

## Évaluation du risque de contrainte thermique lors du travail en ambiances chaudes

MALCHAIRE J.<sup>1</sup>, KAMPMANN B.<sup>2</sup>, MEHNERT P.<sup>3</sup>, GEBHARDT H.<sup>4</sup>, PIETTE A.<sup>1</sup>, HAVENITH G.<sup>7</sup>,  
DEN HARTOG E.<sup>5</sup>, HOLMER I.<sup>6</sup>, PARSONS K.<sup>7</sup>, ALFANO G.<sup>8</sup>, GRIEFAHN B.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Unité Hygiène et Physiologie du Travail, Université catholique de Louvain,  
Clos Chapelle-aux-Champs 3038, B - 1200 Brussels*

*Tél. 32(0) 2 764 32 29 – Fax 32 (0)2 764 39 54 - Email: malchaire@hytr.ucl.ac.be*

<sup>2</sup> *Institut für Arbeitswissenschaften der Ruhrkohle Aktiengesellschaft, Hülshof 28, D-44369 Dortmund*

<sup>3</sup> *Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Ardeystr. 67, D - 44139 Dortmund*

<sup>4</sup> *Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie, Corneliusstr.31, D - 42329 Wuppertal*

<sup>5</sup> *TNO Human Factors, Dept. of Work Environment, Thermal Physiology Group,  
Kampweg 5, P.O. Box 23, NL - 3769 ZG Soesterberg*

<sup>6</sup> *National Institute of Working Life (NIWL), S - 171 84 Solna*

<sup>7</sup> *Human Thermal Environments Laboratory, Loughborough University,  
Ashby Road, UK - Loughborough, Leicestershire LE11 3TU*

<sup>8</sup> *DETEC c/o Fac. Ingegneria, Piazzale Tecchio 80, I - 80125 Napoli*

### RÉSUMÉ

#### Objectif:

L'objectif de la recherche a été de coordonner le travail des principales équipes de recherche européennes dans le domaine des facteurs thermiques afin d'améliorer et de développer de manière significative les méthodes actuellement disponibles pour évaluer le risque d'astreintes thermiques lors du travail en ambiances chaudes.

#### Résultats:

- Influence des vêtements sur les échanges thermiques

Les effets dynamiques liés à la vitesse de l'air et l'effet de pompage lié aux mouvements et au travail sont pris en compte.

- Prédiction de la température cutanée moyenne

Le modèle a été étendu à des conditions climatiques plus sévères (rayonnement et humidité élevés, différents vêtements...) et tient compte de la température centrale (rectale) pour la prédiction de la température cutanée.

- Critères pour estimer des durées d'exposition acceptables dans les environnements chauds de travail

Les critères d'augmentation maximale de la température centrale et de perte hydrique acceptable ont été revus pour des sujets acclimatés et non acclimatés. Ces limites protègent 95% de la population.

- Stratégie de mesure

Une stratégie a été développée pour évaluer les risques dans n'importe quelle situation de travail, avec des

conditions variables de climat, de métabolisme ou de vêtement. Des outils ont été décrits en détails pour les trois niveaux supérieurs de la stratégie **SOBANE**:

- Une démarche d'**Observation**, pour l'identification des conditions qui pourraient mener à la contrainte thermique;
  - Une démarche d'**Analyse**, pour l'évaluation du problème et l'optimisation des solutions quand la démarche d'**Observation** n'a pas abouti;
  - Une démarche d'**Expertise** lorsque l'étude spécialisée de la situation de travail est indispensable.
- Le Modèle de prédiction de la contrainte thermique (PHS: Predicted Heat Strain)

Un nouveau modèle de prédiction de l'astreinte thermique a été développé et une révision de la norme ISO 7933 relative à la contrainte thermique en ambiances chaudes a été préparée, en remplacement de l'indice de Sudation Requisite qui devient ainsi obsolète.

- Validation

Le nouveau modèle a été validé à partir des données d'un ensemble d'expériences menées en laboratoire et sur le terrain et couvrant la gamme entière des conditions pour lesquelles le modèle a été étendu, à savoir les conditions avec rayonnement, humidité ou vitesse d'air élevés et faibles, ainsi que pour des conditions fluctuantes au cours du temps.

**Mots clés:** contrainte thermique, prévention, stratégie, indice, ISO 7933

**SAMENVATTING****Doel:**

Het doel van het onderzoek was de coördinatie van het werk van de voornaamste Europese onderzoeksteams in het domein van thermische factoren. Dit om op een duidelijke wijze de momenteel beschikbare methodes voor de evaluatie van het risico van thermische belasting bij het werk in warme omgeving te verbeteren en te ontwikkelen.

**Resultaten:**

- Invloed van kleding op thermische uitwisselingen

Er werd rekening gehouden met de dynamische effecten gebonden aan de luchtsnelheid en met het pompeffect gebonden aan bewegingen en aan het werk.

- Voorspelling van de gemiddelde huidtemperatuur

Het model werd uitgebreid tot strengere klimatologische omstandigheden (hoge straling en vochtigheidsgraad, verschillende soorten kleding ...) en houdt rekening met de centrale lichaamstemperatuur (rectaal) voor de voorspelling van de huidtemperatuur.

- Criteria voor de evaluatie van een aanvaardbare blootstellingsduur in een warme werkomgeving

De criteria voor maximale verhoging van de centrale lichaamstemperatuur en voor aanvaardbaar vochtverlies werden herzien voor geacclimatiseerde en niet geacclimatiseerde personen. Deze grenswaarden beschermen 95% van de bevolking.

- Meetstrategie

Er werd een strategie ontwikkeld voor de evaluatie van risico's in eender welke arbeidssituatie met variabele klimatologische-, metabolische- of kledingsomstandigheden.

Er werden uitgebreid instrumenten beschreven voor de drie hoogste niveaus van de **SOBANE** strategie:

- Een **Observatiemethode** voor de identificatie van de omstandigheden die zouden kunnen leiden tot een thermische belasting;
  - Een **Analysemethode** voor de evaluatie van het probleem en de optimalisering van de oplossingen indien de **Observatiemethode** geen resultaten heeft gegeven;
  - Een **Expertisemethode** indien de gespecialiseerde studie van de arbeidssituatie noodzakelijk is.
- Het voorspellingsmodel voor de thermische belasting (PHS: Predicted Heat Strain)

Een nieuw voorspellingsmodel voor de thermische belasting werd ontwikkeld en een herziening van de ISO 7933 standaard betreffende thermische belasting in een warme omgeving werd voorbereid, dit ter vervanging van de ondertussen verouderde vereiste zweetproductie index.

- Validatie

Het nieuwe model werd gevalideerd vanuit de gegevens van een geheel van experimenten in het laboratorium en op het terrein en die een ganse reeks omstandigheden omvatten voor dewelke het model werd uitgebreid, t.t.z. de omstandigheden met straling, hoge en lage vochtigheidsgraad en -luchtsnelheid, alsook voor omstandigheden die variëren in de loop van de tijd.

**Sleutelwoorden:** thermische belasting, preventie, strategie, index, ISO 7933

**SUMMARY****Objective:**

Co-ordinate the work of the main European research teams in the field of thermal factors in order to develop and improve significantly the methods presently available to assess the risks of heat disorders encountered during work in hot conditions.

**Results:**

- Influence of clothing ensembles on heat exchange:

Methods and formulas were developed that take into account the dynamic effects associated with forced convection and the pumping effect associated with body movements and exercise.

- Prediction of the average skin temperature:

The model used in the Required Sweat rate standard was extended to more severe conditions with high radiation and high humidity and different clothing and takes into account the rectal temperature for the prediction of the skin temperature.

