

LE TRAVAIL À LA CHALEUR

Work in the heat

Prof. J. Malchaire

Unité Hygiène Et Physiologie Du Travail

Université Catholique de Louvain

Le travail à la chaleur	1
I. Les Principes de base	2
I.1. Introduction	2
I.2. La réglementation européenne	3
I.3. Les normes internationales et européennes	3
II. L'évaluation des paramètres de base	4
II.1. Evaluation de la charge physique de travail	4
II.2. Mesurage de la température de l'air	6
II.3. Mesurage de l'humidité de l'air	7
II.4. Evaluation du rayonnement thermique	8
II.5. Mesurage de la vitesse de l'air	8
II.6. Evaluation de l'isolement thermique des vêtements	8
III. Les indices climatiques	10
III.1. Les indices de confort thermique (PMV - PPD)	10
III.2. L'indice WBGT	11
III.3. L'indice Predicted Heat Strain (PHS)	11
IV. La StratEgie générale de gestion des ambiances thermiques de travail	13
IV.1. Principes	13
IV.2. Niveau 1, Dépistage de la stratégie	14
IV.3. Niveau 2, Observation	14
IV.4. Niveau 3, Analyse	15
IV.5. Niveau 4, Expertise	16
V. La prévention	16
V.1. Adaptation de l'organisation du travail	16
V.2. Améliorations techniques	16
V.3. Les boissons	18
VI. Les aspects de santé	18
VI.1. Les effets liés au travail au froid et au chaud	18
VI.2. Sélection médicale	18
VI.3. Surveillance de la santé régulière	19
VI.4. Amélioration de la tolérance physiologique à la chaleur: l'acclimatement	19
VI.5. Formation et encadrement des salariés	19
VI.6. Surveillance d'opérations à risque	19

Résumé

Après avoir revu les principes de base du travail à la chaleur, la réglementation européenne et les normes sur lesquelles elle s'appuie, l'article aborde les aspects d'évaluation des paramètres de base individuellement et décrit les indices qui permettent de prédire les conditions de confort et de contrainte thermique.

La quantification systématique et a priori des conditions de travail à la chaleur n'est cependant pas recommandée et une stratégie générale de gestion des ambiances thermiques de travail est proposée organisant la collaboration des salariés, de l'encadrement technique et des préventeurs en vue d'une prévention efficace. Les quatre niveaux d'intervention de cette stratégie sont décrits, de même que les méthodes principales de prévention.

L'article se termine en abordant les risques pour la santé et les moyens de les prévenir par une la sélection, la formation, l'acclimatement et la surveillance des personnes exposées.

Mots clés: Contraintes thermiques; Thermorégulation; WBGT; Astreinte Thermique Prédite; Stratégie SOBANE; Prévention; Surveillance de la santé

Summary

After reviewing the basic principles of work in heat, the European regulation and the standards on which it is based, the article approaches the aspects of evaluation of the basic parameters individually and described the indices which make it possible to predict the conditions of comfort and thermal stress.

The systematic and a priori quantification of the working conditions is however not recommended and a general strategy for the management of the thermal work environment is proposed, organizing the cooperation between the employees, the technical staff and the occupational health advisers for an effective prevention. The four levels of intervention of this strategy are described, as well as the main prevention methods.

The article ends by describing the health risks and the means of preventing them by selection, training, acclimatization and monitoring of the exposed workers.

Key-words: Thermal strain; Thermoregulation; WBGT; Predicted Heat Strain; SOBANE strategy; Prevention; Health surveillance

I. LES PRINCIPES DE BASE

I.1. Introduction

Dans les conditions habituelles de vie, l'homme maintient sa température corporelle à un niveau constant proche de 37°C, grâce à des mécanismes de régulation. Cette stabilité de la température implique l'équivalence entre: la production de chaleur à l'intérieur du corps et les pertes de chaleur vers le milieu extérieur. La chaleur est produite par le métabolisme, qui augmente avec la charge physique de travail. Les pertes se font:

- par convection en réchauffant l'air ambiant: cette perte dépend de la différence de température entre la peau et l'air, de la vitesse de l'air sur la peau et de l'isolement thermique du vêtement. Si la température de l'air est plus élevée que celle de la peau, il s'agit d'un gain et non d'une perte de chaleur.
- par rayonnement: la peau émet un rayonnement infrarouge fonction de sa température et de son émissivité; elle capte aussi un rayonnement infrarouge venant de son environnement. La perte est fonction des températures des surfaces et de leur émissivité, donc, en particulier, de l'émissivité du vêtement. De nouveau, si la température moyenne des parois est supérieure à celle de la peau, il s'agit d'un gain de chaleur.
- par évaporation: si le sujet transpire, la sueur s'évapore sur la peau d'autant plus que l'air ambiant est sec, que la vitesse de l'air sur la peau est élevée et que le vêtement est perméable à la vapeur. Pour s'évaporer, la sueur a besoin de chaleur qu'elle prend à la peau: celle-ci se refroidit. De même, si l'environnement est extrêmement humide, il pourrait se faire que l'humidité ambiante se condense sur la peau, mais ceci serait exceptionnel.
- par échange respiratoire: l'air inspiré est froid et relativement sec, il ressort des poumons à environ 35°C et très humide. Il s'est réchauffé et humidifié en refroidissant les voies respiratoires.

Le bilan thermique est donc fonction de 6 facteurs: la température de l'air, l'humidité de l'air, le rayonnement de chaleur, la vitesse de l'air, la production de chaleur et le vêtement.

Pour juger si une situation de travail est acceptable, il faut considérer ces 6 facteurs[1].

On parle de **confort thermique** lorsque la personne ne souhaite avoir ni plus chaud ni plus froid. Dans des conditions de confort, la personne ne transpire presque pas, la charge physique de travail est faible, le vêtement est léger, il n'y a presque pas de rayonnement de chaleur et la température doit être comprise entre 18 et 25°C.

S'il fait **plus chaud**, la situation de travail devient:

- inconfortable: le sujet transpire de plus en plus et enlève ses vêtements;
- dangereuse avec un risque de déshydratation et de crampes de chaleur si le sujet transpire abondamment et ne boit pas assez;

- dangereuse avec un risque de syncope ou de coup de chaleur si la température de son corps s'élève progressivement.

S'il fait **plus froid**, la situation de travail devient:

- inconfortable: le sujet a froid et ajoute des vêtements;
- très inconfortable avec un risque de refroidissement local si le sujet commence à frissonner fortement;
- dangereuse avec un risque d'hypothermie si le sujet perd trop de chaleur et que la température du corps baisse progressivement.

Le tableau 1 illustre ces différentes gammes de situations thermiques.

INSERER ICI le tableau 1

I.2. La réglementation européenne

La directive européenne 89/654 [2] définit les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les lieux de travail et en particulier pour les ambiances de travail. Il est important d'insister sur le fait que la directive prescrit des objectifs et non des moyens. La directive dit ce qu'il faut atteindre, elle ne dit pas comment. Par contre les normes ISO et CEN listées dans la section suivante définissent comment cela peut se faire.

Les textes de la directive sont:

" 7.1 . La température dans les locaux de travail doit être adéquate pour l'organisme humain pendant le temps de travail, compte tenu des méthodes de travail appliquées et des contraintes physiques imposées aux travailleurs .

7.2 . La température des locaux de repos, des locaux pour le personnel en service de permanence, des sanitaires, des cantines et des locaux de premiers secours doit répondre à la destination spécifique de ces locaux .

7.3 . Les fenêtres, les éclairages zénithaux et les parois vitrées doivent permettre d'éviter un ensoleillement excessif des lieux de travail, compte tenu du type de travail et de la nature du lieu de travail."

Cette directive a été traduite en loi nationale par les 15 pays européens. Puisqu'il s'agit de prescriptions minimales, les différents états peuvent avoir modifié ces spécifications en étant plus précis ou plus sévères.

I.3. Les normes internationales et européennes

Un comité d'experts internationaux élaborent depuis plus de 20 ans des normes ou codes de bonnes pratiques relatifs à l'ergonomie des ambiances thermiques de travail. Ce comité est commun à l'International Standard Organization (ISO) et au Comité Européen de Normalisation (CEN). La plupart des normes citées ci-après sont communes aux deux environnements de normalisation. La différence réside dans le fait que les normes CEN supplantent nécessairement toute autre norme nationale, afin d'uniformiser les approches dans l'Union Européenne. Nous citerons ici les normes par leur numéro ISO.

Ces normes peuvent grosso modo être groupées en 4 catégories.

