l'âge dont les valeurs extrêmes sont respectivement de $17,7$ à $31,4\text{ kg.m}^{-2}$ et de 19 à 52 ans.

De même, les ambiances thermiques sont représentatives de la majeure partie des situations de travail à la chaleur. Ainsi, la t_a varie de $18\text{ }^\circ\text{C}$ à $67\text{ }^\circ\text{C}$ et la t_h de $11,5\text{ }^\circ\text{C}$ à $56\text{ }^\circ\text{C}$. Enfin, la dépense énergétique mesurée couvre des situations de travail léger (109 W) à très dur (1076 W). Dans les conditions de la présente étude, les caractéristiques de la contrainte thermique ne modifient pas la relation $\text{dtbu} = f(\text{EPCT})$. Boisvert et al. (1993) avaient retrouvé des EPCT plus élevées après une exposition en ambiance humide par rapport à une ambiance sèche. Pour ces auteurs, l'influence de l'humidité sur la F_c est plus importante au cours du travail qu'au repos.

En pratique, pour déterminer une DLE ou quantifier l'astreinte thermostatique, l'utilisation de la relation $\text{dtbu} = f(\text{EPCT})$ impose une interruption du travail pour enregistrer la F_c de repos. Mairiaux et Malchaire (1990) ont proposé de calculer les EPCT à partir de la

dérive de la Fc au cours du travail. Cette démarche semble séduisante et permettrait de déterminer des DLE directement au cours du travail qui ne serait interrompu que lorsque les valeurs limites sont dépassées. Cependant, les données de la littérature sont contradictoires. En effet, Boisvert et al. (1993) ont mesurés une dérive de Fc au cours d'un travail à 60 % de la VO₂max de 44 bpm en condition humide et 33 bpm en condition sèche pour 1 °C d'élévation de température rectale. Ces résultats permettraient donc de déterminer des DLE sûres à partir de la dérive de Fc.

Cependant, Mostardi et Kubica (1974) ont montré que pour une dépense énergétique évaluée à 22 ml.kg⁻¹.min⁻¹, soit un travail moyen, la dérive de Fc au cours du travail est de 17,5 bpm pour une élévation de 1°C de température buccale. Cette variation n'est plus que de 7,5 bpm pour un travail de 32,4 ml.kg⁻¹.min⁻¹, soit un travail lourd. L'augmentation de Fc liée à l'astreinte thermostatique est donc moins prononcée lors d'un travail lourd et, en conséquence, l'élévation de dtbu est sous-estimée par la dérive de Fc au cours du travail. A l'opposé de Mostardi et Kubica (1974), Kamon et Belding (1971) mesurent une dérive de Fc au cours du travail de 24 bpm pour 1°C de dtbu lors d'une marche à 5,6 km.h⁻¹ alors que la dérive de Fc n'est que de 17 bpm lorsque la vitesse de marche est ramenée à 4,5 km.h⁻¹. La diminution de la dérive de Fc lorsque la dépense énergétique diminue est également décrite par Givoni et Goldman (1973). Même si les résultats des auteurs cités ci-dessus sont contradictoires, ils indiquent majoritairement, que pour une même variation de température centrale la dérive de Fc au cours du travail est inférieure aux EPCT correspondantes. La démarche qui consiste à utiliser la dérive de la Fc au cours du travail pour déterminer une DLE est donc dangereuse, car elle sous estime en règle l'astreinte thermostatique.

En conclusion, les résultats de la présente étude sont en accord avec les données de la littérature qui ont toutes été obtenues en situation de laboratoire sur un petit nombre de sujets. L'équation calculée à partir des résultats de la présente étude est basée sur des données recueillies auprès d'un grand nombre de salariés au cours d'expositions à des contraintes thermiques variées. En conséquence, l'intervalle de confiance de la relation, basé sur une variabilité interindividuelle importante dans des conditions variées permet de définir une limite d'EPCT sûre. La relation entre la dtbu et les EPCT permet une quantification simple de l'astreinte thermostatique sans risque de dépassement des valeurs limites et sans mesure de la température buccale. Cette relation permet de fixer des limites de sécurité tenant compte des variabilités interindividuelles et des variabilités des conditions thermiques des situations de travail. La limite de sécurité de 20 bpm d'EPCT correspond à une dtbu inférieure à 1°C chez 95 % des salariés exposés.

5.4 Intérêts et limites de la Fc comme indice d'astreinte

Cette partie sera structurée sur les quatre objectifs de l'indice "idéal" proposés par Mairiaux et Malchaire (1990) transposés à la mesure de la fréquence cardiaque. Selon ces auteurs, l'indice idéal devrait répondre à quatre objectifs (i) constituer une échelle de sévérité de la contrainte thermique permettant de comparer la contrainte dans différentes situations de travail, (ii) déterminer l'acceptabilité d'une situation d'exposition donnée et permettre de fixer des niveaux maximum d'exposition, (iii) établir des durées limites d'exposition et des cycles travail repos et enfin, (iv) identifier les différents paramètres de la contrainte et servir d'aide à la décision pour réduire les contraintes.

- Le premier objectif est partiellement atteint par la mesure de la Fc. Celle-ci peut être considérée comme un indice de sévérité de la contrainte. Toutefois, elle permet de comparer l'astreinte mais ne permet pas de comparer les niveaux de contrainte. En effet, la nature de la contrainte, radiante ou convective ou humide, n'est pas indiquée par la mesure de la Fc.