- Criteria for estimating acceptable exposure times in hot work environments:

Criteria were reviewed and updated concerning the maximum increase in core temperature and the acceptable water loss, for acclimatized and non-acclimatized subjects. These limits intend to protect 95% of the population.

- Measuring strategy:

A strategy was developed to assess the risks in any working situation with varying conditions of the climate, of metabolic rate or of clothing. A detailed methodology was developed for the three highest stages of the **SOBANE** strategy:

- An **Observation** method for the recognition of the conditions that might lead to thermal stress.
  - An **Analysis** designed to evaluate the magnitude of the problem and optimise the choice of solutions.
  - An **Expert** method if an in depth analysis of the working situation is needed.
- The Predicted Heat Strain Model:

The Predicted Heat Strain model was developed: it is presently proposed for the revision of the ISO 7933 standard.

- Validation:

The different results were used to prepare a revision of the interpretation procedure proposed in the ISO standard 7933. The modified approaches are validated through a set of lab and field experiments involving the whole range of conditions for which the model is extended, namely conditions with high and low radiation, humidity and air velocity as well as fluctuating conditions.

**Key words:** heat stress, prevention, strategy, indices, ISO 7933

## I. INTRODUCTION

L'objectif du projet de recherche a été de coordonner le travail des principales équipes de recherche européennes dans le domaine des facteurs thermiques afin de développer et d'améliorer de manière significative les méthodes actuellement disponibles pour évaluer le risque d'astreintes thermiques lors du travail en ambiances chaudes.

La norme ISO 7933 "Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la Sudation Requise" (1989) a été publiée pour la première fois en 1989. Depuis, elle a été abondamment critiquée et beaucoup d'articles ont été publiés comparant une version (pas toujours indiquée) de l'indice de Sudation Requise à des ensembles de données.

Bien que de telles comparaisons soient limitées à l'ensemble particulier de données qui a en l'occurrence été utilisé, les critiques systématiques concernaient:

- la prédiction de la température cutanée
- l'influence du vêtement sur la convection, le rayonnement et l'évaporation
- l'effet combiné du vêtement et des mouvements
- l'augmentation de la température centrale liée à l'activité
- la prédiction de la sudation en conditions très humides
- les critères limites d'exposition et en particulier les niveaux alarme et danger
- la perte hydrique maximale permise.

Les points nécessitant une recherche concertée ont été dès lors identifiés comme étant:

- La stratégie à employer pour évaluer l'exposition, en particulier lorsque les conditions varient au cours du temps.
- Les coefficients d'échange thermique par convection, rayonnement et évaporation en conditions extrêmes.
- La modélisation du comportement physiologique lors du travail à la chaleur et, en particulier, de la température cutanée moyenne, de la température centrale (rectale) et de la sudation.

- Les critères pour la détermination de la durée limite d'exposition, tenant compte des différences interindividuelles entre les travailleurs.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche ont dès lors été de:

- Concevoir et valider une stratégie d'évaluation de la contrainte lors du travail en ambiances chaudes, stratégie susceptible d'être utilisée en entreprise pour déterminer la durée limite d'exposition et pour optimiser l'amélioration de l'environnement de travail.
- Etendre la validité du modèle actuel (ISO7933) en tenant mieux compte du vêtement.
- Améliorer la validité du modèle en cas de rayonnement élevé, d'humidité élevée ou de vitesse d'air élevée.

- Mieux définir les critères pour la détermination de la durée limite d'exposition et en particulier les différences interindividuelles en terme de débit sudoral, d'efficacité évaporatoire, de perte hydrique et d'augmentation de la température centrale.

Les résultats de la recherche ont fait l'objet de nombreuses publications internationales.

L'objectif de la présente synthèse est de présenter brièvement et qualitativement, aux conseillers en prévention et en protection, ce en quoi ont consisté les travaux, sur quelle base nous avons été amenés à modifier l'indice de sudation requise et à le renommer, ce que contient le nouvel indice et comment il conduit à la prédiction à tout instant de la sudation et de la température rectale. De plus, nous rapporterons quelques résultats comparant cet indice Predicted Heat Strain (PHS) à l'ancien (Sudation Requise), ainsi qu'à l'indice WBGT qui – au moment de la publication du présent article – constitue toujours la base de la réglementation belge.

Un indice n'a d'utilité que s'il est utilisé. Pour qu'il le soit, il est apparu évident aux chercheurs de cette étude, que l'utilisation devait l'intégrer dans une stratégie de prévention rigoureuse et praticable. Cet aspect étant le plus essentiel, c'est par cette stratégie que nous souhaitons débiter cet article de synthèse.

## II. STRATÉGIE À 4 NIVEAUX POUR LA GESTION DES CONDITIONS DE TRAVAIL À LA CHALEUR

La stratégie développée suit les principes de la stratégie **SOBANE** décrite par Malchaire (1997) et est très proche de ce qui fut proposé par Malchaire et al (1998) et mis à la disposition des entreprises en Belgique par le Ministère fédéral de l'Emploi et du Travail. L'approche peut être récapitulée par le graphique de la figure 1.

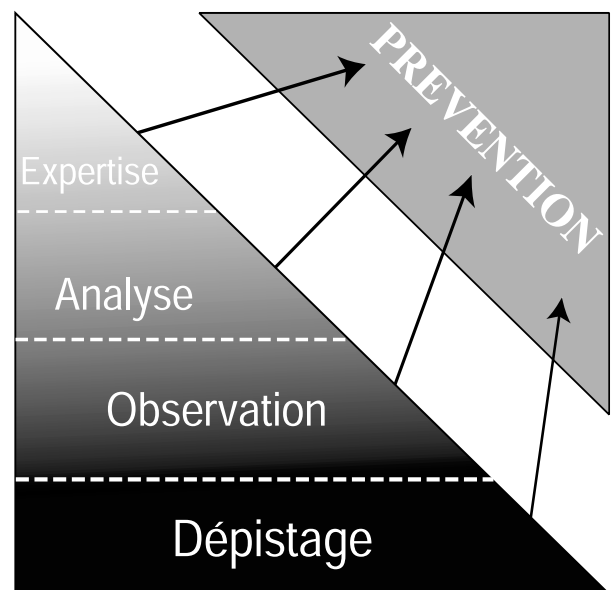


Figure 1: Illustration de la stratégie de prévention

La stratégie comprend 4 niveaux d'intervention strictement orientés vers la prévention puisque l'objectif principal de l'évaluation des risques liés à l'environnement thermique de travail n'est pas de mesurer les risques, mais d'empêcher ou d'éliminer ou, à tout le moins, de réduire ces risques.

La définition des 4 niveaux de la stratégie est rappelée brièvement ci-après:

### 1. Niveau 1: Dépistage

Au premier niveau, tous ou la majorité des facteurs de risque ou des problèmes doivent être détectés afin de fournir une première vue d'ensemble des conditions de travail. La méthode de **Dépistage** doit couvrir brièvement la majorité des facteurs liés à la sécurité, à la santé et au bien-être. Les conclusions portent, en particulier, sur l'existence de plaintes liées aux conditions climatiques et sur le besoin d'investigations supplémentaires.

### 2. Niveau 2: Observation

Le deuxième niveau est conçu pour être mis en oeuvre par des personnes de l'entreprise et, idéalement, par les travailleurs eux-mêmes. Il doit rester simple de compréhension pour les personnes non formées et tirer profit de ce que les utilisateurs connaissent le mieux, à savoir leurs conditions de travail au cours du temps, le processus technique, les caractéristiques des sources chaudes ou froides et les possibilités de mesures de prévention.

La démarche doit les aider à structurer et à systématiser leur approche, de sorte qu'elle ne soit pas seulement basée sur des perceptions et des opinions.

