

Travail en ambiance thermique chaude

Conférence de résidanat
Pr TOURAB Djamel

Février 2020

INTRODUCTION

Les situations de travail en ambiance chaude sont très fréquentes en Algérie notamment dans les secteurs des mines, de la sidérurgie, de la métallurgie, de la production de verre et de l'industrie pétrolière ..., aggravées par un climat particulièrement chaud en été. Malgré certaines évolutions technologiques, les risques liés aux expositions à des contraintes thermiques élevées sont toujours présents et constituent une préoccupation majeure pour le médecin du travail.

Le problème posé par le travail en ambiance chaude est celui de la conservation de l'homéothermie. L'homme est un homéotherme et à ce titre s'impose l'impératif de maintenir la température interne du corps dans une plage étroite autour de 37°C au risque d'avoir des accidents liés à une hyperthermie excessive. En ambiance chaude, l'organisme accumule la chaleur endogène produite par le métabolisme et celle cédée par l'environnement sous divers flux d'échange (conduction, convection et rayonnement). Des mécanismes physiologiques de thermorégulation interviennent pour éliminer la chaleur excédentaire afin d'équilibrer le bilan thermique. Lorsque l'équilibre ne peut être atteint, on est alors confronté à une contrainte thermique.

L'évaluation des risques peut se faire à partir de la mesure de la contrainte thermique ou de la détermination de l'astreinte thermique. Des outils existent. La question a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques qui ont permis la mise au point d'indices de contrainte thermique performants mais complexes et d'utilisation parfois difficile.

Si le médecin du travail est le souvent confronté aux situations de contrainte thermique, il peut être aussi amené à répondre à des demandes liées au confort thermique. Une partie de la conférence est consacrée à ce point précis.

I. PARAMETRES PHYSIQUES CARACTERISTIQUES D'UNE AMBIANCE THERMIQUE

Quatre paramètres climatiques caractérisent une ambiance thermique. Il s'agit de la température de l'air T_a en °C, l'humidité de l'air exprimée par sa pression partielle de vapeur P_a en kPa, la température moyenne de rayonnement T_r en °C, et la vitesse de l'air V_a en m/s

Les méthodes de mesurage de ces paramètres physiques font l'objet de la norme ISO 7726 (ISO, 1998) qui décrit les différents types de capteurs à utiliser, spécifie leur gamme de mesurage, leur précision et recommande les procédures de mesurage.

1. La température de l'air

La température de l'air (T_a) doit être mesurée en dehors de tout rayonnement thermique. Divers types de thermomètres sont disponibles : thermomètres à mercure, thermomètres à alcool et thermomètres électroniques.

Quel que soit le type de thermomètre, le capteur doit être protégé contre le rayonnement.

2. L'humidité de l'air

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

- Pression partielle de vapeur d'eau : fraction de la pression atmosphérique due à la vapeur d'eau (kPa) ;
- Humidité relative (HR) qui est donnée par l'expression : $HR = 100 \cdot P_a / P_{s,T_a}$ où P_{s,T_a} est la pression de vapeur saturante associée à la température de l'air ;
- Température de rosée: température à laquelle l'air doit être refroidi pour devenir saturé en humidité (°C) ;
- Température humide (T_h) qui est la température la plus basse atteinte par un manchon humide protégé contre le rayonnement et ventilé à plus de 2 m/s par l'air ambiant.

Toutes ces grandeurs étant liées mathématiquement, le diagramme psychrométrique facilite le passage de l'une à l'autre.

Les paramètres d'humidité les plus souvent utilisés en pratique sont :

- L'humidité relative mesurée au moyen d'hygromètres ou d'appareils électroniques plus spécialisés ;
- La température humide mesurée au moyen du psychromètre.