- Le deuxième objectif concernant l'acceptabilité d'une situation de travail est particulièrement bien pris en compte par la mesure de la Fc. Celle-ci prend en compte

l'astreinte cardio-vasculaire globale et notamment la dépense énergétique, elle est donc représentative de la pénibilité des tâches. De plus, la mesure de la Fc permet de prendre en compte les facteurs individuels. En effet, le stress, la fatigue et les capacités cardio-respiratoires du salarié influencent la Fc. Ainsi, chez un sujet sportif, pour des intensités de travail modérées, l'augmentation du débit cardiaque est assurée par l'augmentation de la Fc et du volume d'éjection systolique. De plus, le salarié sportif a en général une Fc de repos inférieure à celle du sujet sédentaire. Ainsi pour un même travail, la Fc et le coût cardiaque du sujet sportif seront nettement inférieurs à ceux du sujet sédentaire (Meyer et al. 1996).

Par ailleurs, l'utilisation de la Fc se révèle très utile en situation de travail bref, variable ou inattendu. En effet, la réponse de la Fc à la contrainte est très rapide. Dans les activités professionnelles constituées de séquences brèves d'activité intense séparées par des périodes d'activité moins intense, l'astreinte cardiaque moyenne des salariés est faible. En revanche, l'astreinte lors des périodes d'activité intense, même si elle est très courte peut présenter des risques, notamment d'accident cardiaque. Le recueil de la Fc permet d'évaluer ces risques et démontre l'importance de les réduire.

La mesure de la Fc permet de fixer des niveaux limites et de décider ainsi de la poursuite ou de l'interruption de l'exposition. Une alarme sonore réglable sur la valeur seuil peut être déclenchée par le cardiofréquence-mètre. La limite retenue pour la Fc au travail est basée sur la dépense énergétique, elle est définie selon le Minnesota Code (1967) par la relation : $200 - \text{âge}$. Le deuxième critère limitant est liée à l'astreinte thermostatique. Elle ne peut être mesurée qu'au repos; dans ces conditions les EPCT doivent être inférieures à 20 bpm.

- Le troisième objectif d'un indice est de permettre d'organiser le travail (alternances travail-repos). La Fc répond à ce critère, à condition que les durées de travail soient définies progressivement puisque les EPCT ne peuvent être obtenues qu'au repos. Pour Mairiaux et Malchaire (1990), la reprise du travail après une période de récupération en ambiance neutre peut être décidée lorsque la Fc mesurée est inférieure à $Fc_0 + 15$ bpm (Fc_0 est la Fc de repos au début du poste de travail). Ces auteurs considèrent que la limite des EPCT est de 30 bpm. Les résultats de la présente étude montrent que la limite de sécurité des EPCT est de 20 bpm. En conséquence, la Fc de repos lors de la reprise du travail devrait être inférieure à $Fc_0 + 10$ bpm. Pour déterminer cette DLE, il est possible de faire travailler 2 ou 3 salariés pendant des expositions de durées croissantes et de mesurer leurs EPCT. La durée d'exposition initiale sera de 10 min puis incrémentée par pas de 10 min. (Meyer et al. 1997).

- Le quatrième objectif qui est la quantification des différents paramètres physiques de la contrainte n'est pas rempli par la mesure de la Fc. La Fc ne permet de quantifier que la dépense énergétique. Il s'agit d'un élément essentiel de l'astreinte des salariés, en particulier lors d'expositions courtes. Mais la Fc ne permet qu'une quantification globale de la contrainte. De ce fait, la Fc démontre la nécessité de réduire la contrainte mais ne permet pas de choix des priorités d'action.

La Fc est donc un indice d'astreinte qui répond à la majorité des critères de l'indice idéal décrit par Mairiaux et Malchaire (1990). Sa principale limite étant qu'elle ne permet pas de quantifier l'astreinte sudorale. La Fc est donc un bon indice dans la majorité des expositions à la chaleur mais n'est pas un indice sûr dans toutes les situations. En effet, pour des expositions longues où le risque de déshydratation existe, la Fc ne permet pas de mettre en évidence ce risque. En particulier, lors d'expositions supérieures à une heure, les pertes sudorales qui permettent un équilibre thermostatique exposent à un risque de déshydratation. Ces situations de travail à exposition prolongée doivent être analysées différemment pour réduire la contrainte. Le principal outil dans ce cas est le contrôle de la perte de poids des salariés.

Lors de ces expositions longues, en général courantes sinon habituelles pour le salarié, la réduction des contraintes est essentielle. Les mesures des paramètres physiques

permettront de déterminer les paramètres les plus contraignants et d'établir des priorités dans les modifications du poste de travail pour réduire l'astreinte thermique.

En conclusion, la Fc est le paramètre qui répond le mieux à l'ensemble des questions que posent Mairiaux et Malchaire (1990) sur l'indice idéal. De plus, cet indice permet la prise en compte de l'astreinte métabolique, son utilisation est simple, rapide, elle gêne peu le salarié et ne modifie pas son travail et enfin, le matériel de recueil est peu onéreux.

6. Démarche pratique

Le médecin du travail peut se trouver confronté à trois types de plaintes relatives au travail à la chaleur :

- l'inconfort thermique,
- l'astreinte thermique
 - de courte durée
 - prolongée
- les risques de brûlures.

6.1 Confort thermique

En situation de confort, la vitesse de l'air ne doit pas être perceptible ($< 0,3 \text{ m.s}^{-1}$) et la température de rayonnement être égale à la température de l'air. Une situation idéale de confort pour différents types de travaux est présentée dans le tableau 16. Il faut rappeler qu'une situation idéale de confort sera toujours inconfortable pour au moins 5 % des salariés (Fanger 1972).