Des fiches de travail ont été développées pour décrire et évaluer les conditions de travail, ainsi que pour aider à trouver des solutions.

### 3. Niveau 3: Analyse

Le troisième niveau est conçu pour être mis en oeuvre avec l'assistance de spécialistes en santé professionnelle, c.-à-d., par des médecins du travail, des hygiénistes, des ergonomes... ayant une formation générale dans la gestion des problèmes thermiques. La démarche utilise toujours des concepts et des techniques généralement admis sur le terrain, évitant ainsi les considérations inutilement savantes. Lorsque des mesurages sont nécessaires à la prévention, ceux-ci sont simples et ne requièrent que des instruments peu coûteux, faciles d'emploi et aisément disponibles sur le terrain.

La démarche reste orientée vers la prévention et est dès lors basée sur des mesurages et des indices qui rendent possible de mieux identifier les causes des problèmes et les moyens de les résoudre. À la fin de l'**Analyse**, les utilisateurs devraient pouvoir déterminer si les problèmes sont résolus ou si une **Expertise** plus complète est nécessaire.

### 4. Niveau 4: Expertise

Ce niveau peut s'avérer nécessaire dans des cas très complexes où des solutions satisfaisantes n'ont toujours pas pu être trouvées après l'**Analyse** détaillée.

Ce niveau est réalisé avec l'aide de spécialistes qui devraient pouvoir décider la meilleure façon de répondre au problème. Par conséquent, la méthodologie à employer,

les mesurages à réaliser, l'évaluation à mener varieront en fonction du problème rencontré et le document est limité aux grandes lignes de ce que cette étude d'**Expertise** devrait nécessairement inclure et rapporter.

Une version finale de la stratégie a été préparée et validée sur le terrain avec la contribution de 53 utilisateurs potentiels. Un article décrivant en détail cette stratégie a été publié (Malchaire et al. 1999).

Nous renvoyons le lecteur à la brochure publiée en Belgique (Malchaire et al. 1998) pour le détail de cette stratégie.

Nous souhaitons souligner cependant le fait qu'au niveau 1, **Dépistage**, mais surtout au niveau 2, **Observation**, l'objectif recherché est une situation de travail optimale avec quelque 20°C, une humidité normale (40-50%), sans rayonnement, une ventilation légère, alors que le travail est le plus léger possible et les vêtements confortables et adaptés au travail. Nulle mention n'est faite des indices climatiques. Les salariés et leur encadrement technique – si possible avec l'aide d'un conseiller en prévention et protection – cherchent les raisons pour lesquelles la situation de travail s'écarte du confort et tentent d'y apporter des solutions compatibles avec leur travail.

Ce n'est qu'au niveau 3, **Analyse**, lorsque l'assistance d'un conseiller en prévention et protection s'avère indispensable, que les indices de confort et le "Predicted Heat Strain" sont utilisés. Ils le sont cependant comme de simples outils. L'utilisateur n'a pas à comprendre nécessairement toutes les subtilités de ces indices. Il doit pouvoir les utiliser simplement (d'où des programmes d'ordinateur) pour obtenir une réponse directe (durée de travail, gain obtenu par telle ou telle mesure technique...). Il doit cependant pouvoir les utiliser en confiance. C'est ce qui, à nouveau, justifie le présent article.

## III. MODIFICATIONS APPORTEES A L'INDICE SUDATION REQUISE ET DEVELOPPEMENT DE L'INDICE PREDICTED HEAT STRAIN

### 1. Influence du vêtement sur les échanges de chaleur par convection et par évaporation

La perte de chaleur par convection est une partie importante de la perte de chaleur du corps humain, particulièrement dans des climats froids ou modérément chauds.

Dans des ambiances plus chaudes, la perte de chaleur dépend plus de l'évaporation, elle-même fonction des caractéristiques du vêtement.

Un aspect important des transferts de chaleur par convection et évaporation est l'effet de la vitesse du vent et des mouvements sur les coefficients de transfert de la couche d'air superficielle et du vêtement.

Les tableaux de la norme ISO 9920 (1995) donnent des valeurs statiques d'isolation thermique de différents ensembles vestimentaires, c.à.d. les valeurs lorsque le sujet ne bouge pas et que l'air est immobile.

Le projet de recherche s'est principalement occupé de l'effet combiné de la vitesse de l'air et des mouvements de sujets sur l'isolement thermique du vêtement. A partir

d'expériences avec des sujets et sur des mannequins, l'étude a permis de développer différentes expressions de correction (Havenith et al. 1999, Holmér et al. 1999, Parsons et al. 1999), en fonction de la vitesse de l'air, de la direction et de la vitesse de la marche et de la charge de travail. Des expressions simples ont été développées pour correspondre au travail industriel varié plus courant.

## 2. Prédiction de la température cutanée ( $T_{sk}$ )

La validité du modèle utilisé dans l'indice de Sudation Requisite (ISO 7933) pour prédire la température cutanée était critiquée en cas de rayonnement élevé et d'humidité élevée. Le but de la présente révision a été d'améliorer ce modèle de prédiction en utilisant une base de données importante.

Une structure commune a été définie pour rassembler dans une même base de données, toutes les données provenant de 1113 expériences réalisées par les différents partenaires. Pour chaque expérience, les valeurs minute par minute de 10 paramètres de contrainte et d'astreinte furent encodées, dont la température cutanée observée, calculée par une moyenne pondérée d'au moins 4 mesurages locaux.

Des points correspondant à des conditions constantes ont été sélectionnés dans chacune des expériences. Peu de données (moins de 10%) étant disponibles pour les femmes, il a été décidé de dériver le modèle de prédiction de  $t_{sk}$  sur la base des données relatives aux hommes.

La base de données finale de  $t_{sk}$  a compris 1999 points de données concernant 377 sujets.

L'analyse a été menée séparément pour les sujets en short (1212 points avec moins de 0,2 clo) et les sujets habillés (787 points entre 0,6 et 1 clo).

La relation entre la température cutanée moyenne, les paramètres primaires, le métabolisme et la température rectale a été représentée par un modèle additif. Une méthode statistique spéciale (bootstrap: 1000 échantillons) a été utilisée pour l'analyse de corrélation multiple.

Pour le sous-ensemble de données relatif aux sujets en short, un modèle de prédiction excluant la variable métabolisme non significative a été obtenu:

$$t_{sk} = 7,19 + 0,064 t_a + 0,061 t_r + 0,198 p_a - 0,348 v_a + 0,616 t_{re}$$

Le coefficient de corrélation multiple entre les valeurs observées et prédites a été égal à 0,86. 83,3% des températures cutanée prédites ont été dans la gamme de  $\pm 1^\circ\text{C}$  des valeurs observées.

Le modèle suivant a été obtenu pour les sujets vêtus:

$$t_{sk} = 12,17 + 0,020 t_a + 0,044 t_r + 0,194 p_a - 0,253 v_a + 0,00297 M + 0,513 t_{re}$$

Le coefficient de corrélation (0,77) est inférieur à celui obtenu pour les sujets en short, mais 81,8% des valeurs prédites sont dans la gamme de  $\pm 1^\circ\text{C}$  des valeurs observées.

Les modèles obtenus sont basés sur la plus grande base de données jamais assemblée, provenant de 9 laboratoires de recherche à travers l'Europe et dans une large gamme de conditions ambiantes. Il peut donc être anticipé que le

modèle est valide pour la plupart des situations industrielles et pour la population active générale. En particulier, ces modèles étendent leur validité aux conditions avec charge thermique de rayonnement élevée ou humidité élevée.