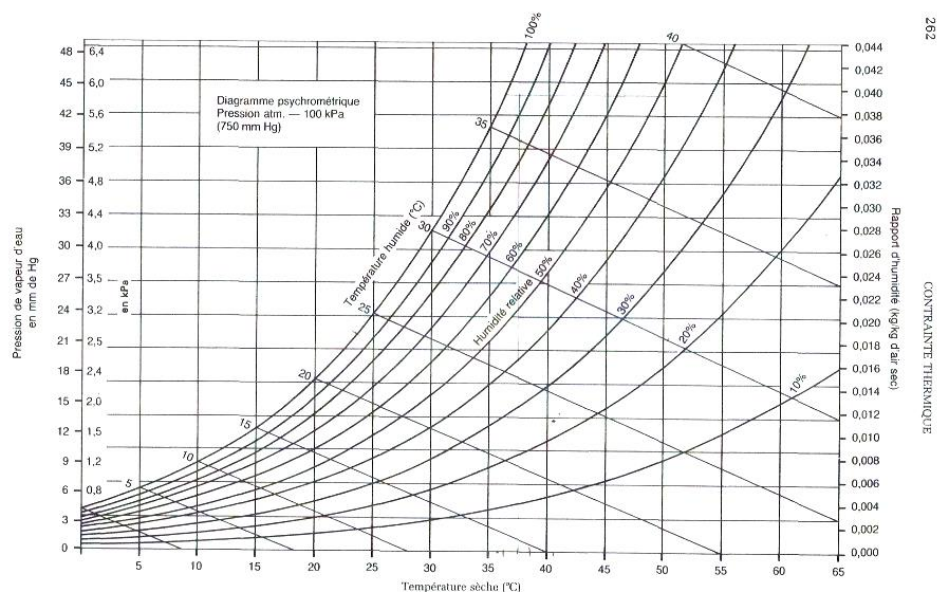


Figure 6.5. Diagramme psychrométrique, adapté de Ellis, Smith et Walters (52)

3. La température moyenne de rayonnement

La température moyenne de rayonnement (T_r) est considérée comme la température uniforme d'une sphère virtuelle noire mat, de grand diamètre, qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel.

Elle peut être déterminée à partir de la température T_g , mesurée avec un thermomètre à globe noir ou bien à partir des températures planes de rayonnement mesurées dans trois directions perpendiculaires.

Le thermomètre à globe noir consiste en une sonde thermique dont l'élément sensible est placé au centre d'une sphère de 15 cm de diamètre, en cuivre (métal bon conducteur de chaleur) et peinte en noir mat (coefficient d'absorption dans l'infrarouge proche de 1).

Pour un globe noir standard de 15 cm de diamètre, la température moyenne de rayonnement T_r peut être calculée à partir de la température du globe T_g sur la base de l'expression suivante :

$$T_r = \sqrt[4]{(T_g + 273)^4 + 2.5 \times 10^8 \times V a^{0.6} (T_g - T_a) - 273}$$

4. La vitesse de l'air

La vitesse de l'air, exprimée en m/s, est mesurée à l'aide d'un anémomètre. La gamme de mesurage préconisée par la norme ISO 7726 s'étend de 0,05 à 2 m/s, la mesure étant réalisée sur un intervalle de temps de 1 à 3 minutes. La précision requise est de 5%.

Il existe deux types d'anémomètres : les anémomètres à ailettes (gamme de mesurage de 0,3 m/s à 10 m/s) et les anémomètres thermiques (gamme de 0 à 1 m/s).

II. ECHANGES DE CHALEUR ET BILAN THERMIQUE

Le corps humain échange de la chaleur avec son environnement selon plusieurs modes : conduction, convection, rayonnement et évaporation.

1. La conduction

La conduction est la transmission de chaleur entre deux solides en contact. De tels échanges sont observés entre la peau et les vêtements, les chaussures, les points d'appui (siège, poignées), les outils, etc.

$$K = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2)$$

Avec :

λ : coefficient de conductibilité thermique
 e : épaisseur du conducteur
 T_1 : température du conducteur
 T_2 : température cutanée

En pratique, dans le calcul du bilan thermique, il est fait abstraction du flux de chaleur par conduction car négligeable.