I.3.1. Normes relatives aux données de base

- ISO 13731: Vocabulaire et symboles[3].
La norme tend à unifier la façon de faire référence aux différents paramètres intervenant dans les différentes normes.
- ISO 7726: Appareils de mesure des grandeurs physiques[4].
Cette norme s'adresse plus directement aux fabricants d'appareils de mesurage.
- ISO 8996: Détermination de la production de chaleur métabolique[5].
Cette norme décrit 4 niveaux de méthodes, de complexité croissante, permettant d'évaluer la charge de travail, la dépense énergétique et donc la production interne de chaleur.
Nous en décrivons le contenu en section II.1
- ISO 9920: Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire[6].
Le contenu sera discuté en section II.6

I.3.2. Normes relatives à l'évaluation du risque

- ISO 11079: Détermination de l'isolement requis des vêtements[7].
Cette norme concerne l'évaluation des ambiances très froides et définit comme indice de sévérité l'isolement thermique requis par le vêtement pour que le bilan thermique du corps soit assuré.
- ISO 7730: Détermination analytique et interprétation du confort thermique à l'aide des calculs des indices PMV et PPD et confort thermique local [8].
Cette norme décrit les indices "Predicted Mean Vote" et "Predicted Percentage of Dissatisfied" qui sont recommandés pour évaluer les situations de confort.
Le contenu sera discuté en section III.1
- ISO 7243: Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir)[9].
Cette norme décrit l'indice thermique Wet Bulb Globe Temperature préconisé comme méthode de dépistage des conditions thermiques susceptibles d'être dangereuses.
Le contenu sera discuté en section III.2
- ISO 7933: Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible[10].
La norme décrit les principes de l'indice Predicted Heat Strain recommandé pour étudier de manière plus précise les situations de contrainte thermique par la chaleur et optimiser les conditions d'exposition.
Le contenu sera discuté en section III.3
- ISO 15265: Stratégie d'évaluation du risque pour la prévention de contrainte ou d'inconfort dans des conditions de travail thermiques[11].
Cette norme décrit une méthode permettant de gérer avec les travailleurs et les responsables d'entreprises les situations de travail à la chaleur, en évitant les mesurages non représentatifs et inutiles.
Le contenu sera discuté en section IV

I.3.3. Normes d'évaluation directe de la contrainte

- ISO 9886: Évaluation de l'astreinte thermique par mesurages physiologiques[12].
Cette norme, importante pour les médecins du travail, décrit les principes des différentes méthodes de mesurage de la contrainte physiologique: mesurages de température centrale, de fréquence cardiaque, de perte de poids et de température de la peau.
Le contenu sera présenté brièvement en section VI.6
- ISO 10551: Évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs[13].
Cette norme recommande les échelles à utiliser pour questionner les personnes sur la sévérité de leurs conditions de travail.
- ISO 12894: Surveillance médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes[14].
Cette norme concerne essentiellement les médecins et aborde les aspects de surveillance de la santé des travailleurs exposés à la chaleur ou au froid.
Certains éléments de cette norme sont repris dans la section VI

I.3.4. Divers

Un certain nombre d'autres normes plus spécialisées concernent les températures de contact admissibles les plus chaudes et les plus froides[15,16] , le confort au sein des véhicules... Elles ne seront pas abordées ici.

II. L'EVALUATION DES PARAMETRES DE BASE

II.1. Evaluation de la charge physique de travail

II.1.1. Introduction

Le métabolisme est le coût énergétique de la charge musculaire associé à la conversion des sucres et graisses en énergie mécanique et thermique. Ce métabolisme influence de manière déterminante le confort ou la contrainte résultant de l'exposition à un environnement thermique. En particulier, dans

des climats chauds, un métabolisme élevé aggrave la contrainte due à la chaleur, puisque l'énergie correspondante doit être perdue.

L'efficacité mécanique du travail musculaire, c'est-à-dire le travail "utile", est faible. Dans la plupart des travaux industriels, elle est à ce point faible (quelques %) qu'elle peut être supposée égale à zéro. Ceci signifie que l'énergie totale liée au travail est supposée transformée en chaleur.

La norme ISO 8996 décrit les différentes approches pour déterminer le métabolisme, ainsi que leur précision. De manière analogue à la stratégie **SOBANE** (voir section IV), quatre niveaux sont considérés:

- **Niveau 1, Dépistage:** Deux méthodes simples et faciles sont proposées pour caractériser rapidement la charge physique de travail moyenne pour une profession donnée ou pour une activité donnée. On retiendra ici la méthode basée sur le type d'activité. Ces méthodes fournissent une évaluation grossière et peu précise.
- **Niveau 2, Observation:** Deux méthodes sont proposées pour des personnes ayant une connaissance parfaite des conditions de travail, mais sans nécessairement une formation en physiologie du travail. Elles permettent de caractériser la charge moyenne dans une situation de travail à un instant spécifique:
 - méthode A: le métabolisme est déterminé en fonction de la posture du corps et des segments corporels et des efforts: cette méthode décrite ci-dessous;
 - méthode B: le métabolisme moyen est déterminé directement pour un ensemble de tâches particulières.

Dans les situations de travail qui impliquent un cycle de différentes activités, une étude des temps est nécessaire pour déterminer le métabolisme moyen. La précision reste faible.

- **Niveau 3, Analyse:** Le métabolisme moyen est déterminé à partir d'un enregistrement de fréquence cardiaque durant une période de travail représentative. Cette méthode de détermination indirecte du métabolisme est basée sur la relation existant entre la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque dans des conditions définies. La méthode s'adresse aux personnes qualifiées en santé au travail.
- **Niveau 4, Expertise:** Les méthodes disponibles à ce niveau sont le mesurage de la consommation d'oxygène et la méthode directe par calorimétrie. Elles s'adressent aux experts et ne seront pas décrites ci-après.

Les facteurs principaux affectant la précision sont:

- les différences individuelles;
- les différences dans l'équipement de travail;
- les variations dans la vitesse de travail;
- les différences de techniques de travail et de compétences professionnelles;
- les différences de genre et de caractéristiques anthropométriques;
- les différences culturelles;
- lors de l'utilisation des tableaux, les différences entre observateurs et leur niveau de formation;
- en utilisant le niveau 3, la précision de la relation entre la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène, et la présence d'autres facteurs influençant la fréquence cardiaque.

II.1.2. Niveau 1, Dépistage

Le tableau 2 définit 5 classes de métabolisme: repos, léger, moyen, lourd, très lourd.

Ces qualificatifs sont utilisés pour un travail en continu de 8 h (en tenant compte des pauses habituelles). Ils n'ont pas de sens pour un travail occasionnel de quelques instants.

Exemple: monter un escalier est un travail très lourd s'il doit être fait pendant 8 h en continu; c'est tout à fait acceptable si cela dure 30 secondes.

Pour chaque classe, la moyenne et la gamme des valeurs de métabolisme sont indiquées ainsi qu'un certain nombre d'exemples. Ces activités sont censées inclure de courtes pauses de détente.

INSERER ICI le tableau 2

II.1.3. Niveau 2, Observation

Le métabolisme est ici estimé à partir des observations suivantes:

- le segment du corps impliqué dans le travail: les deux mains, un bras, deux bras, le corps entier;
- la charge physique de travail pour ce segment de corps: léger, moyen, lourd;
- la posture du corps: au repos, à genoux, accroupi, debout, debout penché.

Le tableau 3 donne la valeur moyenne et la gamme des métabolismes pour une personne standard, assise, en fonction du segment corporel impliqué et de la charge physique de travail.

Le tableau 4 donne les corrections à ajouter quand le sujet n'est pas assis.

Il ne s'agit plus de charge de travail "légère", "moyenne" et "lourde" pour une durée de travail de 8h, mais d'une valeur absolue instantanée. La charge doit être appréciée selon les capacités moyennes des salariés et NON en fonction des capacités d'un salarié particulier, ni, a fortiori, de l'observateur.

INSERER ICI le tableau 3

INSERER ICI le tableau 4

Pour déterminer le métabolisme moyen sur une phase de travail, il est nécessaire d'effectuer une étude des temps d'exécution qui inclut une description détaillée du travail. Ceci demande de classer chaque activité en tenant compte de facteurs tels que les distances parcourues, les hauteurs, les poids manipulés, le nombre d'actions effectuées...

Le métabolisme pour un cycle de travail est alors déterminé par la moyenne dans le temps des métabolismes des diverses activités.

II.1.4. Niveau 3, Analyse

La fréquence cardiaque (FC) s'élève lorsque le métabolisme est plus important. Il existe une relation entre les deux valeurs. Cette relation peut être prédite pour un sujet à partir de son poids et de son âge, de sorte que le métabolisme peut être dérivé de la FC[17].

La précision de cette prévision est variable.

En effet, la fréquence cardiaque à un moment donné est la somme de plusieurs composantes.

$$FC = FC_0 + \Delta FC_M + \Delta FC_S + \Delta FC_T + \Delta FC_N + \Delta FC_E$$

où

- FC_0 est la fréquence cardiaque, en battements par minute, au repos, en position couchée, dans des conditions thermiques neutres;
- ΔFC_M est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la charge musculaire dynamique, dans des conditions thermiques neutres;
- ΔFC_S est l'augmentation de la fréquence cardiaque due au travail musculaire statique. Cette composante dépend de la relation entre la force utilisée et la force volontaire maximale du groupe musculaire en fonctionnement;
- ΔFC_T est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la contrainte thermique;
- ΔFC_N est l'augmentation de la fréquence cardiaque due à la charge mentale;
- ΔFC_E est la composante résiduelle de la fréquence cardiaque due, par exemple, aux effets respiratoires, au rythme circadien, à la déshydratation.

Dans le cas du travail dynamique utilisant les groupes musculaires principaux, avec peu de charge musculaire statique et en l'absence de contrainte thermique et de charge mentale, le métabolisme moyen peut être estimé avec assez bien de précision si la période de travail considérée est assez longue.

Par contre, la précision est faible si la composante mentale est élevée ou le travail statique important ou si on ne tient pas compte d'une éventuelle élévation d'origine thermique.