Métabolisme	ta °C	Rh%
repos (50 W.m^{-2})	27,5	60
W de bureau (80 W.m^{-2})	24,0	50
W moyen (120 W.m^{-2})	20,0	50
W dur (200 W.m^{-2})	11,0	30

Tableau 16 : Valeurs de ta et de Rh correspondantes au confort thermique pour 4 niveaux de dépense énergétique ($\text{clo} = 0,6$; $\text{Va} = 0,2 \text{ m.s}^{-1}$; $\text{ta} = \text{tr}$).

Les deux tableaux suivants présentent l'incidence sur le pourcentage d'insatisfaits (PPD) de variations faibles de ta et de Rh lors d'un travail de bureau (80 W.m^{-2}), activité qui intéresse plus du tiers de l'ensemble des salariés.

PPD %	ta °C
48	18
24	20
9	22
5	24
12	26
32	28

Tableau 17 : Pourcentage d'insatisfaits lors de variation faible de ta lors d'un travail de bureau. L'humidité relative est à 50%, la tr est égale à la ta, l'isolement vestimentaire est de 0,6 clo et la vitesse de l'air est de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$.

Le tableau 17 montre que de faibles variations de la température ambiante ont une importance marquée sur le nombre d'insatisfaits. Ainsi, une ambiance de confort doit être étroitement régulée. De plus, il faudra être attentif à la saison, la température de confort en été est légèrement supérieure à la température de confort en hiver (en moyenne, 2°C d'écart, ISO 7730).

PPD %	RH %
18	30
17	40
15	50
14	60
13	70

Tableau 18 : Pourcentage d'insatisfaits lors de variation faible de l'humidité lors d'un travail de bureau. La ta et la tr sont égales à 24°C.

Le tableau 18 montre que l'influence de l'humidité est faible pour des valeurs de températures proches du confort. Entre 20°C et 25°C, une fluctuation de 40 à 70 % de l'humidité relative n'affecte pas ou peu le confort thermique (Metz 1961).

6.2 Astreinte thermique élevée

6.2.1 Astreinte thermique élevée de courte durée

Les situations d'exposition à la chaleur de durée inférieure à 1 h sont les plus nombreuses actuellement. Dans ces conditions, il n'existe pas de risque de déshydratation, car la perte sudorale reste inférieure à 2 % du poids du corps. Dans ces situations brèves et variables, une surveillance physiologique des salariés se justifie, l'enregistrement de la fréquence cardiaque prend alors toute sa valeur.

Une fois les conditions de travail connues, une durée maximale de travail à la chaleur ou un travail maximal à réaliser peuvent être définis. Il convient de fixer des durées limites d'exposition et de définir un temps de repos minimum et des durées de cycles travail / repos. Le critère de reprise du travail reposera sur la détermination de la fréquence cardiaque. Pour déterminer une durée limite d'exposition, 2 ou 3 salariés vont travailler pendant des expositions de durées croissantes, leurs EPCT seront mesurées. La durée d'exposition initiale sera de 10 min pour être incrémentée par pas de 10 min. La durée initiale de 10 min est retenue car elle exclut toute exposition thermique excessive (Meyer et al. 1997).

La durée limite d'exposition sera fixée par $EPCT < 20$ bpm.

Le critère de reprise du travail sera fixé par $Fc < Fc_0 + 10$.

Il est important de savoir si ce travail à la chaleur de courte durée sera répétitif ou s'il s'agit seulement d'un phénomène exceptionnel qui ne se renouvellera pas. Dans le premier cas, il est préférable de faire en sorte de diminuer la contrainte.

6.2.2 Astreinte thermique élevée de durée prolongée

Dans le cas où le salarié se trouve en situation d'exposition continue à la chaleur, le risque de déshydratation existe, la perte sudorale peut être supérieure à 2% du poids du corps. De façon spontanée, les travailleurs ne boivent pas la quantité de liquide nécessaire pour compenser les pertes dues à la sudation. La mise à disposition de fontaines d'eau fraîche, la sélection de boissons agréables et l'organisation de pauses permettront de faciliter l'ingestion de liquide.

Pour les nouveaux salariés, l'acclimatement doit être assuré par des expositions progressives à la chaleur : 20 % de la durée normale le premier jour, 40 % le deuxième, 60 % le troisième, 80 % le quatrième et 100 % le cinquième jour. Lors de la reprise du travail après un congé, la programmation est la suivante : 50 % le premier jour, 60 % le deuxième, 80 % le troisième et 100 % le quatrième jour (Mairiaux et Malchaire (1990), NIOSH 1986).

De toute façon, il faut réduire la contrainte. Si celle-ci est évidente, une approche facile ou de bon sens permet déjà d'envisager les améliorations. Ainsi, si les salariés sont exposés essentiellement à une température élevée de rayonnement, la réduction spécifique de cette contrainte pourra être réalisée par la mise en place d'écrans de protection. Pour des contraintes thermiques multiples ou non évidentes, l'appel à des spécialistes est nécessaire pour identifier les paramètres les plus contraignants et fixer des priorités d'action.

6.2.3 Aptitude au travail à la chaleur

La question de l'aptitude au travail à la chaleur est souvent posée, elle concerne en premier lieu les salariés soumis à des expositions brèves et intermittentes, en effet, dans ces situations le risque d'accident cardiaque est plus marqué.