2. La convection

Le flux de chaleur échangé par convection C , en watts par mètre carré (W/m^2), peut être estimé par la formule :

$$C = h_c \times F_{clC} \times (T_{sk} - T_a)$$

où

- h_c : coefficient de convection ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), qui est fonction de la différence entre T_{sk} et T_a en cas de convection naturelle, et de la vitesse de l'air (V_a en m/s), en convection forcée ;
- F_{clC} : facteur par lequel le vêtement réduit les échanges convectifs ;
- T_{sk} : température cutanée ;
- T_a : température de l'air.

3. Le rayonnement

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dont l'intensité est fonction de la quatrième puissance de sa température absolue T (en degrés Kelvin (K)).

En situation de travail, la peau peut recevoir le rayonnement émis par les surfaces avoisinantes.

Le flux thermique échangé par rayonnement R (en W/m^2) entre le corps et son environnement peut être approximé par l'expression :

$$R = h_r \times \frac{A_R}{A_D} \times F_{clR} \times (T_{sk} - T_r)$$

où :

- h_r est le coefficient d'échange par rayonnement ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) ;
- A_R/A_D est la fraction de la surface du corps participant aux échanges qui est de l'ordre de 0,66, 0,70 ou 0,77 selon que le sujet est accroupi, assis ou debout ;
- F_{clR} est le facteur par lequel le vêtement réduit les échanges par rayonnement ;
- T_{sk} (en K) est la température cutanée moyenne ;
- T_r (en K) est la température moyenne de rayonnement de l'environnement, c'est-à-dire la température uniforme d'une sphère noire mate, de grand diamètre, qui entourerait le sujet et échangerait avec lui la même quantité de chaleur que l'environnement réel.

En milieu de travail, les échanges par rayonnement peuvent être très importants par exemple chez les ouvriers travaillant à proximité d'un haut fourneau et astreints à un effort physique intense.

4. L'évaporation

Si la peau est couverte entièrement de sueur, l'évaporation est maximale ($E_{\max}$) et ne dépend que des conditions ambiantes selon l'expression suivante :

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

où:

h_e est le coefficient d'échange par évaporation (W/m² kPa) ;

$P_{sk,s}$ est la pression saturante de vapeur d'eau à la température de la peau (en kPa) ;

P_a est la pression partielle de vapeur d'eau de l'ambiance (en kPa) ;

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

L'évaporation constitue le moyen le plus efficace de perdre de la chaleur pour le corps humain. L'évaporation de 1g de sueur à une température de 35 °C absorbe environ 2.4 KJ, ce qui correspond à une déperdition de 0.580 Kcal (Vogt et Metz, 1981).

Chez l'homme, l'évaporation a lieu au niveau de l'appareil respiratoire et de la peau.

L'intensité de cette évaporation est fonction de l'humidité de l'air, de la vitesse de l'air, de la fraction de surface cutanée mouillée, de la perméabilité à la vapeur d'eau du vêtement et de la température cutanée.

5. L'isolement thermique vestimentaire

Le vêtement influence les échanges de chaleur. Un facteur de correction intervient donc dans le calcul des flux de chaleur par convection, rayonnement et évaporation de manière à tenir compte du vêtement : F_{clC} , F_{clR} et F_{pcl} .

Les résistances thermiques aux échanges s'expriment en C°.m².W⁻¹. L'unité d'isolation vestimentaire est le clo, défini comme l'isolation vestimentaire nécessaire pour maintenir en équilibre le bilan thermique d'un sujet au repos, exposé à un air calme, à une température de 21 °C. En pratique, il correspond à l'isolation assurée par une tenue de ville classique et les sous-vêtements habituels.

Exprimé en unité physique, 1 clo=0.155 C°.m².W⁻¹.

Dans le cas d'un vêtement en coton, les deux facteurs de correction F_{clC} et F_{clR} peuvent être déterminées par:

$$F_{cl} = \frac{1}{1 + (h_c + h_r)I_{cl}}$$

où:

h_c est le coefficient d'échange par convection;

h_r est le coefficient d'échange par rayonnement;

I_{cl} est l'isolation thermique effective (C°.m².W⁻¹) du vêtement.