La précision est aussi fonction de la méthode de mesurage de la FC. Celle-ci peut être enregistrée sans interruption, par exemple en utilisant un équipement télémétrique, ou peut être mesurée manuellement, avec une précision réduite, en comptant les pulsations artérielles.

II.2. Mesurage de la température de l'air

II.2.1. Principes de base

De nombreux capteurs mécaniques ou électroniques sont disponibles pour mesurer la température de l'air. Les erreurs de mesurage sont dues :

- à l'inertie du capteur: sa réponse à une variation de température n'est pas instantanée mais présente une constante de temps d'autant plus courte que le capteur est petit (et donc de faible capacité thermique) et que la convection autour du capteur est importante;
- aux échanges par rayonnement avec l'environnement particulier de mesurage.
Quel que soit le type utilisé, l'élément sensible du capteur doit être soigneusement protégé du rayonnement.

II.2.2. Mesurages

La procédure de mesurage recommandée comprend 2 phases:

- Mesurages qualitatifs à long terme:
Un thermohygrographe ou datalogger placé au poste de travail pendant 1 à 2 semaines, permet d'étudier les variations de la température au cours du temps et de déterminer une période représentative pendant laquelle des mesurages quantitatifs précis peuvent être réalisés.
- Mesurages quantitatifs:
Des mesurages ponctuels peuvent être réalisés durant cette période représentative, au moyen d'un appareil étalonné à faible temps de réponse. L'appareil de mesurage est placé au poste de travail à 1,5 m de hauteur en écartant les salariés et en abritant le capteur contre le rayonnement (soleil, four...). La durée de stabilisation de l'appareil dépend de celui-ci et varie de quelques secondes à 10 min pour un appareil électronique. La précision souhaitée est de 0,2°C entre 10 et 30°C, et de 0,5°C en dehors.

II.3. Mesurage de l'humidité de l'air

II.3.1. Principes de base

Les grandeurs d'humidité les plus utilisées sont :

- la pression partielle de vapeur d'eau: pression qu'exercerait la vapeur d'eau si elle occupait seule le volume occupé par l'air humide.
- l'humidité relative (HR) qui est 100 fois le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau existante et la pression de vapeur saturante à la même température
- la température humide (t_h) qui est la température minimale atteinte par une nappe d'eau soumise à une évaporation intense au contact de l'air ventilé à grande vitesse et en l'absence de tout apport calorifique extérieur.

Des expressions mathématiques et le diagramme psychrométrique permettent de passer d'une caractéristique à l'autre.

Les hygromètres mesurent l'humidité relative. Les appareils électroniques ont, en général, un temps de réponse relativement court. Il faut insister sur la nécessité de les réétalonner à intervalles réguliers, tant en température qu'en humidité.

Les thermohygromètres mesurent l'allongement ou le rétrécissement d'une fibre hygroscopique en fonction de l'humidité relative. Leur temps de réponse est très long. Leur intérêt principal est de permettre aisément l'enregistrement continu de l'humidité relative durant une journée ou une semaine. Ces appareils ne sont guère précis et les mesurages sont essentiellement qualitatifs.

II.3.2. Mesurages

La procédure de mesurage recommandée comprend de nouveau 2 phases:

- Mesurages qualitatifs à long terme:
Le thermohygrographe ou datalogger placé au poste de travail pendant 1 à 2 semaines permet tout autant d'étudier les variations de l'humidité relative au cours du temps et de déterminer une période représentative pendant laquelle des mesurages quantitatifs précis peuvent être réalisés.
- Mesurages quantitatifs:
Des mesurages ponctuels peuvent être réalisés durant cette période représentative, au moyen d'un hygromètre. L'appareil est placé au poste de travail à 1,5 m de hauteur en écartant les salariés et en abritant le capteur contre le rayonnement. La durée de stabilisation de l'appareil dépend du temps de réponse de l'appareil. La précision souhaitée est de 5%.

II.4. Evaluation du rayonnement thermique

II.4.1. Principes de base

Le rayonnement thermique est évalué à partir de la température moyenne de rayonnement qui est la température de surface d'une sphère de grand diamètre, noire, mate, centrée sur le sujet qui échangerait avec lui la même quantité de chaleur par rayonnement que l'environnement de travail.

Elle est en général déterminée indirectement au moyen d'un thermomètre à globe noir. Cet appareil consiste en un thermomètre ordinaire dont le bulbe est situé au centre d'une sphère complètement fermée, en cuivre et peinte en noir mat. Cette sphère, placée dans la zone de travail, est soumise aux échanges par convection et rayonnement. La température du globe dépend donc non seulement du rayonnement, mais également de la température de l'air et de la vitesse de l'air. Elle dépend également du diamètre du globe.

Une expression mathématique permet d'en dériver la température moyenne de rayonnement.

II.4.2. Mesurages

L'appareil est placé au poste de travail à 1,5 m de hauteur, toujours en tenant les salariés écartés durant une période représentative d'exposition. Les erreurs de mesurage les plus courantes sont dues à l'émissivité du globe qui doit rester noir mat, mais surtout au temps de réponse du globe. Celui-ci est de l'ordre de 15 à 30 minutes selon le type de globe utilisé, le type de capteur et les conditions ambiantes. Cela signifie que le mesurage n'est valable que si le climat est stable pendant cet intervalle de temps. Si l'ambiance varie (four qui s'ouvre et se ferme toutes les minutes par exemple), le mesurage n'a aucun sens.

Des appareils et des techniques coûteux et sophistiqués permettent de mesurer les températures planes de rayonnement dans 6 directions orthogonales et par recombinaison vectorielle d'en dériver la température moyenne de rayonnement. Ceci relève d'experts.

II.5. Mesurage de la vitesse de l'air

II.5.1. Principes de base

Le mesurage de la vitesse de l'air doit être omnidirectionnel, c'est-à-dire indépendant de la direction du courant d'air.

Les appareils de mesurage de la vitesse de l'air peuvent être classés en deux catégories: les anémomètres à ailettes et les anémomètres thermiques.

II.5.2. Anémomètres à ailettes

Le mesurage est discontinu et donne la vitesse moyenne sur un intervalle de temps. Ils présentent deux limitations importantes. Ils sont hautement directionnels: l'axe de rotation doit être placé dans la direction du courant d'air. Si cette direction est variable, ou si, principalement aux basses vitesses, elle ne peut être déterminée avec précision, l'erreur relative sur les mesurages peut être importante. D'autre part, la gamme de mesurage s'étend de quelque 0,3 m/s à 5 m/s, voire 20 m/s. Cette limitation aux basses vitesses s'avère importante lorsqu'il s'agit, notamment, d'analyser une situation de confort thermique où il est généralement recommandé de ne pas dépasser des vitesses de 0,25 m/s.

II.5.3. Anémomètres thermiques

Ces appareils permettent de mesurer des vitesses comprises entre 0 et 5 m/s, avec un temps de réponse très court. Ils sont de petite taille et procurent donc des mesurages très ponctuels. Malgré les dimensions réduites de leur capteur, les anémomètres thermiques les plus courants s'avèrent assez directionnels.

II.6. Evaluation de l'isolement thermique des vêtements

Il existe différents types de vêtements qui protègent:

- Contre la chaleur: la gamme s'étend du vêtement peu isolant (chemisette) à très isolant (veste d'hiver).
- Contre le rayonnement grâce à des matériaux aluminisés: la protection est d'autant plus importante que la surface du corps recouverte est grande.
- Contre les liquides (pluie...): le vêtement doit être imperméable à la pluie mais doit laisser passer la transpiration.

- Contre les gaz (vapeurs, solvants...): ces vêtements doivent être totalement imperméables et sont très vite inconfortables car la transpiration n'est pas évacuée et le corps devient tout mouillé.
- Contre le froid: vêtements isolants, perméables à la transpiration sans omettre de couvrir les extrémités (bras, mains, jambes et pieds).

Des vêtements spéciaux sous forme de combinaisons étanches existent pour des conditions de travail très particulières (déflocage (amiante), industrie pharmaceutique, industrie électronique...)[18].

II.6.1. Isolement contre la chaleur

L'isolement thermique du vêtement s'exprime en $^{\circ}\text{C m}^2 \text{W}^{-1}$. Cette unité physique étant quelque peu difficile à utiliser, il a été choisi d'exprimer l'isolement par comparaison avec l'isolement thermique d'une tenue complète masculine, avec sous-vêtements, pantalons, chemise fermée au cou et aux poignet et veston ordinaire d'hiver. L'isolement de cette tenue de référence a été défini comme étant 1 clo.

La norme ISO 9920 donne l'isolement thermique mesuré sur mannequin statique pour toute une série de combinaisons vestimentaires. L'isolement pratique est cependant bien différent du fait de l'activité du salarié. Les mouvements produisent un effet de "pompage" de l'air sous le vêtement qui réduit fortement l'isolement. La réduction est fonction du type d'activités, de mouvements et de déplacements, de la texture du tissu, de la vitesse de l'air. Le tableau 5 donne les ordres de grandeur utilisables sur le terrain.

INSERER ICI le tableau 5

II.6.2. Isolement contre le rayonnement

La protection contre le rayonnement s'obtient au moyen de matériaux aluminés. Une peinture aluminée réduit le rayonnement de 60%; une feuille d'aluminium brillant de 80% et une métallisation à l'aluminium sous vide de 95%.