Peu de données étant disponibles pour des valeurs d'isolation vestimentaire dans la gamme de 0,2 à 0,6 clo, une interpolation linéaire entre la prédiction pour sujets en short et sujets habillés a été proposée.

Un article reprenant le détail de ces nouveaux modèles a été publié (Mehnert et al. 2000).

## 3. Pertes thermiques respiratoires par évaporation et par convection

Les pertes respiratoires sont relativement limitées lors du travail en ambiances chaudes. Cependant, d'une part, elles sont souvent du même ordre de grandeur que les pertes par convection et, d'autre part, le stockage de chaleur est déterminé par la différence entre les débits d'évaporation requise et prédite, de sorte que de petits écarts peuvent avoir de grands effets. Dans les ambiances très chaudes, les pertes respiratoires peuvent dès lors jouer un rôle significatif dans l'équilibre thermique. Les expressions antérieures ont été revues et améliorées sur base des travaux de Livingstone et al. (1994) et Varene (1986), de manière à tenir compte à la fois des températures et humidités ambiantes.

## 4. La température moyenne du corps

A partir d'articles publiés par Kähkönen (1993) et Colin et al. (1971), un algorithme a été développé pour calculer la température moyenne du corps par une moyenne pondérée des températures rectale et cutanée. Le poids attribué à cette dernière varie de 30% lorsque la température rectale est de  $36,8^\circ\text{C}$  à 10% seulement lorsqu'elle est égale à  $39^\circ\text{C}$ . Cet algorithme prend donc en considération la vasodilatation périphérique associée à une élévation de température centrale.

## 5. Distribution de l'accumulation de chaleur dans le corps

Un algorithme a été développé pour prévoir la répartition de la chaleur entre la peau et le noyau du corps et donc les élévations de température dans ces deux parties. Il suppose que la température est la même dans tout le noyau central, mais qu'elle varie de manière linéaire entre la température superficielle de la peau et la température rectale, au travers de l'épaisseur de la couche cutanée.

## 6. Prédiction de la température rectale

Sur base des travaux d'Edwards et al. (1978), un algorithme a été développé pour prédire l'accroissement de la température rectale résultant d'un stockage de chaleur.

## 7. Pondération exponentielle pour la température cutanée ( $t_{sk}$ ) et la sudation (SW)

Comme montré par Malchaire (1991), la température cutanée et la sudation à un certain moment sont calculées par un modèle exponentiel récurrent en fonction des valeurs existant à l'instant précédent et des états de régime vers lequel tendraient ces paramètres si les conditions thermiques actuelles devaient exister indéfiniment.

Ceci offre l'avantage de pouvoir prédire l'état thermique à tout moment, dans n'importe quel climat variable, en fonction de ce que la personne connaît à l'heure actuelle et de ce qu'elle a connu dans les minutes et heures qui précèdent.

### 8. Rendement évaporatoire de la sudation

Confronté à une contrainte thermique, le corps se met à transpirer. Si l'humidité ambiante est faible (cas du désert), la goutte de sueur s'évapore dès sa sortie du canal sudoripare: la peau reste sèche et toute la sueur participe à l'évaporation refroidissante. Si, par contre, l'ambiance est humide, comme chacun en a fait l'expérience, la sueur reste sur la peau (la "mouillure" est importante), elle ne s'évapore pas et ne contribue pas à refroidir le corps: son rendement évaporatoire reste faible.

Hettinger et al. (1985) et Alber-Wallerström et Holmér (1994) ont proposé une relation entre cette "mouillure" de la peau et le rendement évaporatoire de la sudation. L'expression utilisée par le modèle Sudation Requisite a été confirmée. Par contre, il a été modélisé que même si la peau est complètement mouillée, la couche de sueur peut toujours augmenter si l'humidité de l'air augmente et la sudation persiste. Dans ce cas, le rendement évaporatoire, c.à.d. l'utilité de cette sueur pour refroidir le corps, continue à diminuer puisque la fraction de la sueur qui s'évapore continue à décroître.

### 9. Sudation maximale possible

A partir des publications par Gosselin (1947) et Araki et al. (1979), il a été suggéré que la sudation maximale possible pour un sujet moyen non acclimaté peut varier entre 650 et 1000 g/h, selon le métabolisme de travail.

Pour les sujets acclimatés, on sait que la sudation dans un environnement donné peut être supérieure par un facteur 2 à celle d'un sujet non acclimaté. Cependant, ceci ne se rapporte pas à la capacité maximale de sudation. En excluant les études pour lesquelles la capacité maximale n'a pas été atteinte, la revue de la littérature a permis de conclure que le débit sudoral maximal possible augmente seulement de 25% en moyenne pour les sujets acclimatés (Havenith 1997).

### 10. Augmentation de la température centrale $t_{co}$ lié au métabolisme M

Il est bien connu que, même lors d'un travail dans une condition climatique neutre sans contrainte thermique, la température centrale s'élève (constante de temps d'environ 10 minutes) vers une valeur d'équilibre fonction de la lourdeur du travail. Les travaux de Saltin et Hermansen (1966) restent une des meilleures références: selon eux, la température d'équilibre serait donnée par

$$t_{cor} = 36,6 + M / 278 \quad (M \text{ exprimé en } W \text{ m}^{-2})$$

Il s'agit d'un phénomène physiologique d'adaptation où l'on peut supposer que les centres thermorégulateurs ont modifié le point de consigne (tout comme dans le cas de la fièvre) et ne commandent pas la sudation. Celle-ci ne démarre qu'après l'effort, pour perdre la quantité de chaleur qui a été accumulée.

Par conséquent, au cours de l'effort et quelle que soit la condition climatique, on doit en conclure que la sudation qui sera induite n'est pas déterminée par l'évaporation requise pour l'homéothermie ( $E_{req}$ ) mais, plutôt, la différence ( $E_{req} - S_R$ ), où  $S_R$  est l'accumulation de la chaleur à un moment donnée pour atteindre cette température d'équilibre.

### 11. Limite de la température interne

Le rapport technique No. 412 de l'OMS publié en 1969 mentionnait: "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 d'un coup de chaleur soit négligeable.

A partir de travaux menés par Wyndham et al. (1965), deux températures rectales maximales pourraient être adoptées:

- 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 des séquelles physiologiques graves.

La probabilité pour atteindre ces températures pourrait être limitée comme suit:

- 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).

A partir des données de Wyndham et Heyns (1973) et Kampmann (1997a), il a été déterminé que la température rectale moyenne devait bien être limitée à 38°C comme suggéré par le document de l'OMS pour atteindre ces faibles probabilités.

Ces extrapolations de 38°C à 39,2°C et a fortiori à 42°C, ou, plutôt, à l'inverse, de 39,2 et 42°C vers 38°C comme limite, peuvent être considérées comme statistiquement osées. Les écarts types étant de l'ordre de 0,3°C, on se trouve en effet à +4 et +12 écarts types par rapport à la moyenne. De telles extrapolations sont dangereuses, mais aucune alternative ne semble exister pour définir le risque, c.à.d. la probabilité d'atteindre ces températures extrêmes pour un sujet particulièrement sensible. On peut penser par ailleurs que, tout au moins dans nos milieux industriels occidentaux, la probabilité est grande qu'un sujet spontanément le poste bien avant d'arriver à 39,2 et surtout 42°C.

### 12. Déshydratation et perte hydrique maximale

Candas et al. (1985) 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 (1997b) a montré que, dans des mines de charbon, après une exposition de 4 à 8 heures, le taux moyen de réhydratation était de 60%, indépendamment de la quantité totale de sueur produite et que 95% des sujets avaient un taux de réhydratation supérieur à 40%.