Après la recherche des antécédents médicaux et l'examen clinique, pour évaluer l'aptitude au travail à la chaleur, un step-test peut être réalisé afin de déterminer la $\dot{V}O_2\text{max}$ des salariés. Les capacités cardio-respiratoires des sujets devront au moins être situées dans la catégorie moyenne en fonction de l'âge comme indiqué sur la figure 18 (Meyer et Flenghi 1995). Des chiffres inférieurs devront inciter à poursuivre les explorations avant de donner un avis d'aptitude. Pour du personnel spécialisé exposé à une contrainte thermique forte une $VO_2\text{max}$ de $40 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ a été proposée comme critère minimal de capacité physique (Brouwers et Lavenne 1968).

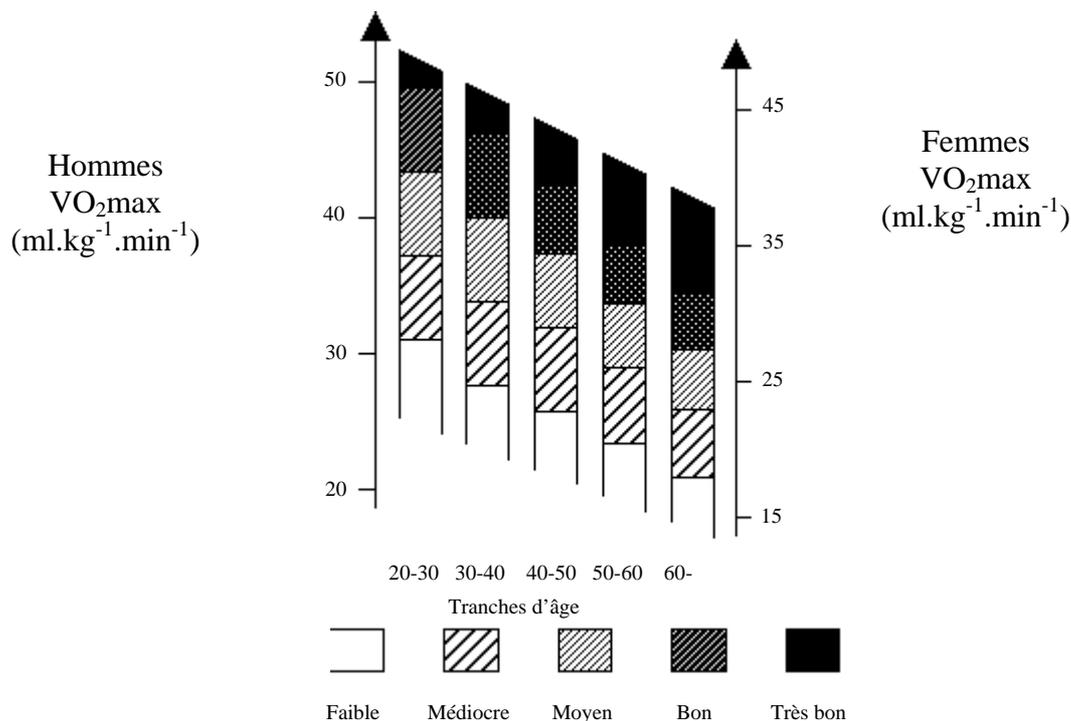


Figure 18 : Représentation des différentes classes de capacités cardio-respiratoires en fonction de l'âge et du sexe (d'après Meyer et Flenghi 1995).

6.3 Risques de brûlures

Le contact avec une surface chaude en milieu de travail peut être accidentelle (durée de contact en général < 10 s.) ou continue (durée de contact de 4 s. à 8 h.). Les températures

limites de surface sont normalisées (NF EN 563). Les températures de surface qui engendrent des brûlures sont fonctions du matériau constitutif de la surface et de la durée de contact. Les figures 18 et 19 présentent les seuils de brûlure lors d'un contact d'une durée entre 1 et 10 secondes entre la peau et une surface chaude en métal ou en bois.

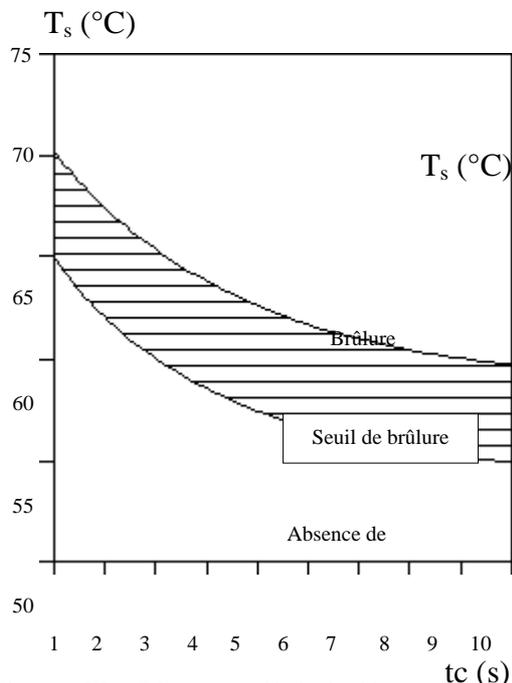


Figure 20 : Plage-seuil de brûlure lorsque la peau est en contact avec une surface lisse chaude en bois en fonction de la durée de contact (tc) (afnor 1995)

Le chiffre seuil de 60°C peut être retenu pour la température de surface lors d'un contact accidentel, en dessous de cette limite, il n'y a pas de risque de brûlure. Pour une durée de contact supérieure à 1 minute, 60°C reste la valeur seuil pour une surface en bois ou en plastique, cette valeur est de 50°C pour une surface en métal non revêtu. Pour des durées de contact de 8 heures, la norme indique une limite de 43°C pour tous les types de matériaux, dans les cas où moins de 10% de la surface cutanée sont concernés.