Cette réduction est limitée aux surfaces couvertes, soit à 35% de la surface corporelle par une veste aluminée; 20% par des manches et des gants aluminés et 40% par un pantalon et des souliers aluminés.

Le vêtement aluminé peut nuire à l'évaporation de la sueur de sorte que l'avantage au point de vue rayonnement soit réduit, annulé et parfois aggravé par une réduction de l'évaporation.

Le fabricant doit être consulté pour connaître les caractéristiques exactes du vêtement et son comportement dans le temps. L'efficacité du vêtement aluminé est très rapidement réduite par la salissure, le vieillissement...

II.6.3. Isolement contre l'évaporation

Lors des essais sur mannequin, il est possible également de mesurer la perméabilité du vêtement à la vapeur d'eau même pour un revêtement en coton ordinaire. La perméabilité diminue avec le poids et l'épaisseur du vêtement et donc son isolement thermique. Il est à fortiori réduit pour des matériaux en fibres synthétiques.

Les vêtements imperméables à l'air doivent rester perméables à la vapeur d'eau sous peine de créer un microclimat qui peut entraîner une contrainte thermique. Certaines fibres permettent cette diffusion de la vapeur.

Les vêtements perdent une grande partie de leur isolement et de leur perméabilité lorsqu'ils sont humides. Il est donc nécessaire de les sécher au plus vite, autant lorsqu'il s'agit d'humidité extérieure que quand le vêtement s'est chargé de transpiration.

II.6.4. Protection étanche

Les combinaisons étanches sont utilisées dans l'industrie chimique, nucléaire, pharmaceutique, électronique... Certaines sont totalement imperméables à l'eau et à la vapeur; d'autres sont ventilées intérieurement.

En-dessous de la combinaison se crée très rapidement un environnement saturé en vapeur d'eau qui empêche fortement les pertes de chaleur. La durée de travail doit dès lors être fortement limitée pour éviter les cas d'hyperthermie.

Chaque type de combinaison et chaque situation de travail représente un cas particulier et une étude spécialisée est nécessaire dans chaque cas pour déterminer les conditions de travail permises.

III. LES INDICES CLIMATIQUES

III.1. Les indices de confort thermique (PMV - PPD)

III.1.1. Description

Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Cette sensation de confort peut être observée lorsque le bilan thermique est équilibré moyennant des valeurs optimales de température de peau et d'évaporation cutanée qui varient en fonction du métabolisme.

Les indices PMV-PPD décrits par la norme ISO 7730 permettent de déterminer les ensembles des 6 paramètres primaires (température, humidité et vitesse de l'air, rayonnement, métabolisme, vêtements) procurant ce confort.

En plus de la définition des conditions optimales de confort, ces indices permettent de quantifier la sensation de chaleur qui serait associée à des conditions quelque peu différentes.

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) prédit la valeur moyenne des votes d'un grand groupe de personnes sur l'échelle suivante de sensation thermique à 7 points:

- ✧ +3 très chaud
- ✧ +2 chaud
- ✧ +1 légèrement chaud
- ✧ 0 ni chaud, ni froid
- ✧ -1 légèrement froid
- ✧ -2 froid
- ✧ -3 très froid

A titre d'exemple, pour un travail sédentaire et une personne en tenue de ville (1 clo), si l'humidité relative est d'environ 50%, la vitesse de l'air de 0.2 m/s et en l'absence de rayonnement, la température d'air optimale est de 24° C (PMV = -0.04) et à 18° C, la sensation moyenne prédite serait "froid" (PMV = - 2).

Telle serait la moyenne des votes émis par un groupe de personnes. Cependant, bien que toutes étant dans les mêmes conditions (y compris de métabolisme et d'isolement) les sensations individuelles peuvent être très différentes.

La situation confortable est donc celle qui contente le plus de personnes ou en mécontente le moins possible.

Il est donc intéressant de prédire, dans une situation donnée, le pourcentage de gens "satisfaits" ou "insatisfaits" par rapport à l'environnement thermique. C'est l'objet de l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) défini comme étant le pourcentage de personnes qui, placées dans des conditions identiques, estiment avoir froid, très froid ou chaud, très chaud. Ce sont donc les personnes qui auraient émis un vote en-dehors de l'intervalle (-1, 1) sur l'échelle de sensation.

La figure 1 donne la correspondance entre les indices PMV et PPD.

INSERER ICI la figure 1

Cette figure montre qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des personnes quand elles ont toutes le même métabolisme et le même habillement. Dans le cas le plus favorable (PMV = 0), il subsiste 5% d'insatisfaits (PPD = 5%). Ces personnes vont spontanément varier leur tenue vestimentaire pour trouver le confort.

La figure montre également que le taux d'insatisfaction augmente de la même manière si le PMV s'écarte de 0 vers le froid ou vers le chaud.

III.1.2. Valeurs optimales:

Pour obtenir une situation de confort thermique, il est recommandé que le PPD soit inférieur à 10%, ce qui correspond à un PMV compris entre -0,5 et +0,5

En plus, il est recommandé que la vitesse de l'air reste en dessous de 0,5 m/s et d'autant plus basse en moyenne que les fluctuations sont importantes. Des vitesses d'air supérieures ne sont tolérées que durant de courtes périodes lors de travaux exceptionnels. Elles sont toujours inconfortables du fait du refroidissement différentiel de la peau qu'elles entraînent.

L'humidité relative devrait rester entre 30 et 70% dans la gamme de 18° C à 24° C de température ambiante. Des humidités plus faibles entraînent des assèchements des voies respiratoires et des

muqueuses et augmentent le risque de maladies de type hivernal. Des humidités supérieures donnent lieu à des condensations sur les surfaces froides et à un risque de prolifération microbienne.

III.2. L'indice WBGT

L'indice "Wet Bulb Globe Temperature" (WBGT) constitue le critère d'évaluation adopté pour la protection des salariés dans la législation du travail de plusieurs pays. Il est décrit par la norme ISO 7243 qui le propose comme une méthode d'approche des conditions de travail à la chaleur. En cas de dépassement des valeurs de référence, une analyse plus détaillée doit être menée sur base de l'indice Predicted Heat Strain exposé ci-dessous.

Il est applicable pour l'évaluation de l'effet moyen de la chaleur sur l'homme durant une période représentative de son activité mais non pour l'évaluation de la contrainte thermique durant de très courtes périodes, ni pour l'évaluation de la contrainte thermique dans des conditions proches de la zone de confort.

L'indice WBGT est défini comme suit:

$$\begin{aligned} \text{WBGT} &= 0,7 t_{\text{hn}} + 0,3 t_g && \text{(sans rayonnement solaire)} \\ &= 0,7 t_{\text{hn}} + 0,2 t_g + 0,1 t_a && \text{(en cas de rayonnement solaire)} \end{aligned}$$

où : t_{hn} est la température humide naturelle
 t_g est la température du globe noir (15 cm de diamètre)
 t_a est la température de l'air.

Cette modification du mode de calcul en cas de rayonnement solaire est dû à la verticalité de l'exposition solaire et à la différence de longueur d'onde par rapport au rayonnement d'objets chauds.

La température humide naturelle est la température d'un thermomètre dont le capteur est mouillé et donc refroidi par évaporation mais qui est soumis au courant d'air et au rayonnement existant au poste de travail. Il ne s'agit pas d'un paramètre reproductible car le résultat dépend de facteurs tels que la surface et l'état du capteur, son degré d'humidification... .

L'indice WBGT ne doit pas être confondu avec une température. Le tableau 6 donne quelques ordres de grandeur dans des situations de bureau et industrielles et illustre les différences.

INSERER ICI le tableau 6

Selon la norme ISO 7243, l'indice peut être utilisé pour organiser l'alternance des périodes de travail et de repos lorsque les valeurs limites sont dépassées. Les valeurs limites sont reprises au tableau 7.

INSERER ICI le tableau 7

L'indice WBGT présente un champ d'application assez limité du fait même de sa relative simplicité:

- sa détermination est basée principalement sur deux températures dont l'une (t_g) est susceptible d'erreurs de mesurages importantes et dont l'autre (t_{hn}) présente une reproductibilité médiocre;
- deux (ou trois le plus souvent) des quatre paramètres climatiques de base n'étant pas connus, il est évident que l'indice ne permet pas d'apprécier comment il convient d'agir pour réduire la contrainte.

On peut donc conclure que, en pratique, une valeur WBGT proche, égale ou supérieure à la limite recommandée implique:

- l'existence d'un risque potentiel de contrainte thermique en cas d'exposition continue;
- la nécessité d'une analyse plus approfondie de la situation.

III.3. L'indice Predicted Heat Strain (PHS)

III.3.1. Présentation

L'indice Predicted Heat Strain (PHS) décrit par la norme ISO 7933 est en réalité un modèle mathématique du comportement physiologique à la chaleur d'un homme moyen.

Cette méthode permet une *approche beaucoup plus précise* que la méthode basée sur l'indice WBGT. A partir des 6 facteurs de base, il prédit l'évolution au cours du temps de la sudation et de la température centrale du corps.

Les valeurs prédites à un moment donné tiennent compte, non seulement des conditions climatiques et de travail existant à cet instant, mais de toute l'histoire antérieure d'exposition de la personne.