Concernant la réduction de transfert de chaleur par évaporation, le facteur correctif F_{pcl} est donné par l'expression :

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 2.22h_c I_{cl}}$$

La **norme ISO 9920 (ISO, 1995)** donne l'isolation thermique de différents ensembles vestimentaires.

6. Bilan thermique

En ambiance chaude, la stabilité de la température corporelle chez l'homme implique un équilibre entre la production endogène de chaleur (métabolisme) , l'apport de chaleur par les échanges thermiques (conduction, convection et rayonnement) avec l'environnement et les pertes de chaleur par évaporation.

Le bilan s'écrit :

$$B = (M - W) + C_{res} + E_{res} + K + C + R + E$$

Formule dans laquelle :

M : métabolisme de travail
W : énergie mécanique (travail extérieur fourni)
C_{res} : convection respiratoire
E_{res} : évaporation respiratoire
K : conduction
C : convection
R : rayonnement
E: évaporation

La convection respiratoire et l'évaporation respiratoire peuvent être estimées à partir des formules simplifiées proposées par Fanger (1972) :

$$C_{res} = 0.0014 M (34 - T_a)$$

$$E_{res} = 0.0173 M (P_a - 5,87)$$

Par convention, les échanges sont positifs lorsqu'ils apportent de la chaleur au corps. Ils sont négatifs lorsqu'il y a déperdition de chaleur.

Au repos, la totalité de l'énergie apportée par le métabolisme M est transformée en chaleur. En activité, une fraction de M est transformée en énergie mécanique W. L'apport en chaleur est donc égal à (M-W).

L'équilibre est atteint lorsque le bilan est nul.

Trois classes d'ambiances thermiques peuvent être distinguées. Le caractère tolérable ou non-tolérable d'une ambiance thermique est fonction de la possibilité d'équilibrer le bilan thermique après la mise en jeu des mécanismes de thermorégulation.

Le schéma ci-dessous résume les différentes situations avec les réponses physiologiques correspondantes.

Neutralité thermique	Ambiance chaude	Ambiance très chaude
Echanges passifs : Cutanés Respiratoires Homéothermie	VASODILATATION SUDATION Perte de chaleur (Thermolyse)	Augmentation de la Température centrale Hyperthermie
CONFORT	TOLERABLE	NON TOLERABLE

La zone de confort thermique est une zone de neutralité thermique. L'équilibre se fait de façon passive. La thermogénèse et la thermolyse au niveau de la peau et au niveau respiratoire s'équilibrent facilement. Le corps est en homéothermie et la température centrale est relativement stable autour de 37 °C.

La zone tolérable se traduit par un équilibre thermique plus ou moins réalisé entre des apports de chaleurs élevés et une thermolyse accrue permettant le maintien de l'homéothermie.

La zone intolérable se caractérise pour un bilan thermique non équilibré. La température centrale n'est plus stable. Son élévation est excessive et peut avoir des conséquences sur la santé.

III. ADAPTATION DE L'HOMME A LA CHALEUR

Le maintien de l'homéothermie implique la mise en jeu de mécanismes physiologiques de thermorégulation en réponse à des astreintes thermostatique, circulatoire et sudorale.

Du point de vue des échanges thermiques, il est habituel de désigner par « noyau » les organes du tronc et la tête et par « écorce » la peau, les tissus sous-cutanés, les muscles et les membres. Le noyau et l'environnement échangent de la chaleur à travers l'écorce.

1. Signaux thermiques

En cas d'accumulation de chaleur, les stimuli thermiques sont détectés par des thermorécepteurs situés à trois niveaux : récepteurs périphériques de la peau, récepteurs profonds (organes abdominaux, troncs veineux splanchniques et muscles squelettiques) et enfin récepteurs intégrés au système nerveux central. Ces signaux sont transmis à la région pré-optique de l'hypothalamus antérieur considéré comme le centre thermorégulateur de l'organisme.

La réponse efférente est fonction de la sommation et de la pondération de chaque information. Les informations provenant des différentes parties du corps ne possèdent pas la même valeur, la température centrale est prédominante.