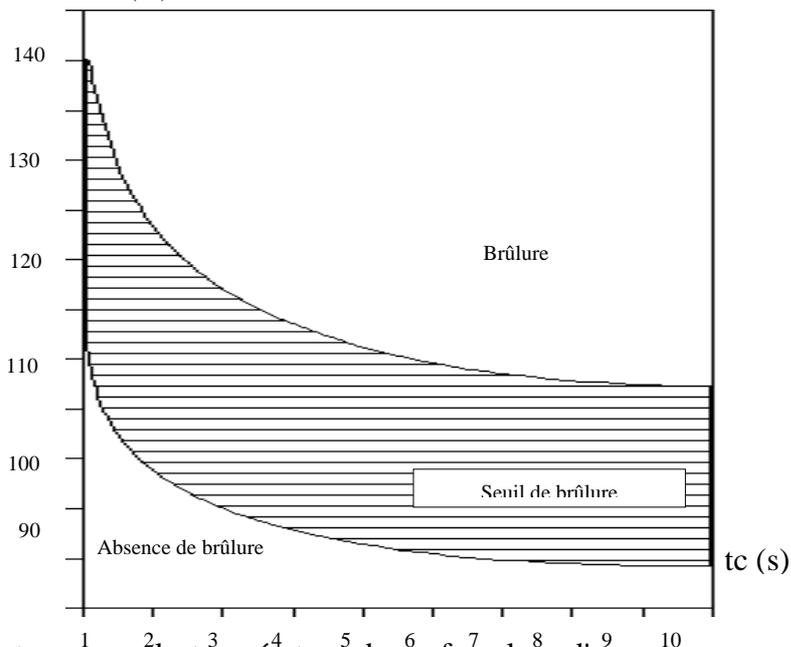
Même si la température est inférieure au seuil de brûlure, le seuil de douleur peut être dépassé. Un seuil de douleur de 43°C est défini lorsque le contact entre la peau et la surface chaude est volontaire (Parsons 1993, Bernard et Foley 1993).

6.4 Rôle d'information du médecin du travail

Les salariés exposés à la chaleur font l'objet d'une surveillance médicale spéciale. Pendant ce temps supplémentaire, un des rôles fondamentaux du médecin du travail est d'assurer une information des salariés sur le travail à la chaleur. Il est nécessaire d'informer et de former sur les risques de l'exposition à la chaleur. Notamment, il faut rappeler l'importance d'un apport hydrique suffisant en cas d'exposition prolongée, expliciter les premiers signes d'intolérance, faciliter les pauses et si celles-ci sont à l'appréciation du salarié rappeler que l'auto évaluation n'est pas toujours fiable et qu'elle peut sous estimer le risque. Le médecin du travail doit également rappeler que le travailleur à la chaleur ne doit pas être un travailleur isolé, le travail en équipe doit être préféré. D'autre part, la pratique d'une activité physique régulière est à recommander aux salariés, elle est garant d'une meilleure adaptation à la chaleur et participe au maintien de la santé, c'est une bonne démarche de prévention.

La prévention technique reste la base de toutes actions préventives concernant les salariés exposés à la chaleur. Les mesures techniques à mettre en oeuvre pour réduire la

Figure 19 : Plage-seuil de brûlure lorsque la peau est en contact avec une surface chaude lisse en métal nu en fonction de la durée de contact (tc).



contrainte thermique sont essentiellement du ressort des ingénieurs et des techniciens sous la responsabilité de l'employeur. Le tableau 19 adapté du NIOSH (1986) et de Parsons (1993) présenté en annexe donne des éléments techniques d'orientation pour diminuer les contraintes lors du travail à la chaleur.

7. Conclusion

Lorsqu'un salarié se plaint d'avoir chaud, il faut dans un premier temps repérer objectivement la classe d'ambiance thermique de sa situation de travail : situation d'inconfort thermique ou situation de contrainte thermique qui expose alors à un risque pour la santé. Dans la plupart des cas, cette classification est évidente. Parfois, il faudra réaliser un recueil de température afin de calculer le WBGT de la situation de travail.

Dans le cas d'une situation d'inconfort thermique, les paramètres de l'ambiance thermique pourront être assurés au mieux en respectant les chiffres proposés dans la norme X35-203. Les situations d'inconfort thermique ne présentent pas de risque pour la santé. Cependant, elles touchent un nombre grandissant de salariés du tertiaire pour lesquels le confort thermique est l'un des paramètres essentiel de bien-être et d'efficacité. Il s'agit de ce fait d'un rôle important pour le médecin du travail.

Dans les situations de contraintes thermiques élevées, les risques pour la santé sont bien présents. Du fait des expositions brèves, parfois prévues au dernier moment dans le cadre d'une opération de maintenance d'urgence, le médecin du travail doit disposer d'un indice simple, facile à mettre en oeuvre. La Fc est actuellement l'indice physiologique le plus adapté pour répondre à cet objectif.

La pertinence de la relation entre la dtbu et les EPCT proposée à partir des données de la présente étude permet d'appliquer le seuil de 20 bpm d'EPCT dans toutes les conditions d'exposition dont la durée ne dépasse pas 60 minutes. Cette limite implique que l'astreinte thermostatique reste en deçà de sa valeur seuil de 1°C. Pour des durées d'exposition supérieures à 1 heure, la mesure de l'astreinte sudorale devra compléter celle de l'astreinte thermostatique.