Il permet également de déterminer la durée maximale de travail admissible (DLE = durée limite d'exposition) pour que 95% des sujets ne courent aucun risque de déshydratation importante ou pour que le sujet moyen standard n'atteigne pas une valeur de température centrale de 38°C[19].

Le modèle PHS donne donc, à un moment donné, la perte sudorale et la température centrale du sujet, en fonction de tout ce à quoi il a été exposé précédemment.

III.3.2. Limite de la température interne

Le rapport technique n° 412 de l'OMS publié en 1969[20] mentionnait que: "il est déconseillé que la température centrale du corps excède 38°C pour une exposition quotidienne prolongée au travail lourd...". Cette valeur de 38°C a depuis lors été considérée comme la valeur maximale pour que la probabilité qu'un problème dû à la chaleur soit négligeable.

En réalité, deux températures rectales maximales pourraient être adoptées[21]:

- 39,2°C: qui peut rapidement mener à une incapacité totale chez la plupart des sujets masculins, avec des changements physiologiques excessifs et souvent dérangeants.
- 42°C: la température interne maximale pour éviter toutes séquelles physiologiques.

Dans les ambiances où la température rectale moyenne serait amenée à 38°C, on peut prévoir que les probabilités d'atteindre ces limites seront:

- pour 42°C: moins de 10⁻⁶ (moins d'un coup de chaleur grave tous les 4 ans parmi 1000 travailleurs, 250 jours/an).
- pour 39,2°C: moins de 10⁻³ (moins de 1 personne en danger parmi 1000 journées de travail).

La température rectale moyenne limite de 38°C suggérée par l'OMS a donc été confirmée.

Il convient d'insister sur le fait que, à une température rectale de 38°C, un salarié donné ne court aucun risque de santé. Cette valeur limite concerne le sujet "moyen" et est destinée à protéger les salariés qui, du fait d'une plus grande intolérance à la chaleur, évoluerait vers des températures supérieures, dans les mêmes conditions.

III.3.3. Déshydratation et perte hydrique maximale

Candas et al. (1985)[22] ont rapporté qu'une déshydratation de 3% de la masse corporelle induit une fréquence cardiaque accrue et diminue la sensibilité de la sudation. Cette valeur de 3% peut dès lors être acceptée comme la déshydratation maximale dans l'industrie (pas à l'armée ou pour des sportifs). Kampmann (1997) [23] a montré que, dans des mines de charbon, après une exposition de 4 à 8 heures, 95% des travailleurs avaient un taux de réhydratation supérieur à 40% et que 50% des travailleurs avaient compensé 60% de leur perte hydrique, quelle que soit la quantité totale de sueur produite.

Partant de ces valeurs, il peut être proposé que la perte hydrique maximale, compte tenu des compensations normales, soit égale à 7,5% de la masse corporelle pour un sujet moyen et à 5% de la masse corporelle pour 95% de la population active.

L'avantage primordial du modèle PHS est de permettre la recherche de l'organisation du travail minimisant ces effets physiologiques, en intercalant de courtes périodes de repos au cours du travail. Il permet également d'organiser la distribution de boissons de manière à compenser au plus tôt les pertes hydriques.

Ce modèle PHS a été validé à partir de données provenant de 672 expériences menées en laboratoire [24,25,26]. Le modèle s'avère fournir des prédictions raisonnablement précises, compte tenu des différences interindividuelles de réponse physiologique à la chaleur.

Les résultats obtenus par le modèle PHS ont également été testés dans 237 expériences sur le terrain: la prédiction peut être considérée comme satisfaisante, en considérant le fait que la précision des données primaires recueillies sur le terrain est généralement réduite.

Le modèle PHS s'avère nettement plus discriminant que l'indice WBGT pour définir la sévérité de la contrainte thermique dans une situation de travail et pour organiser le travail dans le but de minimiser ou éliminer la contrainte thermique.

Le programme permettant le calcul du modèle PHS peut être téléchargé du site web de l'auteur du présent chapitre (www.md.ucl.ac.be/hytr/).

IV. LA STRATEGIE GENERALE DE GESTION DES AMBIANCES THERMIQUES DE TRAVAIL

IV.1. Principes

L'élimination des risques ou leur réduction sous un seuil acceptable ne peut se faire au premier abord de la situation de travail que si toutes les compétences et tous les moyens sont a priori disponibles. Cependant, le nombre de facteurs de risque et le nombre de situations de travail sont à ce point grands qu'il serait utopique et impossible de vouloir les étudier tous et toutes, a priori, en détails. Ce serait d'ailleurs inutile, puisque, dans la majorité des cas, des mesures de prévention peuvent être prises d'emblée à partir de simples observations par les personnes directement concernées dans les entreprises et qui connaissent en détails les situations de travail. Dans certains cas seulement et lorsque les solutions évidentes ont été mises en oeuvre, une étude détaillée peut s'avérer nécessaire et ce ne sera que dans quelques cas particulièrement complexes que la participation d'experts deviendra indispensable.

La stratégie, appelée **SOBANE**[27,28] obéit à ce principe d'approche progressive des problèmes.

Elle comprend quatre niveaux successifs désignés par *Dépistage*, *Observation*, *Analyse* et *Expertise*.

IV.1.1. Niveau 1, Dépistage

Il s'agit ici seulement d'identifier les *problèmes* principaux et de remédier aux erreurs flagrantes. Cette identification est réalisée de manière interne par les salariés eux-mêmes et leur encadrement technique immédiat qui connaissent parfaitement leur situation de travail, quand bien même ils n'ont pas de formation ou n'ont qu'une formation rudimentaire en ce qui concerne les problèmes de santé au travail. Pour ce faire, l'outil doit être simple à comprendre et à utiliser. Ce *Dépistage* cherche à identifier les situations de travail à problème dans toutes les circonstances, au cours de la journée ou de l'année et non pas à un instant précis.

Lors de ce premier niveau, des *problèmes* sont déjà résolus. D'autres sont seulement identifiés. La méthode proposée est brièvement décrite en section IV.2

IV.1.2. Niveau 2, Observation

Les *problèmes* non résolus lors du niveau 1, *Dépistage*, doivent être approfondis. La méthode doit rester simple à assimiler et à mettre en oeuvre, rapide et peu coûteuse, de manière à pouvoir être utilisée le plus systématiquement possible par les salariés et leur encadrement technique avec la collaboration des préventeurs internes éventuels. L'essentiel est de nouveau d'amener ces personnes à réfléchir sur les différents aspects des conditions de travail et d'identifier au plus tôt les solutions de prévention. La méthode proposée est décrite dans la section IV.3

IV.1.3. Niveau 3, Analyse

Lorsque les niveaux de *Dépistage* et *Observation* ne permettent pas de ramener le risque à une valeur acceptable ou qu'un doute subsiste, il faut aller plus loin dans l'*Analyse* de ses composantes et dans la recherche de solutions. Cet approfondissement est réalisé avec l'assistance de *préventeurs* ayant la compétence requise et disposant des outils et des techniques nécessaires. Ces personnes sont en général des préventeurs externes à l'entreprise, intervenant en étroite collaboration avec les préventeurs internes (et non en leur lieu et place) pour leur apporter la compétence et les moyens nécessaires.

L'*Analyse* porte sur la situation de travail dans des circonstances particulières déterminées au terme du niveau 2, *Observation*. Elle peut requérir des mesurages simples avec des appareils courants, ces mesurages ayant des objectifs explicitement définis d'authentification des problèmes, de recherche des causes, d'optimisation des solutions...

La méthode proposée est décrite dans la section IV.4

IV.1.4. Niveau 4, Expertise

L'étude à ce niveau 4, *Expertise* concerne des situations particulièrement complexes et requiert éventuellement des mesurages spéciaux. Elle est à réaliser avec l'assistance supplémentaire d'experts très spécialisés. La méthode proposée est décrite dans la section IV.5

Cette stratégie fait l'objet du projet de norme ISO 15265. Elle a été mise en pratique et validée dans l'industrie [27,29,30].

IV.2. Niveau 1, Dépistage de la stratégie

La méthode de dépistage des problèmes thermiques fait partie d'une méthode globale de dépistage de tous les problèmes de la situation de travail qui conditionnent la santé et le bien-être des salariés.

Le tableau 8 est extrait de la méthode de Dépistage Participatif des Risques[27] qui comprend 18 tableaux semblables relatifs à 1. les aires de travail; 2. l'organisation technique entre postes; 3. les emplacements de travail; 4. les risques d'accident; 5. les commandes et signaux; 6. les outils et matériel de travail; 7. le travail répétitif; 8. les manutentions; 9. la charge mentale; 10. l'éclairage; 11. le bruit; 12. les ambiances thermiques; 13. les risques chimiques et biologiques; 14. les vibrations; 15. les relations de travail entre opérateurs; 16. l'environnement social local et général; 17. le contenu du travail; 18. l'environnement psychosocial.

L'objectif est clairement d'améliorer, non seulement les paramètres climatiques mais également les installations, les procédures travail, l'organisation du travail, le partage des responsabilités ... afin d'avoir un impact cohérent sur la situation de travail.

La méthode de dépistage participatif des risques in extenso peut être téléchargée du site de l'auteur (www.md.ucl.ac.be/hytr/).