Partant de ces valeurs, il peut être proposé que la perte hydrique maximale, compte tenu des compensations habituellement observées, soit égale à:

- 7,5% de la masse corporelle pour un sujet moyen
- 5% de la masse corporelle pour 95% de la population active.

Ces valeurs peuvent paraître très élevées. Elles ne sont certes pas confortables, ni a fortiori souhaitables. Ce sont simplement les limites qui, selon les données médicales expérimentales et épidémiologiques, assurent la protection de 50% et de 95% de la population active, en soulignant bien le fait qu'il s'agit d'une perte hydrique cumulée et non d'une déshydratation, et sur une durée de travail de plus de 3,5 heures sans élévation de température centrale au delà de 38°C.

Il est à signaler que, contrairement à la norme sudation requise antérieure, aucune distinction n'est ici faite entre acclimatés et non acclimatés. En réalité, cette distinction se marque non pas quant à la perte hydrique tolérable, mais bien quant à la sudation qui peut être fournie. Ceci fut traité au point 9.

### 13. Conclusion

En pratique, les modifications les plus importantes apportées à l'indice sudation requise concernent:

- la prédiction des températures corporelles plutôt que du stockage de chaleur
- la prédiction à tout instant, en prenant en compte tout le passé d'exposition et non plus seulement pour des situations constantes
- une révision en profondeur des critères d'arrêt pour perte hydrique ou élévation de température excessives.

Etant donné ces modifications et pour éviter toute confusion, il a été décidé de renommer le modèle d'analyse et d'interprétation. Le nom Predicted Heat Strain (PHS) (Astreinte thermique prédite) a été choisi puisque le nouveau modèle tend à prédire les répercussions physiologiques (sudation et température rectale) minute par minute en fonction des conditions de travail.

Deux articles décrivent plus en détail les critères pour le calcul des durées limites d'exposition (Malchaire et al. 2000) et la validation du modèle PHS (Malchaire et al. 2001).

## IV. VALIDATION DU MODELE PHS

### 1. Choix des données

La base de données décrite ci-avant a été utilisée pour la validation du nouveau modèle PHS.

La plupart des expériences dont les données ont pu être ainsi rassemblées concernaient des hommes (1020), 452 des sujets étaient non acclimatés et 661 acclimatés. Plus de 50% des expériences de laboratoire avaient été réalisées avec des sujets en short (< 0,2 clo), alors que 95% des expériences sur le terrain étaient menées avec des travailleurs vêtus (> 0,6 clo).

A partir des intervalles de confiance à 95% des paramètres primaires, il a été déterminé que le modèle pourrait être validé pour les valeurs des paramètres comprises dans les gammes suivantes indiquées au tableau 1.

Gammes de validité du modèle PHS

	$p_a$ kPa	$t_r - t_a$ °C	$v_a$ m/s	MW	$I_{cl}$ Clo
Minimum	15	0	0	100	0,1
Maximum	50	4,5	60	450	1,0

Tableau 1: Gammes de validité du modèle PHS

Pour la validation, des points de données ont été choisis pour chaque expérience en utilisant les critères suivants:

- pour la sudation: la sudation moyenne sur l'expérience entière;
- pour la température rectale, sélection de points (un par heure) dans chaque expérience.

### 2. Validation à partir des expériences en laboratoire

Le tableau 2 donne les résultats des régressions linéaires entre les valeurs observées et prédites de température rectale et de sudation pour les expériences en laboratoire et pour les expériences sur le terrain.

	Expériences en laboratoire	Expériences sur le terrain
<i>Sudation (g/h)</i>		
n	672	237
observées (m±s)	424 ± 172	317 ± 187
prédites (m±s)	451 ± 154	344 ± 132
pente	0,848	1,056
intersection	41	-46
r	0,760	0,745
alpha	0,918	0,851
alpha IC95%	0,540 - 1,523	0,328 - 1,936
Obs. - Préd. (m±s)	-27,5 ± 114,1	-26,7 ± 125,1
<i>Température rectale (C)</i>		
n	1937	1028
observées (m±s)	37,45 ± 0,47	37,40 ± 0,44
prédites (m±s)	37,46 ± 0,47	37,40 ± 0,34
pente	0,664	0,770
intersection	12,57	8,60
r	0,659	0,594
alpha	1,000	1,000
alpha IC95%	0,980 - 1,020	0,981 - 1,019
Obs. - Préd. (m±s)	-0,01 ± 0,39	-0,01 ± 0,36

Tableau 2: Régressions entre valeurs observées (variable dépendante) et prédites (variable indépendante (PHS) de température rectale et de sudation)

La figure 2 compare les sudations prédites et observées. Les limites de confiance à 95% des valeurs ont été calculées dans les coordonnées polaires afin que l'incertitude entre valeurs prédites et valeurs observées soit proportionnelle à la sudation observée.

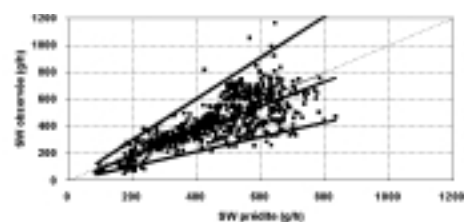


Figure 2: Valeurs observées et prédites de la sudation (SW) (avec l'intervalle de confiance à 95%) pour les 672 expériences en laboratoire

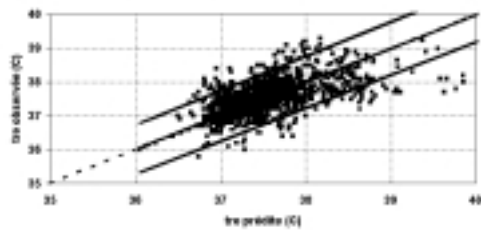


Figure 3: Valeurs observées et prédites de la température rectale ( $t_{re}$ ) (avec l'intervalle de confiance à 95%) pour les 672 expériences en laboratoire

L'équation de la droite polaire moyenne est:

$$SW_{obs} = 0,918 * SW_p \quad (\text{avec IC à 95\%: } 0,540 - 1,523)$$

La figure 2 montre que la droite de régression est pratiquement identique à la droite à 45°.

On sait qu'un modèle est d'autant meilleur que le coefficient de corrélation est proche de 1. Dans les cas présents, ils sont égaux à 0.760 et 0.659.

Il est sans doute possible d'affiner encore les algorithmes de calcul afin d'améliorer cette comparaison avec les données physiologiques. Cependant, l'amélioration a une limite du fait que le modèle concerne un sujet moyen virtuel (on tient compte déjà de sa taille et son poids, de son acclimatement ...) tandis que les données proviennent de sujets bien réels avec leur susceptibilité propre.

Ainsi, trois points sont plus hauts que la limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95%. Ils proviennent de travaux de trois équipes de recherche différentes et démontrent l'influence des différences interindividuelles. En effet, pour des expériences identiques mais avec d'autres sujets, les données sont au-dessus ou au-dessous de la droite de régression et dans l'intervalle de confiance. La même remarque peut être formulée pour les points situés en dessous de la limite inférieure d'intervalle de confiance 95%.

La figure 3 compare les valeurs observées et prédites de températures rectales.

Les moyennes et écarts type des valeurs observées et prédites sont à peu de chose près identiques. Le coefficient de corrélation est égal à 0,66 et est inférieur à celui obtenu pour la sudation. L'équation de la droite polaire moyenne est:

$$t_{re\ obs} = 1,000 * t_{re\ p} \quad (\text{avec IC à 95\%: } 0,979 - 1,020)$$

A nouveau, les points situés en dehors de l'intervalle de confiance à 95% (figure 3) sont dus aux différences interindividuelles.