8. Bibliographie

- AFNOR . Recueil de Normes Françaises, Ergonomie, AFNOR,ed. 1995, 1 vol.
- NF EN X35-20. Ambiance chaude. Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail basée sur l'indice WBGT.
 - NF EN X35-202. Ambiances thermiques. Appareils et méthodes de mesure des grandeurs physiques.
 - NF EN X35-203. Ambiances thermiques modérées. Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique.
 - NF EN X35-204, (ISO 7933). Ambiances thermiques chaudes. Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise.
 - NF EN X35-205, (ISO 8996). Détermination de la production de chaleur métabolique.
 - NF EN X35-111. Sécurité des machines. Températures des surfaces tangibles. Données ergonomiques pour la fixation de températures limites des surfaces chaudes.
 - NF X35-207, (ISO 9886). Evaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques.
 - NF X35-206, (ISO 9920). Ergonomie des ambiances thermiques. détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire.
 - NF X35-209, (ISO 10551). Ergonomie des ambiances thermiques. Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs.
- Ainsworth B.E., Haskell W.L., Leon A.S., et al. Compendium of physical activities : classification of energy costs of human physical activities. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1993, 25, 1, 71-80.
- Aoyagi Y., Mc Lellan T., Shephard R. Determination of body heat storage : how to select the weighting of rectal and skin temperatures for clothed subjects. *Int Arch. Occup. Environ. Health*, 1996, 68, 325 - 336.
- Astrand P.O., Rodahl K. Evaluation de l'aptitude physique à partir d'épreuves de laboratoire. La régulation thermique, pp.409-444. in *Précis de physiologie de l'exercice musculaire*. Masson ed., 1994, troisième édition.
- Beaird J., Bauman T., Leeper J. Oral and tympanic temperatures as heat strain indicators for workers wearing chemical protective clothing. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1996, 57, .344-347.
- Ben Lellahom L., Akrouit M., Sayadi A., Zouiter I. Etudes des charges thermiques et physiques du travail dans les briqueteries artisanales en Tunisie. *Revue de médecine du travail*, 1998, 25, 2, 72-83.
- Bergh U., Ekblom B. Physical performance and peak aerobic power at different body temperatures. *J of Appl Physiol*, 1979, 46, 885-889.
- Bernard T., Foley M. Upper acceptable surface temperature for prolonged hand contact. *Int J Ind Ergo*, 1993, 11, 29-36.
- Boisvert P., Nakamura K., Shimai S., Candas V., Tanaka M. Sweat rate and body temperature during exercise in dry and humid environments. *Advance in Industrial Ergonomics and Safety V*. Nielsen and Jorgensen ed. Taylor & Francis ed., 1993, 399-404.
- Brouha L. *Physiologie et industrie*. Gauthier-Villards ed. Paris 1963.
- Brouwers J., Lavenne F. Détermination de l'aptitude au travail à la chaleur à partir d'efforts réalisés en ambiance normale. *Revue de l'institut d'hygiène des mines*, 1968, 23, 3, 150-158.
- Brinquin L., Buffat J.J. Coup de chaleur, aspects épidémiologiques, clinique et thérapeutique. *Semaine des Hôpitaux de Paris*, 1994, 70, 17-18, 507-515.
- Candas V., Botherel B. Hydratation, travail et chaleur. *Cahier de Note Documentaire*, 1989, 135, 241-245
- Cuisse-Peduzzi V. Etude du travail à la chaleur dans la métallurgie. Thèse médecine LILLE 1996.
- DARES Expositions aux contraintes et nuisances dans le travail. Ministère du travail et des affaires sociales, 1996, 10-42, 1-4.
- DARES. Conditions, organisation du travail et nouvelles technologies en 1991. *DSTE*, 1993, 90-91-92.
- Fanger P.O. *Thermal confort : analysis and applications in environmental engineering*. Mc Graw- Hill éd., New-York, 1970, 244 p.
- Frimat P., Chamoux A., de Gaudemaris R., Cantineau A., Amphoux M. Fréquence cardiaque et travail. Quelle utilisation ? Quels critères ? *Archives des Maladies Professionnelles*, 1989, 50, 4, 357-360.
- Frimat P., Furon D. La charge physique de travail. *EMC Toxicologie, pathologie professionnelle*, 1986, 16790 A10,6 p.