La procédure d'utilisation consiste à réunir 2 ou 3 salariés et leur management technique direct connaissant parfaitement la situation de travail et son évolution au cours des saisons et des cycles de production.

La réunion consiste à passer en revue les points à surveiller pour chaque tableau et à rechercher, d'une part ce qui peut être fait directement et concrètement pour améliorer la situation et d'autre part ce qui requiert une étude plus approfondie. Pour chaque tableau, un jugement global est porté sous forme de feu vert (☺ acceptable), orange (☹ à améliorer si possible) rouge (☹ inacceptable à améliorer en priorité).

INSERER ICI le tableau 8

IV.3. Niveau 2, Observation

La procédure consiste à guider les salariés et leur encadrement afin de faire l'inventaire des circonstances dans lesquelles des problèmes thermiques se posent. Cet inventaire débute par la description succincte de la situation de travail: croquis, zones de travail, activités réelles dans chaque zone, salariés concernés, durées de travail. Il se poursuit avec le rappel par les salariés de l'ensemble des circonstances (été, travail de réparation, productions spéciales...) où des problèmes thermiques ont existés par le passé dans les conditions de fonctionnement actuelles.

Chacune de ces circonstances est étudiée ensuite séparément.

Dans un second temps le groupe de travail est invité à examiner dans chacune de ces circonstances quels facteurs sont responsables et comment les améliorer pour se rapprocher le plus possible d'une situation de travail satisfaisante définie par:

- ✧ une température entre 18 et 25°C,
- ✧ une humidité entre 30 et 70%,
- ✧ l'absence de rayonnement thermique,
- ✧ l'absence de courant d'air,
- ✧ une charge de travail légère,
- ✧ des vêtements ordinaires.

La procédure consiste, séparément pour chaque paramètre (température de l'air, humidité, rayonnement, courants d'air, charge de travail et vêtements) à:

- évaluer la situation actuelle; le tableau 9 donne les critères de jugement,
- localiser si possible sur le croquis de l'atelier les sources ou causes de ces déviations par rapport à l'idéal,
- décrire qualitativement leur importance,
- déterminer si ces déviations sont impérativement imposées par le processus industriel ou si elles peuvent être ramenées à des valeurs plus normales. Dans ce cas: envisager les solutions pour prévenir la situation.

- réévaluer, sur base des critères définis dans le tableau 9, la situation dans l'état espéré après mise en œuvre des solutions retenues.

INSERER ICI le tableau 9

INSERER ICI le tableau 10

Après avoir passé en revue la situation pour chaque paramètre climatique isolément, une synthèse est préparée.

Les scores dans la situation actuelle peuvent être reportés dans le tableau 10. Ce tableau donne une vision globale de la circonstance de travail concernée. Il permet d'évaluer la sévérité du problème thermique dans son ensemble et de déterminer si certains facteurs en compensent d'autres. La procédure consiste successivement à:

- Synthétiser les scores dans l'état actuel.
- Estimer si la situation est globalement acceptable ou s'il y a un problème de confort ou de contrainte thermique.
- Synthétiser les scores dans l'état futur si les modifications projetées sont réalisées.
- Estimer, de nouveau, si, après ces modifications, la situation sera acceptable ou s'il subsistera un problème de confort ou de contrainte thermique.
- Faire le bilan des mesures de prévention envisagées en précisant *qui fait quoi* et *quand*, par ordre de priorité.
- Discuter la nécessité d'une *Analyse* (niveau 3) plus approfondie et déterminer pour quels aspects et avec quelle urgence?
- Déterminer les mesures à prendre à court terme en ce qui concerne: les boissons, l'organisation du travail et les vêtements.

IV.4. Niveau 3, Analyse

Lorsqu'un problème subsiste au terme du niveau 2, *Observation*, il s'agit d'approfondir l'étude avec l'aide d'un préventeur possédant les compétences méthodologiques et les appareils de mesurages. La procédure consiste à:

- Approfondir la caractérisation de la situation de travail et la séquence des activités avec les durées moyennes et maximales;
- Déterminer la période de temps pendant laquelle les circonstances à problème existent;
- Choisir, au cours de cette période, une ou des journées représentatives quant au climat et au travail réalisé et durant lesquelles les mesurages seront réalisés;
- Déterminer les paramètres à évaluer;
- Estimer et mesurer ces paramètres dans les conditions moyennes et les plus pénibles durant ces journées représentatives;
- Calculer les indices thermiques pertinents:
 - ✦ PMV-PPD pour les situations inconfortables,
 - ✦ WBGT ou mieux Predicted Heat Strain (PHS) dans les conditions très chaudes avec l'estimation de la perte hydrique totale et de la température interne finale.
- Déterminer l'importance du risque actuel dans la situation moyenne et la situation extrême, sur base des critères suivants:

▪ Contrainte par froid:	PMV	< -2
▪ Inconfort par froid:	-2	< PMV < -0,5
▪ Confort:	-0,5	< PMV < 0,5
▪ Inconfort par chaleur:	0,5	< PMV < 2
▪ Contrainte à long terme:	DLE	< 480 min
▪ Contrainte à court terme:	DLE	< 120 min
▪ Contrainte immédiate:	DLE	< 30 min
- Déterminer les mesures de prévention complémentaires possibles: lutte technique, organisation du travail,...

- Déterminer le risque résiduel sur base des critères ci-dessus après mise en œuvre des mesures de prévention envisagées.
- Déterminer la nécessité et l'urgence d'une *Expertise* (niveau 4).
- Préciser les mesures à court terme à instaurer: boissons, pauses, protections individuelles...
- Préciser la surveillance de la santé éventuelle à instaurer: les critères d'affectation, la surveillance durant le travail...

IV.5. Niveau 4, Expertise

Il s'agit cette fois de réaliser des études particulières avec l'assistance (compétences et instrumentation) d'un expert, pour résoudre un problème probablement ponctuel qui n'a pas trouvé de solution satisfaisante encore au niveau 3, *Analyse*.

La méthodologie doit être appropriée au problème rencontré et on doit attendre que l'expert fasse les choix adéquats.

On se contentera d'insister ici sur le fait que l'expert seul ne peut valablement prendre en charge le problème parce qu'il ne dispose pas d'une *connaissance* suffisante de ce qui se passe réellement dans la situation de travail. Il vient donc bien en assistance aux personnes qui ont conduit les niveaux antérieurs. Ceux-ci lui auront défini sa mission, sur base des résultats et des questionnements aux niveaux 2, *Observation*, et 3, *Analyse*. La représentativité de son travail (conditions étudiées, moment, lieu,...) doit être assurée par les personnes de l'entreprise et le préventeur.

V. LA PREVENTION

V.1. Adaptation de l'organisation du travail

La planification des opérations et l'organisation de périodes de repos permettent de réduire le risque d'accidents dus à la chaleur.

V.1.1. Programmation des opérations

Il s'agit de programmer certains travaux, et en particulier les travaux lourds, durant les heures de la journée climatiquement les plus favorables (matin ou soir, la nuit éventuellement) ou durant les périodes de l'année les moins chaudes. Pour ce faire, ces travaux doivent être identifiés à partir du programme d'entretien des équipements chauds ou du relevé des incidents ayant justifié une intervention urgente. Certains ajustements sont aussi à apporter aux horaires du personnel.

V.1.2. Optimisation du cycle travail-repos

Comme indiqué, l'indice PHS permet de rechercher l'organisation du travail et les alternances travail-repos entraînant la contrainte thermique la plus faible.

Une alternative possible consiste à laisser le salarié choisir spontanément son rythme de travail ou à l'autoriser à arrêter ce travail dès qu'il ressent certains symptômes d'astreinte[31]. Certaines conditions doivent néanmoins être respectées pour garantir la sécurité de ce mode libre d'organisation du travail. Ceci ne vaut que pour des tâches routinières sans caractère d'urgence. Aucun incitant au travail, en particulier financier, visant à augmenter la cadence du travail ne peut exister. Enfin, les salariés doivent être formés à reconnaître les signes de contrainte et doivent rester encadrés par du personnel compétent.

V.2. Améliorations techniques

La situation de travail optimale est celle où:

- la température est entre 18 et 25°C
- l'humidité de l'air est ni trop faible, ni trop importante
- toutes les parois, fenêtres... sont à la même température que l'air et il n'y a pas de rayonnement thermique particulier
- l'air se déplace lentement sans courant d'air
- la personne est assise et le travail est léger
- les vêtements sont ordinaires et en coton

Toutes les mesures de prévention-amélioration doivent essayer de se rapprocher le plus possible de cette situation optimale.

V.2.1. Réduction de la température de l'air et de l'humidité

Ceci peut se faire de trois façons complémentaires

- **La réduction des apports ou déperditions de chaleur de ou vers l'extérieur:**

Il s'agit de réduire les échanges thermiques des murs et toitures par une meilleure isolation thermique (double toiture, utilisation de matériaux isolants); par une réflexion du rayonnement solaire en peignant les toitures en blanc (chaux) ou en les recouvrant d'un matériau réfléchissant (aluminium brillant) ou par un refroidissement extérieur (arrosage des toits, mais sans pénétration de l'eau dans les locaux).

Il s'agit de réduire également les échanges par les parois vitrées, en prévoyant une orientation des parois hors du rayonnement solaire; par un vitrage double ou réfléchissant le rayonnement infrarouge; ou par le placement de stores idéalement à l'extérieur (suppression de l'apport thermique dans le local).