Comme on peut s'y attendre, les sujets "anormaux" (sur-élévation) en ce qui concerne la température centrale étaient "anormalement bas" point de vue sudation: ceux qui transpirent moins, accumulent plus et l'inverse. Cette particularité n'est pas possible à simuler ... à moins de faire intervenir dans le modèle un paramètre physiologique mesuré! Mais pourquoi aurait-on alors encore besoin d'un modèle?

### 3. Validation à partir des expériences sur le terrain

Les figures 4 et 5 comparent les valeurs observées et prédites de la sudation (figure 4) et de la température rectale (figure 5) pour les 237 expériences sur le terrain.

La précision des mesures climatiques et physiologiques est généralement inférieure pour les expériences sur le terrain. Ceci explique probablement pourquoi les corrélations entre les valeurs observées et prédites sont inférieures et les intervalles de confiance à 95% plus grands.

Les équations de la droite polaire moyenne sont:

$$SW_{obs} = 0,851 * SW_p \quad (\text{avec IC à 95\%: } 0,328 - 1,936)$$

$$t_{re\ obs} = 1,000 * t_{re\ p} \quad (\text{avec IC à 95\%: } 0,981 - 1,019)$$

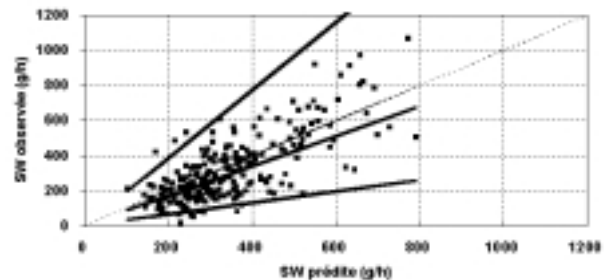


Figure 4: Valeurs observées et prédites de la sudation (SW) (avec l'intervalle de confiance à 95%) pour les 237 expériences sur le terrain.

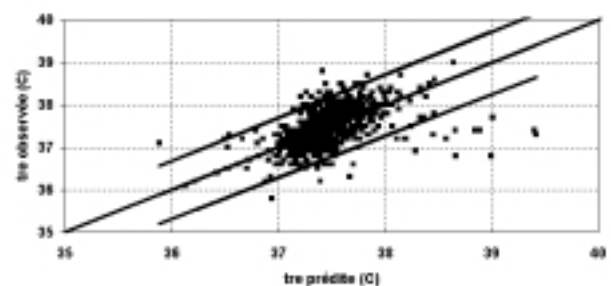


Figure 5: Valeurs observées et prédites de la température rectale ( $t_{re}$ ) (avec l'intervalle de confiance à 95%) pour les 237 expériences sur le terrain.

## V. COMPARAISON ENTRE LE MODELE PHS ET LA NORME ISO 7933

Les modifications apportées au modèle de Sudation Requisite tel qu'il est repris dans la norme ISO 7933 sont à ce point importantes que la comparaison avec le nouveau modèle PHS n'est guère pertinente. La sudation et la température rectale ne sont plus prédites pour un niveau d'alarme ou de danger, mais pour un sujet moyen. Par conséquent, on s'attend à ce que 50% des travailleurs souffrent d'une contrainte à la chaleur plus élevée que prédite. Cette comparaison non pertinente sera cependant tout de même menée afin de montrer aux utilisateurs dans l'industrie combien les résultats obtenus à partir du modèle PHS sont différents et d'ainsi illustrer les améliorations par rapport au modèle de Sudation Requisite de la norme ISO 7933.

Comme ce modèle de la norme ISO 7933 ne prédit pas la température rectale, les comparaisons des deux modèles seront restreintes aux valeurs prédites de la sudation.

Le tableau 3 donne les résultats des régressions linéaires entre les sudations observées et prédites.



	Expériences en laboratoire			Expériences sur le terrain		
	n = 672			n = 237		
	Pente	Inters	r	Pente	Inters	r
ISO 7933	0,757	75	0,744	0,663	52	0,523
Modèle PHS	0,848	41	0,760	1,056	- 46	0,745

Tableau 3 : Régressions entre valeurs de sudation (g/h) observées et prédites par le modèle de la norme ISO 7933 et par le modèle PHS

Le modèle PHS donne des prédictions clairement meilleures, en particulier pour les expériences sur le terrain où 55% de la variance totale est expliquée au lieu de 27%.

Les améliorations apportées par le modèle PHS ne sont cependant pas totalement reflétées par ces statistiques. A titre d'exemple, la figure 6 compare l'évolution des sudations prédites par la norme ISO 7933 ( $SW_{ISO}$ ) et celles prédites par le modèle PHS ( $SW_{PHS}$ ) pendant une expérience en laboratoire impliquant différentes séquences de travail et conditions climatiques.

Dans ce cas particulier, les moyennes des valeurs minute par minute de  $SW_{ISO}$  et de  $SW_{PHS}$  pour la durée entière de l'expérience sont à peu près identiques, les surestimations de la sudation donnée par  $SW_{ISO}$  pendant les phases de travail étant numériquement contrebalancées par les sous-estimations pendant les phases de repos.

Selon l'analyse de régression exécutée ci-dessus, les deux modèles seraient donc considérés comme aussi précis l'un que l'autre. Ce n'est évidemment pas le cas, comme le montre l'évolution au cours du temps.  $SW_{ISO}$  est supposé augmenter ou diminuer instantanément dès qu'une nouvelle séquence débute, alors que  $SW_{PHS}$  suit remarquablement les valeurs observées.

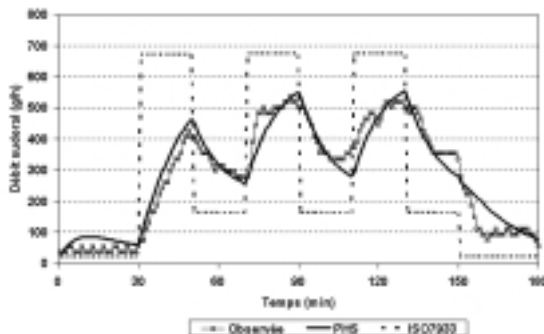


Figure 6: Valeurs observées et prédites de la sudation (calculées sur base de ISO 7933 et de PHS) dans une expérience en laboratoire avec 3 séquences de travail et de climat

## VI. COMPARAISON ENTRE LE MODELE PHS ET L'INDICE WBGT

La comparaison entre l'indice WBGT et le modèle PHS s'impose puisque ces deux techniques sont ou seront normalisées et que la première est proposée internationalement comme méthode de dépistage. Or une méthode de dépistage n'est valable que si elle ne donne pas de faux

négatifs (cas à problème non détecté), quitte à avoir de nombreux cas faux positifs (détection de cas où en réalité il n'y a pas de problème). Cette comparaison ne peut être menée que sur base des durées d'exposition prédites.

La durée limite d'exposition ( $DLE_{PHS}$ ) a été calculée par le modèle PHS pour 3680 ensembles de conditions, avec des paramètres primaires variant dans la gamme indiquée dans le tableau 4. L'isolation thermique du vêtement a été considérée constante et égale à 0,6 clo, puisque c'est la valeur postulée par l'indice WBGT.