On estime que la température corporelle (T_b) est le résultat d'une pondération de la température cutanée (T_{sk}) représentative de la température de l'écorce et de la température rectale (T_{re}) représentative de la température du noyau.

Ainsi : $T_b = 0.1 T_{sk} + 0.9 T_{re}$

L'élévation de la température corporelle déclenche le processus de thermorégulation.

2. Mise en jeu des mécanismes du système cardio-vasculaire

L'accélération de la fréquence cardiaque a pour effet l'augmentation du débit cardiaque et la redistribution du sang vers les muscles au travail et les tissus sous cutanés au dépens du réseau splanchnique et rénal. L'objectif est l'acheminement de la chaleur par le sang vers l'écorce.

La vascularisation cutanée a un rôle essentiel dans le transfert de chaleur vers le milieu ambiant grâce à des variations de débits réglées par la vasomotricité. Les structures vasculaires sont richement innervées par des fibres sympathiques adrénergiques responsables d'une vasoconstriction au repos. La chaleur inhibe l'effet vasoconstricteur de ces fibres et provoque ainsi une vasodilatation périphérique.

3. Sudation et élimination de chaleur

La chaleur excédentaire est acheminée vers la peau en vue de son élimination : c'est le rôle de la sudation et l'évaporation de la sueur.

La sudation est un phénomène actif assuré par 2 à 3 millions de glandes sudoripares réparties inégalement sur la peau. La sécrétion sudorale est déclenchée par les centres neurovégétatifs à partir d'informations telles que la température et la mouillure cutanées

Une augmentation de la température cutanée déclenche une libération d'acétylcholine et augmente la sensibilité des récepteurs situés sur les cellules sécrétrices des glandes sudoripares.

Une diminution de la mouillure cutanée permet une meilleure évaporation de la sueur. Les mouillures cutanées locales sont variées, elles peuvent être totales dans certaines zones alors que d'autres aires cutanées sont sèches.

4. Mécanismes comportementaux

Différentes attitudes comportementales peuvent améliorer la tolérance à la chaleur :

- Alimentaires avec notamment un apport hydrique supplémentaire et la réduction de la ration calorique,
- Port de vêtements plus légers, vêtements de protection, vêtements moins absorbants vis-à-vis des rayonnements thermiques, augmentation de la ventilation sous le vêtement,
- Utilisation d'écrans physiques naturels ou artificiels pour se protéger des sources de rayonnements thermiques,
- Posturales avec la réduction du métabolisme, optimisation du temps de repos, réduction du travail aux heures les plus chaudes

5. Effets de l'acclimatement

Sous l'effet d'expositions répétées ou prolongées, l'homme développe des ajustements adaptatifs permettant une meilleure tolérance à la chaleur. C'est ce que l'on appelle acclimatement qui est généralement obtenu après une période d'exposition de 9 à 12 jours (Pandolf 1998). Il permet :

- une meilleure efficacité de la sudation,
- une réduction du risque de troubles ioniques par diminution de la teneur en NaCl de la sueur (réabsorption accrue),
- une réduction de l'astreinte cardio-vasculaire.

IV. EVALUATION DES AMBIANCES THERMIQUES

On distinguera deux approches différentes :

- Evaluation de la contrainte thermique,
- Evaluation du confort thermique.

1. Indices de la contrainte thermique

De nombreux indices de contrainte thermique ont été mis au point. On en dénombre plus d'une cinquantaine. Cependant, le mouvement de normalisation (Normes ISO) a poussé à adopter universellement les mêmes indices qui sont détaillés ci-dessous.

1.1. Indice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

Mis au point par Yaglou et Minard en 1957 pour le compte de la marine américaine, l'indice WBGT a été adopté par le NIOSH en 1972 et par l'ACGIH en 1990 (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). L'utilisation très courante de cet indice tient surtout à sa simplicité.

Il fait l'objet de la **norme ISO 7243- 2017** (Ergonomie des ambiances thermiques - Estimation de la contrainte thermique basée sur l'indice WBGT).