Toutes les entrées d'eau (pluie, fuites...) doivent être éliminées.

- **La réduction des apports de chaleur ou de froid internes:** par le calfeutrage des surfaces froides, l'isolation thermique des surfaces chaudes (conduites, parois...); l'évacuation à la source des gaz chauds et humides générés (surtout si gaz de combustion), l'élimination de toutes les fuites d'eau et de vapeur.
- **La ventilation générale,** en ventilant avec de l'air extérieur, éventuellement refroidi ou chauffé à la température de confort. Le débit doit être calculé pour contrebalancer les apports en chaleur ou les déperditions thermiques.

V.2.2. Réduction du rayonnement thermique

Un écran noir placé entre la source et le salarié capte tout le rayonnement incident et est ainsi porté à haute température. Il réémet un rayonnement thermique important puisque à cette haute température et noir. L'efficacité reste très faible. Par contre, un écran quelconque recouvert sur les deux faces d'une feuille d'aluminium réfléchit la majeure partie du rayonnement, sa température reste modérée, la réémission d'un rayonnement thermique est faible et l'efficacité est grande. Si l'écran est constitué de deux plaques d'aluminium espacées de quelques centimètres, l'air circulant entre les plaques les refroidit et l'efficacité est totale.

Pour réduire le rayonnement thermique, il faut donc réduire au minimum l'exposition au rayonnement par des écrans pleins en aluminium ou placer des grillages en aluminium devant les surfaces devant être vues ou encore peindre en blanc ou, de préférence, en peinture aluminée les surfaces chaudes (telles que murs), s'il n'est pas possible d'en améliorer l'isolation thermique ou de les recouvrir d'un écran en aluminium.

V.2.3. Amélioration de la vitesse de l'air

Lorsque la vitesse de l'air augmente, les échanges avec la peau sont plus importants et les surfaces de peau exposées se refroidissent. Si la vitesse est trop élevée, les différences de températures entre surfaces de peau exposées et non exposées sont trop grandes, la situation devient inconfortable et elle n'est pas tolérée par le salarié, quant bien même elle contribuerait à l'équilibre thermique à long terme.

- Ainsi la vitesse supportée est de 1 m/s au maximum lors d'un travail en continu en position debout et pour un travail lourd et de 0,5 m/s au maximum et de préférence 0,2m/s lors d'un travail en continu en position assise.
- Dans le cas d'exposition de courte durée, la vitesse de l'air peut atteindre 3, voire 10 m/s à condition que la température de l'air ne soit pas trop élevée.
- Dans tous les cas, la température de l'air insufflée doit être la plus proche possible de la température de confort correspondant à l'activité du salarié.
- Les jets d'air vers le visage ou la nuque doivent être évités, la sensation de fraîcheur à court terme pouvant être associée à des douleurs musculaires à moyen terme.

V.2.4. Adaptation des vêtements aux conditions de travail

Comme vu ci-dessus, la caractéristique du vêtement à considérer est différente s'il s'agit d'un problème de convection, de rayonnement ou d'évaporation.

- En cas de rayonnement, il faut réduire les surfaces rayonnantes au minimum et prévoir des vêtements réfléchissants, surtout pour la partie du corps exposée (ex.: poitrine recouverte d'un tissu léger aluminé microperforé pour une diffusion de la vapeur, avec le dos et le reste du corps recouverts d'un tissu en coton léger).
- Si forte humidité, le tissu doit absorber la sueur et être perméable à la vapeur.

- Si contrainte par la chaleur, le vêtement doit être légèrement ample, permettant une ventilation interne, très peu isolant et le plus léger possible (attention: problème de sécurité avec les vêtements trop larges).
- S'il fait froid, la tenue vestimentaire doit être ni trop peu ni trop isolante, couvrant l'ensemble du corps (pieds, bras, mains, visage, tête).

Dans tous les cas, il est nécessaire de surveiller l'esthétique du vêtement, son adaptation au travail, son confort, ainsi que les possibilités de nettoyage.

V.2.5. Réduction de la charge physique de travail

Réduire le métabolisme, c'est-à-dire la production interne de chaleur est l'action la plus efficace. Il faut donc rechercher les façons de travailler pour éviter les efforts, les déplacements et adapter les outils de travail pour une préhension plus facile, une aide aux manutentions... Ces actions doivent être prises tout autant en dehors de la problématique du travail à la chaleur et ne seront pas développées ici.

V.3. Les boissons

Des boissons doivent être proposées dans le but d'éviter la déshydratation à long terme.

De façon spontanée, les salariés ne boivent pas durant leur exposition la quantité de liquide nécessaire pour compenser totalement les pertes dues à la sudation. Les salariés doivent donc être formés à boire régulièrement de petites quantités d'eau. L'indice PHS qui prédit la perte sudorale fournit des informations nécessaires pour organiser cette prise régulière de boissons.

Le déficit hydrique peut être limité par les mesures suivantes:

- Sélection de boissons agréables et réfrigérées: l'eau pure est la boisson la plus appropriée; du thé froid avec du citron ou une limonade non gazeuse peuvent aussi convenir. Toute boisson alcoolisée, gazeuse, sucrée ou excitante est à proscrire.
- La température de l'eau doit être maintenue entre 10 °C et 15 °C. L'eau glacée (3-4 °C) sortant d'un réfrigérateur est à déconseiller car elle entraîne des troubles gastriques et ne remplace que très lentement la sueur. La solution optimale consiste à installer des fontaines d'eau refroidie à 10 -15°C près des postes de travail. Il faut cependant veiller scrupuleusement à la propreté de ces fontaines.
- Organisation favorisant une interruption du travail toutes les 15 ou 20 minutes pour permettre une absorption fréquente de liquide en petites quantités (150-200 ml).

Dans les pays industrialisés où l'alimentation est riche en sel, l'absorption d'un supplément de sel n'est pas justifiée chez les salariés exposés à la chaleur; elle peut s'avérer utile dans le seul cas particulier d'un salarié non-acclimaté soumis, pour raisons médicales, à un régime à faible teneur en sel, et cela durant les 4 premiers jours d'exposition.

VI. LES ASPECTS DE SANTE

Le médecin du travail a une responsabilité spécifique à différents niveaux: sélection des salariés affectés à ce type de tâche; surveillance régulière de l'état de santé de ces salariés; amélioration de leur tolérance à la chaleur et supervision médicale directe de certaines opérations à contrainte élevée.

VI.1. Les effets liés au travail au froid et au chaud

Le tableau 11 décrit les principaux effets liés aux ambiances thermiques de travail.

INSERER ICI le tableau 11

VI.2. Sélection médicale

Sur base des données de la littérature, on peut considérer comme critères absolus d'écartement: une déficience congénitale en glandes sudoripares; la mucoviscidose; le diabète mal équilibré ou au stade de la polyneuropathie; la décompensation cardiaque.

Les critères relatifs d'écartement sont une atteinte coronarienne; les affections respiratoires chroniques; l'hypertension artérielle du fait indirect de certains traitements (régime sans sel, diurétiques, agents B bloquants); le diabète; l'alcoolisme; les maladies affectant une fraction importante de la surface cutanée; certains traitements médicamenteux tels que antidépresseurs tricycliques, antihistaminiques; une condition physique médiocre; un excès pondéral de 30 % supérieur au poids idéal et tout antécédent de malaise ou de syncope lors d'expositions antérieures à la chaleur.

De toute manière, la sélection médicale ne permet pas de dépister l'ensemble des salariés intolérants. Le médecin du travail a donc la responsabilité de vérifier la pertinence de son jugement initial lors de l'exposition du salarié.

VI.3. Surveillance de la santé régulière

La surveillance de la santé périodique consiste essentiellement à faire le bilan de l'évolution de la santé du salarié, de ses maladies chroniques, de l'intégrité de son système cardiovasculaire et de thermorégulation...

Elle devrait comporter idéalement une évaluation de sa tolérance effective durant les deux premières semaines suivant l'affection à un poste chaud, grâce au mesurage d'une ou de plusieurs variables d'astreinte physiologique; l'enregistrement de tout incident, même mineur (malaise, nausées, syncope, etc.); un examen général annuel et en cas de reprise du travail, après une absence prolongée pour maladie ou accident.

VI.4. Amélioration de la tolérance physiologique à la chaleur: l'acclimatement

La tolérance au travail à la chaleur augmente progressivement en cas d'exposition répétée à la chaleur au cours de l'exécution normale du travail: le corps apprend à transpirer plus tôt, plus, de manière plus uniforme sur la surface de la peau et sans perdre autant de sels minéraux. Ce processus, appelé acclimatement, est progressif et n'est complet qu'après environ 10 jours d'exposition. Il est rapidement réversible en 2 semaines.

L'exposition du salarié non-acclimaté doit donc être progressive les premiers jours et le salarié doit bénéficier d'un encadrement renforcé, voire, le cas échéant, d'une surveillance de la santé.