	Gamme	Pas	Nombre de valeurs
Température de l'air (°C)	20-50	5	7
Humidité relative (%)	20-80	20	4
( $t_r - t_a$ ) (°C)			
avec $t_r$ limité à 60°C	0-40	10	< 5
Vitesse d'air (ms <sup>-1</sup> )	0,01-2	0,5	5
Métabolisme (W)	100-450	50	7
Isolation thermique (clo)	0,6	-	1

Tableau 4 : Gammes et pas de variation des 6 paramètres primaires pour la simulation de 3680 ensembles de conditions

En même temps, l'indice WBGT a été calculé pour les mêmes conditions selon la norme ISO 7243 (1982) et la valeur limite  $WBGT_{limite}$  a été calculée en utilisant:

$$WBGT_{limite} = 34,3 - M / 35,5 \quad (\text{avec } M \text{ en } W).$$

La figure 7 compare la durée limite  $DLE_{PHS}$  à la différence ( $WBGT - WBGT_{limite}$ ). Une différence négative signifie que le travail peut être effectué sans interruption. Une différence positive implique, selon la norme ISO 7243, que des périodes de repos et de récupération doivent être organisées.

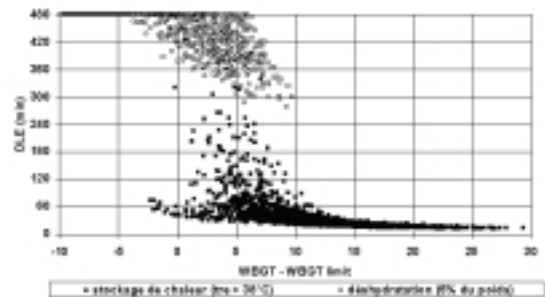


Figure 7: Evolution de la durée limite d'exposition (DLE) prédite à partir du modèle PHS (valeur la plus basse entre la DLE déshydratation et la DLE stockage de chaleur), selon la différence entre l'indice WBGT et le WBGT limite (ISO 7243)

La figure présente manifestement deux ensembles de situations.

- Les premières où l'arrêt du travail est dû au risque de perte hydrique excessive. Il s'agit de situations pénibles, mais où un équilibre est maintenu grâce à une sudation abondante. La sudation reste dans la majorité des cas inférieure à 1 litre/heure et la perte hydrique peut atteindre 5% du poids corporel, soit quelque 3,5 kg pour un sujet moyen. Le risque de perte hydrique excessive n'apparaît dès lors au plus tôt qu'après 3,5 heures.

- Dans le second type de condition, l'élévation de la température centrale est l'élément limitatif. Il s'agit de situations plus contraignantes où la sudation, quelle qu'elle soit, ne suffit plus à évacuer la chaleur, où le stockage est plus rapide et où la température centrale s'élève. Le risque est alors thermostatique et le sujet doit s'arrêter bien avant qu'un risque de déshydratation se pose.

La plupart des  $DLE_{PHS}$  inférieures à 4h correspondent à des conditions pour lesquelles la différence de WBGT est positive. Pour ces conditions, selon l'indice WBGT, le travail ne peut pas être poursuivi sans interruption et des régimes travail-repos sur 1h doivent être organisés. De ceci on peut conclure que le WBGT semble jouer son rôle de méthode de dépistage, suggérant qu'il puisse y avoir un problème de contrainte thermique. Le modèle PHS peut alors être employé pour déterminer s'il y a, en effet, un problème de contrainte dû à la chaleur et pour organiser le travail en conséquence.

La figure 7 montre aussi que des conditions existent où, au contraire, l'indice WBGT ne dépasse pas la limite de WBGT, alors que, selon le modèle PHS, la durée de travail devrait être limitée.

C'est le cas, par exemple, pour la condition:  $t_a = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_r = 60^\circ\text{C}$ ,  $HR = 20\%$ ,  $v_a = 1 \text{ m/s}$ ,  $M = 450 \text{ W}$ ,  $I_{cl} = 0,6 \text{ clo}$ , pour laquelle l'indice WBGT serait égal à 19,6 et la valeur  $WBGT_{limite}$  égale à 21,6.

Le modèle PHS prédit en fait que la température rectale limite de  $38^\circ\text{C}$  sera atteinte après 53 minutes, mais que la valeur de régime sera égale à  $38,03^\circ\text{C}$ . Cette différence de  $0,03^\circ\text{C}$  n'a évidemment aucun sens et l'on doit admettre que la température limite de  $38^\circ\text{C}$  ne sera pas dépassé. La durée limite relative au risque de perte hydrique exagérée est égale à 458 minutes et doit être utilisée. Tous les points de la figure 7 avec une différence négative de WBGT et une  $DLE_{PHS}$  inférieure à 100 minutes correspondent à de telles conditions et ne doivent donc pas être interprétés comme des limitations du modèle PHS.

Ceci montre bien combien il reste indispensable de réfléchir aux résultats de tout modèle de calcul et qu'il est peu sage d'en adopter le résultat (53 min.) sans discernement. L'indice est un outil de travail pour comprendre ce qui se passe. Il aide à prendre la décision! Il ne la prend pas!

La conclusion suivante s'impose donc:

- l'indice WBGT peut être employé pour examiner les conditions qui pourraient mener à un problème de contrainte due à la chaleur;
- il ne peut pas être employé pour organiser sans risque le régime de travail-repos.

## VII. CONCLUSIONS

Le modèle de prédiction de la Sudation Requise décrit dans la norme ISO 7933 a été revu en profondeur et de nouveaux algorithmes ont été développés, basés sur la littérature scientifique et sur des recherches récentes concernant les échanges de chaleur par convection et évaporation, la température cutanée, la distribution de chaleur

entre la peau et le centre du corps, la température rectale et le rendement évaporatoire. Les critères maximaux de sudation, de déshydratation et d'augmentation de la température centrale ont également été revus.

Toutes ces modifications ont conduit au développement d'un nouveau modèle appelé Predicted Heat Strain (PHS), qui rend possible la prédiction de la sudation réelle et de la température rectale pour un sujet moyen et le calcul de durées limites d'exposition (DLE) pour protéger 50% et 95% de la population des travailleurs.

Ce modèle PHS a été validé à partir de données provenant de 672 expériences menées en laboratoire précédemment par les différents partenaires de cette recherche. Le modèle s'avère fournir des prédictions raisonnablement précises, compte tenu des différences interindividuelles en terme 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.

Aussi bien pour les expériences en laboratoire que sur le terrain, les prédictions du modèle PHS sont clairement plus précises que celles obtenues à partir de la norme ISO 7933. L'indice Sudation Requise de la norme ISO 7933 doit donc être considéré comme obsolète.

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.

Le modèle PHS a été proposé pour la révision de la norme ISO 7933 en cours.

Cette recherche, menée dans le cadre du projet européen BIOMED II, a permis de mettre à la disposition des spécialistes en santé au travail, un ensemble de méthodes claires, susceptibles de leur permettre d'évaluer de manière précise les risques de contrainte thermique et de protéger efficacement les travailleurs.

Le problème est parfois jugé mineur en Belgique. Il ne l'est pas dans beaucoup d'autres pays. Les résultats de la recherche commune devraient rendre possible de réduire le coût des accidents de travail ainsi que des soins médicaux dus à la morbidité contractée sur le lieu de travail.

Ces méthodes devraient permettre également de garantir le même niveau de sécurité et de santé dans toutes les industries dans tous les pays et en particulier dans les pays du sud qui sont directement concernés par ces conditions de travail.

Le développement de normes plus adéquates devrait paver la route vers une directive européenne spécifique concernant l'évaluation des conditions de travail à la chaleur ou, au moins, devrait clarifier les exigences de la Directive européenne 89/654 (1989) au sujet des conditions minimales de sécurité et de santé pour les lieux de travail.

Dans certains cas de figure, les durées limites d'exposition préconisées par le modèle PHS sont plus longues que celles que renseignaient l'indice Sudation Requise. Sur cette constatation, il a été reproché à PHS de moins bien protéger les salariés.