- Geraut Ch., Dupas D. Travail à la chaleur. EMC Toxicologie et pathologie professionnelle, 1991, 16500 B10, 6p.
- Givoni B., Goldman R. Predicting heart rate response to work, environnement, and clothing. J of Appl Physiol, 1973, 34, 201-204.
- Gun R.T., Effects of thermal, personal and behavioural factors on the physiological strain, thermal comfort and productivity of Australian shearers in hot weather. Ergonomics, 1995, 7, 1368-1384.
- Hardy J.D., Stolwijk J.A. Partitional calorimetric studies of man during exposures to thermal transients. J of Appl Physiol, 1966, 6, 1799 -1806.
- Hasan J., Karvonen M., Phronen P. Physiological effects of extreme heat; As studied in the finnish "sauna" bath. American Journal of Physical Medicine, 1967, 46, 2, 1226-1246.
- Havenith G., Coenen J.M.L., Kistemaker L. Relevance of individual characteristics for human heat stress response is dependent on exercise intensity and climate type. Europ J of Appl Physiol, 1998, 77, 231- 241.
- Horwat F., Meyer J.P., Malchaire J. Validation of a new pocket computer assisted method for metabolic rate estimation in field studies. Ergonomics, 1988, 31, 8, 1155-1164.
- Ilmarinen R. Einflüsse verschiedener Bekleidung auf einige physiologische Grossen des Menschen bei Körperarbeit in unterschiedlich erhöhter Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit Dissertation Koln 1978.
- ISO 12894 projet de norme internationale. Ergonomie de l'environnement thermique. Supervision médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes. Genève 1994.
- Jezova D., Kvetnansky R., Vigas M. Sex differences in endocrine reponse to hyperthermia in sauna. Acta Physiol Scand, 1994, 150, 293-298.
- Kamon E., Belding H. Heart rate and rectal temperature relationships during work in hot humid environments. Journal of Applied Physiology, 1971, 31, 3, 472-477.
- Kukkonen-Harjula K., Oja P., Laustiola K., Vuori I., Jolkkonen J. Haemodynamic and hormonal responses to heat exposure in a Finnish sauna bath. European Journal of Applied Physiology, 1989, 58, 543-550.
- Mairiaux P., Sagot J.C., Candas V. Oral temperature as an index of core temperature during heat transients. European Journal of Applied Physiology, 1983, 50, .331-341.
- Mairiaux P. ; Malchaire J. Le travail en ambiance chaude. Masson ed., Paris, 1990, 172 p
- Malchaire J. Travail à la chaleur. EMC Toxicologie, pathologie professionnelle, 1996, 16-781-A-20, 4 p.
- Malchaire J., Piette A. Logiciel d'évaluation de la contrainte thermique (version 2.2). Louvain, Université catholique, Unité d'hygiène et physiologie du travail, 1995.
- Metz B. L'homme et son environnement thermique. Le domaine du confort. Revue universelle des mines, 1961, 9, XVII, 11, 1-7.
- Meyer J. P. Ergonomie. La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une méthodologie moderne. Documents pour le Médecin du Travail, 1996, 68, 20, 315-322.
- Meyer J. P. Astreinte physiologique lors d'opérations de retrait de l'amiante. DMT, 1997, 69, 19-26.
- Meyer J.P., Flenghi D. Détermination de la dépense énergétique de travail et des capacités cardiorespiratoires maximales à l'aide d'un exercice sous maximal sur step test. DMT, 1995, 64, 245-251.
- Meyer J.P, Rapp R., Vogt J.J. Campagne de comparaison de la validité respective des principaux indices de contraintes thermiques. Les notes scientifiques et techniques de l'INRS., 1997, NST 156.
- Minnesota code ECG classification. Adaptation to CR leads and modification of the code for ECGs recorded during and after exercise. Acta Medica Scandinavica, 1967, suppl. 481, 1-26.
- Monod H. Dépense énergétique chez l'homme, in : Scherrer J. et al. Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie, Masson, 1981, 2ème édition, 107-137.
- Monod H., Pottier M. Adaptations respiratoires et circulatoires du travail musculaire, in : Scherrer J. et al. ;. Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie, Masson ed., Paris, 1981, 2ème édition, 159-204.
- Morin C., Bushnell M.C. Temporal and qualitative properties of cold pain and heat pain : a psychophysical study. Pain, 1998, 74, 67-73.
- Morrissey S. Work place design recommendations for the pregnant worker. International Journal of Industrial Ergonomics, 1998, 21, 383-395.

- Mostardi R., Kubika R. The effect of increased body temperature due to exercise on the heart rate and on the maximal aerobic power. *European Journal of Applied Physiology*, 1974, 33, 237-245.
- Nielsen R., Meyer JP. Evaluation of metabolism in industrial work. *Ergonomics*, 1987, 30, 563-572.
- Noakes T.D., Myburgh K.M., du Plessis J., Lang L., Lambert M., Van Der Riet J. Metabolic rate, not percent dehydration, predicts rectal temperature in marathon runners. *Med Sci Sports and Exercise*, 1991, 23, 443-449.
- Pandolf K.B. Time course of heat acclimation and its decay. *Int J. of Medicine*, 1998, 19, 157-160.
- Parsons K.C. Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. The principles and the practice. Taylor et Francis éd., Londres, 1993, 358 p.
- Payot L., Meyer J.P., Didry G. Les contraintes physiques et thermiques des opérateurs en sécherie de papeterie. Les notes scientifiques et techniques de l'INRS, 1997, NST 160.
- Pirnay F., Petit J.M., Deroanne R. Evolution comparée de la fréquence cardiaque et de la température corporelle pendant l'exercice musculaire à haute température. *Internationale. Zeitschrift für Angewesende Physiologie*, 1969, 28, 23-30.
- Rapp R., Salsi S., Aubertin G. Ecrans de protection contre le rayonnement thermique. Cahier de Notes Documentaires, 1984, 115, 179-191.
- Semenza J., Rubin C., Falter K. Heat related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England Journal of Medicine*, 1996, 335, 2, 84-90.
- Smolander J., Korhonen O., Ilmarinen R. Responses of young and older men during prolonged exercise in dry and humid heat. *European Journal of Applied Physiology*, 1990, 61, 413-418.
- Spitzer H., Hettinger T. Tables donnant la dépense énergétique en calories pour le travail physique. L'étude du travail, 1965, 164, 35-42, 165, 25-43, 166, 38-52, 168, 33-50.
- Tnanka M., Brisson G.R., Volle M.A. Body temperature in relation to heart rate for workers wearing impermeable clothing in hot environment. *Am Ind Hyg Assoc J.*, 1978, 39, 11, 885-890.
- Vigneron C., Bonnin Ph., Savin E., Kedra AW, Martineaud J.P. Travail, chaleur, coeur chez les maçons fumistes. *Revue de médecine du travail*, 1996, 23, 2, 78-90.
- Vogt J.J. Ambiances thermiques EMC toxicologie, 1987, 16 781 A20,4p.
- Vogt J.J. Confort physiologique. *Technique de l'ingénieur*, 1985, B 2180, 1-10.
- Vogt J.J., Foehr R., Kirsch J., Golle F., Meyer-Schwartz M.T. Estimation des charges de travail et des charges de chaleur en situation réelle de travail : principes et applications d'une nouvelle méthodologie. *Le Travail Humain*, 1970, 33/1-2, 125-140.
- Vogt J.J., Fernandez M.H., Meyer-Schwartz M.T. Analyse des variations rapides de fréquence cardiaque au début et à l'arrêt de l'exercice musculaire. Influence de l'ambiance thermique. *Arch.Sci. Physiol.*, 1971, 25, 377-399.
- Vogt J.J., Metz B. Ambiances thermiques, in : Scherrer J. et al.. Précis de physiologie du travail, notions d'ergonomie, Masson, 1981, 2ème édition, 217-263.
- Wasterlund D. A review of heat stress research with application to forestry. *Appl Ergo*, 1998, 29, 3, 179-183.
- Yotsukura M., Koide Y., Fujii K. Heart rate variability during the first month of smoking cessation. *American Heart Journal*, 1998, 135, 6, 1004-1009.