Le WBGT (en °C) est déterminé à partir des formules empiriques suivantes :

- Dans des conditions avec rayonnement solaire :
$$WBGT = 0,7T_{hn} + 0,2T_g + 0,1T_a$$
- Pour des conditions intérieures sans rayonnement solaire :
$$WBGT = 0,7T_{hn} + 0,3T_g$$

où

T_{hn} = température humide naturelle (ventilation naturelle et non forcée),

T_a = température de l'air

T_g = température d'un globe noir de 150 mm

Mais l'indice WBGT a des limites : il n'est pas précis et ne permet pas de déterminer les paramètres sur lesquels on peut agir pour réduire la contrainte thermique. De plus, il ne s'applique pas à l'évaluation des contraintes thermiques subies pendant de très courtes périodes. Pour ces raisons, cet indice doit être considéré comme l'outil d'une première approche des conditions de travail en ambiance chaude donc un outil de dépistage. En

cas de dépassement des valeurs de référence, une analyse doit être menée sur la base d'un autre indice plus précis.

Le mode de détermination et l'interprétation de cet indice selon les prescriptions de la norme ISO 7243- 2017 figure en annexe.

1.2. Indice HSI (Heat Stress Index)

Le HSI est égal au rapport entre l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique (E_{req}) et l'évaporation maximale permise par le milieu ambiant (E_{max}), exprimé sous forme de pourcentage (Belding et Hatch, 1955) :

$$HSI = \frac{E_{req}}{E_{max}} \times 100$$

Il s'agira donc de déterminer :

- Les charges relatives à la convection, le rayonnement et le métabolisme de façon à établir l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique du corps :

$$E_{req} = M + C + R$$

- L'évaporation maximale permise par l'ambiance.

Si $HSI > 100$, la chaleur est stockée dans le corps et les temps d'exposition admissibles sont fondés sur une élévation de 1,8 °C de la température centrale (stockage de chaleur de 264 kJ).

Une limite supérieure de 390 W/m² est attribuée à E_{max} (débit sudoral de 1 litre/h, considéré comme le débit maximal de transpiration maintenu pendant 8 heures). Des hypothèses simples sont établies pour l'effet des vêtements (chemise à manches longues et pantalon) et la température de la peau est supposée constante à 35 °C.

Les formules permettant le calcul de cet indice sont fournies en annexe.

La principale critique formulée à l'endroit du HSI est qu'il ne permet pas de prédire de façon adéquate le degré d'astreinte physiologique exprimée en termes de sudation.

1.3. Indice de la sudation requise (SW_{req})

L'indice de la sudation requise décrit par la norme ISO 7933 (ISO, 1989b) a été abandonné et remplacé par l'indice PHS. Nous estimons que sa présentation peut être utile pour découvrir les formules et les outils mathématiques repris dans la détermination de la PHS (cf document en annexe).

L'indice de la sudation requise (ou débit sudoral requis) SW_{req} a été développé par Vogt et coll. en 1981.

La sudation requise (SW_{req}) est calculée à partir de l'évaporation requise E_{req} et du rendement évaporatoire requis (r_{req}) :

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{r_{req}}$$

Dans une situation de contrainte thermique, l'évaporation requise pour conserver l'équilibre thermique équivaut à la somme des apports et des déperditions de chaleur c'est-à-dire que E_{req} doit être égal à : $E_{req} = (M - W) + C + R + C_{res} + E_{res}$.

Avec :

- M : métabolisme de travail
- W : énergie mécanique (travail extérieur fourni)
- C : convection
- R : rayonnement
- C_{res} : convection respiratoire
- E_{res} : évaporation respiratoire

Par convention, les échanges sont positifs lorsqu'ils apportent de la chaleur au corps. Ils sont négatifs lorsqu'il y a déperdition de chaleur.