Ce reproche nous semble basé sur une confusion entre la précision d'une méthode et l'usage qui en est fait. Indéniablement, PHS prédit de manière plus précise l'évolution des paramètres physiologiques: aussi peut-on affirmer que, dans les cas de figure invoqués, l'indice Sudation Requisite préconisait d'interrompre le travail avant que se pose un problème réel de déshydratation ou d'élévation de température à 38°C.

L'indice PHS ne dit pas cependant que le salarié doit travailler tout ce temps. Dans les mêmes cas, les indices PMV-PPD renseignent que les conditions sont inconfortables de manière extrême et que 100% des salariés en seront insatisfaits.

Le problème de la limite reste bien un problème politique. Aux scientifiques revient le devoir de décrire de manière la plus précise possible la relation exposition - réponse. Aux partenaires sociaux, à la société, revient le devoir de préciser ce qu'ils acceptent en fonction de la valeur qu'ils accordent à la santé. Ils préciseront alors le facteur de protection à utiliser.

Rappelons enfin la limitation principale de PHS: il ne concerne que des situations de travail avec vêtements de travail traditionnels. Le modèle n'est donc toujours pas applicable aux sapeurs pompiers ou toute autre personne, dans l'industrie pharmaceutique ou électronique, qui travaillent avec des vêtements de protection étanches. Dans ces cas, seule une surveillance individuelle directe permettra de comprendre comment évoluent les astreintes et de déterminer quelle organisation du travail instaurer.

## VIII. REFERENCES

- ALBER-WALLERSTRÖM B., HOLMÉR I. (1994) Sweating efficiency of unacclimatized women and men working in hot, humid environments. In: Frim J., Ducharme M.B., Tickuisis P. (eds) Proceedings of the 6th Int. Conference on Envir. Ergon., Montebello, Canada, September 25-30.
- ARAKI T., INOUE M., FUJIWARA H. (1979) Experimental studies on sweating for exercise prescription: total body sweat rate in relation to workload in physically trained adult males. *Journal of Human Ergology* 8: 91-99.
- CANDAS V., LIBERT J.P., BRANDENBERGER G. (1985) Hydration during exercise – Effects on thermal and cardiovascular adjustments. *Eur. J. Appl. Physiol.* 55, 2: 113-122.
- COLIN J., TIMBAL J., HOUDAS Y., BOUTELIER C., GUIEU J. (1971) Computation of mean body temperature from rectal and skin temperatures. *J. Appl. Physiol.* 31, 3: 484-489.
- COUNCIL DIRECTIVE 89/654/EEC (1989) concerning the minimum safety and health requirements for the workplace (first individual directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/191/EEC). *Official Journal of the European Communities*, No L/393/1-12.
- EDWARDS R.J., BELYAVIN A.J., HARRISON M.H. (1978) Core temperature measurement in man. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, November: 1289-1294.
- GOSELIN R.E. (1947) Rates of sweating in the desert. In: Adolph EF (ed.) *Physiology of man in the desert*. Interscience Publishers, New York, pp. 44.
- HAVENITH G. (1997) Individual heat stress response. Proefschrift ter verkrijging van de graad van Doctor; Katholieke Universiteit Nijmegen.
- HAVENITH G., HOLMÉR I., DEN HARTOG E.A., PARSONS K.C. (1999) Clothing evaporative heat resistance-proposal for improved representation in standards and models. *Annals of Occupational Hygiene* 43, 5: 339-346.
- HETTINGER TH., EISSING G., HERTTING R., STEINHAUS I. (1985) Belastung und Beanspruchung durch das Tragen persönlicher Schutzausrüstungen, BAU (Hrsg.). *Forschungsbericht Nr. 392*, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- HOLMÉR I., NILSSON H., HAVENITH G., PARSONS K.C. (1999) Clothing convective heat exchange. Proposal for improved representation in standards and models. *The Annals of Occupational Hygiene*, 43, 5: 329 - 338.
- ISO 7243 (1982) Ambiances chaudes – Détermination de l'indice de contrainte thermique WBGT. Organisation Internationale de Normalisation, Genève.
- ISO 7933 (1989) Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de la sudation requise. Organisation Internationale de Normalisation, Genève.
- ISO 9920 (1995) Estimation des caractéristiques thermiques d'un vêtement. Organisation Internationale de Normalisation, Genève.
- KÄHKÖNEN E. (1993) Comparison and error analysis of instrumentation and methods for assessment of neutral and hot environment on the basis of ISO standards. Kuopio University Publications, Kuopio, Finland, pp.101.
- KAMPMANN B. (1997a) Working paper GT2/13 of BIOMED project BMH4-CT96-0648 "HEAT": Risk analysis for one colliery of Ruhrkohle AG in 1995.
- KAMPMANN B. (1997b) Working paper GT2/12 of BIOMED project BMH4-CT96-0648 "HEAT": Rehydration in field experiments and laboratory investigations.
- LIVINGSTONE S.D., NOLAN R.W., CAIN J.B. ET AL. (1994) Effect of working in hot environments on respiratory air temperatures. *European Journal of Applied Physiology* 69: 98-101.
- MALCHAIRE J. (1997) Stratégie générale de prévention des risques professionnels. *Cahiers de Médecine du travail*. XXXIV, 3-4, 159-166.
- MALCHAIRE J., PIETTE A., COCK N. (1998) 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.

21. MALCHAIRE J. (1991) Predicted sweat rate in fluctuating thermal conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 63: 282-287.
22. MALCHAIRE J., GEBHARDT H.J., PIETTE A. (1999) Strategy for evaluation and prevention of risk due to work in thermal environment. *The Annals of Occupational Hygiene*, 43, 5:367-376.
23. MALCHAIRE J., KAMPMANN B., HAVENITH G., MEHNERT P., GEBHARDT H.J. (2000) Criteria for estimating acceptable exposure times in hot work environment, a review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 73, 4: 215-220.
24. MALCHAIRE J., PIETTE A., KAMPMANN B., MEHNERT P., GEBHARDT H., HAVENITH G., DEN HARTOG E., HOLMÉR I., PARSONS K., ALFANO G., GRIEFAHN B. (2001) Development and validation of the predicted heat strain model. *The Annals of Occupational Hygiene* 45, 6: 123-135.
25. MEHNERT P., MALCHAIRE J., KAMPMANN B., PIETTE A., GRIEFAHN B., GEBHARDT H.J. (2000) Prediction of the average skin temperature in warm and hot environments. *European Journal of Applied Physiology* 82, 1-2: 52-60.
26. PARSONS K.C., HAVENITH G., HOLMÉR I., NILSSON H., MALCHAIRE J. (1999) The effects of wind and human movement on the heat and vapour transfer properties of clothing. *The Annals of Occupational Hygiene*, 43, 5: 367-376.
27. SALTIN B., HERMANSEN L. (1966) Oesophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *J. Appl. Physiol.* 21, 6: 1757-1762.
28. VARENE P. (1986) Computation of respiratory heat exchanges. *J. Appl. Physiol.* 61, 4: 1586-1589.
29. WHO SCIENTIFIC GROUP (1969) Health factors involved in working under conditions of heat stress. *Tech. Rep. series No 412, WHO.*
30. WYNDHAM C.H., HEYNS A.J. (1973) The probability of heat stroke developing at different levels of heat stress. *Arch. Sci. Physiol.* 27, A: 545-562.
31. WYNDHAM C.H., STRYDOM N.B., MORRISON J.F., WILLIAMS C.G., BREDELL G.A.G., MARITZ J.S., MUNRO A. (1965) Criteria for physiological limits for work in heat. *J. Appl. Physiol.* 20, 1: 37-45.

#### REMERCIEMENTS

Le programme BIOMED II de la Commission européenne a apporté son soutien financier à cette recherche.