9. ANNEXES

Annexe 1

A. Contrôle technique.

1. Réduire la source de chaleur.
2. Contrôler l'apport de chaleur par convection.
3. Contrôler l'apport de chaleur par radiation.
4. Agir sur la composante évaporation.

B. Habitudes de travail, d'hygiène et contrôle administratif.

1. Limiter le temps d'exposition à la chaleur ou la température.
2. Réduire la charge métabolique.
3. Accroître le temps de tolérance à la chaleur.
4. Formation à la santé et la sécurité.
5. Dépistage des intolérance à la chaleur.

C. Programme d'alerte.

1. Etablir un comité de surveillance du travail à la chaleur (ingénieur sécurité, infirmière, médecin du travail, ergonome, opérateurs concernés....)
2. Déclarer le niveau d'alerte en cas de temps chaud et ensoleillé prévu.

D. Vêtements de protection et éléments de refroidissement du corps. Ils ne seront utilisés que si les mesures précédentes n'ont pu être mise en place.

E. Dégradation des performances. Il faut rappeler que l'utilisation de vêtement de protection peut augmenter la contrainte thermique.

Exemples :

Eloigner les salariés ou réduire la température.
Modifier la température ou la vitesse de l'air.
Apport local de froid.
Placer un écran entre la source radiante et le salarié.
Modifier le coefficient d'émissivité des surfaces. Utiliser des portes qui s'ouvrent uniquement si nécessaire.
Augmenter les mouvements d'air. Diminuer la pression partielle de vapeur d'eau. Utiliser des ventilateurs ou l'air conditionné.

Exemples :

Adapter le poste de travail : travail le plus chaud aux périodes les plus froides du jour ou de l'année. Prévoir des zones de repos en ambiance neutre. Interruption des périodes de travail à la chaleur laisser à la liberté des salariés. Augmenter les apports d'eau.

Mécanisation. Réduire le temps de travail. Reconcevoir le poste de travail.

Programme d'acclimatement. Maintenir les salariés en bonne forme. S'assurer que les pertes d'eau sont compensées et maintenir la balances électrolytique si nécessaire.

Les chefs de chantier doivent connaître les premiers signes d'intolérance à la chaleur et les premiers gestes à effectuer. Instruction de base pour tout le personnel exposé concernant les précautions à respecter, l'utilisation des équipements de protection et les risques liés à des facteurs extérieurs au travail (prise de médicaments, alcool). Travail en équipe. Mise en place de consignes de traitement en cas d'intolérance.

Antécédents médicaux et d'intolérance à la chaleur.

Mauvaises conditions physiques.

Exemples :

Analyse du problème thermique, solutions à envisager, élaboration d'une stratégie d'amélioration. Rappel des consignes de sécurité, faciliter les pauses, organisation du travail.

redistribuer les tâches non urgentes. Augmenter l'effectif des travailleurs. Augmenter les temps de repos. Rappeler au salariés de boire régulièrement. Améliorer les conditions de travail.

Vêtements de protection, refroidissement par de l'eau froide ou de l'air froid, gilet avec plaque de glace, survêtement humide...Les salariés doivent être acclimatés et entraînés à l'utilisation des équipements de protection.

Tous les vêtements peuvent interférer avec l'activité et réduire les performances (diminution de l'habileté, moins bonne réception des informations...).

Tableau 19 : Eléments techniques d'orientation pour diminuer les contraintes lors du travail à la chaleur (Parsons 1993, NIOSH 1986).

Annexe 2

Conversion des unités

Unités de masse :

$$1 \text{ kg force} = 9,82 \text{ N}$$

Unités de travail :

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ J}$$

Unités de puissance :

$$1 \text{ J.s}^{-1} = 1 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} = 0,0143 \text{ kcal.mn}^{-1}$$

$$1 \text{ kcal.min}^{-1} = 69,76 \text{ W}$$

$$1 \text{ kcal.h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = 1,16 \text{ W.m}^{-2}$$

$$1 \text{ l.O}_2 \cdot \text{min}^{-1} = 340 \text{ W}$$

$$1 \text{ Met} = 3,5 \text{ ml.kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

soit 90 W pour un sujet de 70 kg