VI.5. Formation et encadrement des salariés

Les salariés et la maîtrise des équipes intervenant dans les zones chaudes de l'entreprise doivent recevoir, à intervalles réguliers, une information adaptée expliquant:

- la nature et la sévérité de la contrainte à laquelle ils sont exposés;
- les raisons justifiant une absorption suffisante de liquide;
- la nature des signes avant-coureurs d'intolérance à la chaleur;
- le processus d'acclimatation et l'importance de la progressivité de l'exposition pour le salarié non-acclimaté;
- les circonstances qui doivent inciter à réduire le temps d'exposition, voire à s'abstenir de toute exposition: les premiers jours suivant un retour de congé, ou la reprise du travail après maladie; la sensation d'être fiévreux; l'utilisation de substances servant à traiter des affections des voies respiratoires supérieures; l'absorption aiguë d'alcool la veille de l'exposition ou dans les heures précédentes; une sensation de grande fatigue;
- l'intérêt qu'il y a à pratiquer de fréquentes et courtes périodes d'intervention lors d'une exposition prolongée à la chaleur;
- les dangers du travail isolé lors de l'intervention dans les zones les plus chaudes; le travail en équipe est un gage de sécurité en cas de malaise éventuel et permet un partage du travail qui contribue à rendre tolérables des conditions sévères.

VI.6. Surveillance d'opérations à risque

La surveillance de la santé individuelle s'impose dans des situations telles qu'une exposition susceptible d'être exceptionnellement sévère (par exemple lors d'un travail d'entretien particulier); une exposition récurrente pour laquelle la durée maximale de travail prédite est inférieure à 30 minutes (car dans ce cas, les différences interindividuelles jouent un rôle considérable); en cas d'exposition de salariés particuliers, tels que des personnes souffrant d'un certain handicap, des personnes plus jeunes ou plus âgées; ou encore lorsque des vêtements de protection étanches doivent être utilisés (réduisant considérablement les échanges thermiques).

Dans ces circonstances, le médecin utilise son sens clinique et sa connaissance des symptômes d'intolérance pour apprécier la situation et décider, le cas échéant, l'arrêt de l'exposition de tel ou tel salarié. Son jugement doit s'appuyer en outre sur des critères objectifs fournis par l'enregistrement de variables physiologiques d'astreinte telle que la fréquence cardiaque ou, plus difficilement, la température centrale et la perte de poids.

VI.6.1. Monitoring de la fréquence cardiaque:

Le monitoring doit de préférence être mené en continu, au moyen d'un système d'enregistrement portable. A défaut, l'enregistrement discontinu doit consister à relever la FC toutes les 15 secondes. Il doit couvrir une période de 10 à 15 minutes avant le travail de façon à établir la ligne de base, la durée réelle de travail et une période la plus longue possible après le travail, au cours de laquelle le salarié récupère.

Les critères limites sont une valeur maximale admissible de façon épisodique égale à la FC maximale de la personne, réduite de 20 battements par minute (soit environ $200 - \text{age}$) et une valeur **moyenne** d'autant plus faible que la durée de travail est longue, comme le montre le tableau 12:

INSERER ICI le tableau 12

La valeur moyenne à la 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} minutes de récupération, lorsque le salarié est resté assis au repos doit rester inférieure à 110 bpm, ou mieux, inférieure à la fréquence cardiaque de repos augmentée de 30 bpm.

VI.6.2. Monitoring de la température centrale:

La température centrale peut être observée en continu par la température rectale en même temps que la FC. Elle peut également être mesurée par la température sous la langue avant, pendant et après (récupération) le travail si les conditions suivantes sont respectées: le milieu où se fait le mesurage est à une température ambiante supérieure à 18°C; le sujet garde la bouche fermée pendant 5 minutes normalement et 15 minutes au moins après la prise de boissons.

Les valeurs limites sont 38°C pour la température rectale et 38.5°C pour la température orale qui traduit mieux la température du sang et donc celle des centres de thermorégulation.

VI.6.3. Monitoring de perte de poids:

Le monitoring de la perte hydrique doit être réalisé au moyen d'une balance capable de mesurer 120 kg avec une précision de ± 50 g. Ce mesurage doit être réalisé en début et en fin de journée, le salarié étant rigoureusement vêtu de la même manière à chaque fois et de préférence déshabillé. Il est indispensable de peser exactement ce que le salarié boit et mange, ainsi que ce qu'il rejette durant cette période (WC chimique portable).

La valeur limite est une perte de poids inférieure à 3%.

RÉFÉRENCES

- [1] Mairiaux Ph, Malchaire J Le travail en ambiance chaude. Principes, outils et méthodes. Paris: Editions Masson, 1990 pp. 172
- [2] Directive 89/654/CEE du Conseil, du 30 novembre 1989, concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé pour les lieux de travail (première directive particulière au sens de l'article 16 paragraphe 1 de la directive 89/391/CEE) Journal officiel n° L 393 du 30/12/1989 p. 0001 - 0012
- [3] Norme [ISO 13731:2001](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Vocabulaire et symboles
- [4] Norme [ISO 7726:1998](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesure des grandeurs physiques
- [5] Norme [ISO 8996:2003](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination de la production de chaleur métabolique
- [6] Norme [ISO 9920:1995](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire
- [7] Norme [ISO 11079:1993](#), Évaluation des ambiances froides. Détermination de l'isolement requis des vêtements
- [8] Norme [ISO 7730:2003](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique à l'aide des calculs des indices PMV et PPD et confort thermique local
- [9] Norme [ISO 7243:1989](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir)
- [10] Norme [ISO 7933:2003](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible

- [11] Norme [ISO 15265:2003](#), Ergonomie de l'environnement thermique - Stratégie d'évaluation du risque pour la prévention de contrainte ou d'inconfort dans des conditions de travail thermiques
- [12] Norme [ISO 9886:2002](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Évaluation de l'astreinte thermique par mesures physiologiques
- [13] Norme [ISO 10551:1995](#), Ergonomie des ambiances thermiques. Évaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelles de jugements subjectifs
- [14] Norme [ISO 12894:2001](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Surveillance médicale des personnes exposées à la chaleur ou au froid extrêmes
- [15] Norme [ISO 13732-2:2001](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Méthodes d'évaluation de la réponse humaine au contact avec des surfaces - Partie 2 : contact humain avec des surfaces à température modérée
- [16] Norme [ISO 13732-3 2002](#), Ergonomie des ambiances thermiques - Contact avec des surfaces froides - Partie 3 : données ergonomiques et guide d'application
- [17] Malchaire J Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. *Cah Méd Trav* 1988; Vol XXV, 4 : 181-186
- [18] Lopez A, Despret I, Penta M, Malchaire J, Thonnard JL Caractéristiques à requérir pour les vêtements de protection contre la chaleur et les produits toxiques. *Rev Méd Trav* 1997; Tome XXIV, 1: 35-42
- [19] Malchaire J, Kampmann B, Havenith G, Mehnert P, Gebhardt HJ Criteria for estimating acceptable exposure times in hot work environment, a review. *Int Arch Occup Environ Health* 2000; 73, 4, 215-220
- [20] WHO Scientific Group Health factors involved in working under conditions of heat stress. (1969) Tech. Rep. series No 412, WHO, Geneva
- [21] Wyndham CH, Strydom NB, Morrison JF, Williams CG, Bredell GAG, Maritz JS, Munro A Criteria for physiological limits for work in heat. *J Appl Physiol* 1965; 20, 1: 37-45
- [22] Candas V, Libert JP, Brandenberger G Hydration during exercise - Effects on thermal and cardiovascular adjustments. *Eur J Appl Physiol* 1985; 55, 2: 113-122
- [23] Kampmann B Working paper GT2/12 of BIOMED project BMH4-CT96-0648 "HEAT": Rehydration in field experiments and laboratory investigations 1997
- [24] Malchaire J, Kampmann B, Mehnert P, Gebhardt H, Piette A, Havenith G et al Evaluation du risque de contrainte thermique lors du travail en ambiances chaudes. *Médecine et Hygiène du Travail & Ergonomie* 2001; Vol. XXXVIII, N° 3, 101-112
- [25] Malchaire J, Piette A, Kampmann B, Mehnert P, Gebhardt H, Havenith G et al Development and validation of the predicted heat strain model. *Ann Occup Hyg* 2001; 45, 2, 123-135
- [26] Malchaire J, Kampmann B, Mehnert P, Gebhardt H, Piette A, Havenith G et al Assessment of the risk of heat disorders encountered during work in hot conditions. *Int Arch Occup Environ Health* 2002; 75, 153-162
- [27] Malchaire J Stratégie SOBANE et méthode de Dépistage DEPARIS, série stratégie SOBANE: Gestion des risques professionnels, SPF Emploi, Travail et Concertation Sociale 2003
- [28] Malchaire J Stratégie d'évaluation et de prévention des risques liés aux ambiances thermiques, Commissariat général à la Promotion du Travail, Ministère de l'Emploi et du Travail 1998
- [29] Malchaire J Stratégie générale de gestion des risques professionnels. Illustration dans le cas des ambiances thermiques au travail. *Cah Notes Documentaires* 2002; n° 186, 39- 49, 1er trimestre
- [30] Malchaire J, Gebhardt HJ, Piette A Strategy for evaluation and prevention of risk due to work in thermal environment. *Ann Occup Hyg* 1999; 43, 5, : 367-376
- [31] Mairiaux Ph, Malchaire J Comparison and validation of heat stress indices in experimental studies. *Ergonomics* 1995, Special issue, 38, 1: 58-72.