Le rendement évaporatoire requis r dépend de la mouillure cutanée requise laquelle correspond au rapport E_{req}/E_{max} :

$$r_{req} = 1 - 0.5 \omega_{req}^2$$

$$\omega_{req} = \frac{E_{req}}{E_{max}}$$

L'estimation de l'évaporation maximale (E_{max}) est établie selon la formule suivante :

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

Avec :

- h_e : coefficient de transfert thermique par évaporation
- F_{pcl} : facteur de réduction d'échange thermique latent
- $P_{sk,s}$: pression de vapeur saturante à la température de la peau
- P_a : pression partielle de vapeur d'eau ambiante

La détermination de ces grandeurs est faite à partir des six paramètres fondamentaux : température de l'air (T_a), température de rayonnement (T_r), humidité relative, vitesse de l'air (V_a), isolement vestimentaire (I_{cl}), dépense énergétique (M) et travail extérieur (W). La température moyenne de la peau est donnée par une équation de régression linéaire multiple sinon une valeur de 36 °C est admise.

Le calcul de la sudation prédite prend en compte deux limites physiologiques : le débit sudoral maximal (SWmax) et la mouillure cutanée maximale (ω_{max}).

Si le débit sudoral requis peut être réalisé sans provoquer de perte hydrique inadmissible, aucune limitation n'est à apporter à l'exposition à la chaleur pendant un poste de 8 heures. Si tel n'est pas le cas, c'est à dire si $E_{req} > E_{max}$ et si $SW_{req} > D_{max}/8$ des durées limites d'exposition (DLE) seront calculées sur deux bases :

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

1.4. Indice PHS (Predicted Heat Strain ou Astreinte Thermique Prévisible)

La révision de modèle de prédiction de la Sudation Requise a conduit au développement d'un nouveau modèle appelé Predicted Heat Strain (PHS) ou Astreinte Thermique Prévisible.

Cet indice est basé sur un modèle mathématique du comportement physiologique d'un sujet moyen exposé à la chaleur à partir de l'expression suivante du bilan thermique :

$$M - W = C_{res} + E_{res} + C + R + E$$

Il permet la prédiction de :

- Débit sudoral au temps t
- Perte hydrique cumulée au temps t
- Température centrale au temps t

Il tient compte des critères limites suivants :

- Une perte hydrique maximale sur 8 heures de :
 - 7.5% du poids pour un sujet moyen
 - 5% du poids pour protéger 95% des individus si boissons librement accessibles.
- Une température centrale (rectale) maximale de 38 °C.

Il permet également de déterminer la durée limite d'exposition (DLE) 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 la température centrale de 38°C.

Les calculs sont réalisés à partir d'un programme informatique spécifique.

Cet indice est encadré par la **norme ISO 7933:2004** (Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible).

2. Indices de confort thermique (PMV et PPD)

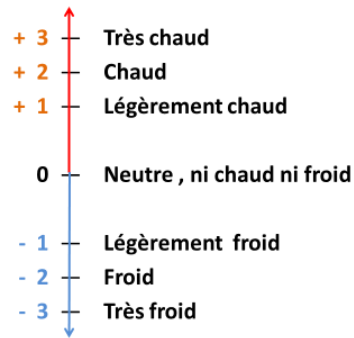
Le confort thermique est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique.

Les indices PMV-PPD décrits par la **norme ISO 7730** permettent de déterminer un ensemble de six paramètres primaires (température de l'air, humidité, vitesse de l'air, température de rayonnement, métabolisme, vêtements) procurant le confort.

Ces indices permettent aussi de quantifier la sensation de chaleur qui serait associée à différentes ambiances.

2.1. PMV (Predicted Mean Vote ou Vote Moyen Prévisible)

Le PMV est un indice permettant de prédire la valeur moyenne des expressions subjectives d'un grand groupe de personnes exposées à une certaine ambiance sur une échelle de sensation thermique à 7 points :



La norme ISO 7730 propose des tables donnant **la valeur PMV** en fonction des paramètres suivants : Métabolisme (M), Isolement thermique (Icl), Vitesse d'air (Va) et Température opérative T_o .

La température opérative est fonction de T_a , T_r et des coefficients de convection et de rayonnement selon la relation :

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

L'ambiance thermique est acceptable ou propice au confort thermique quand :

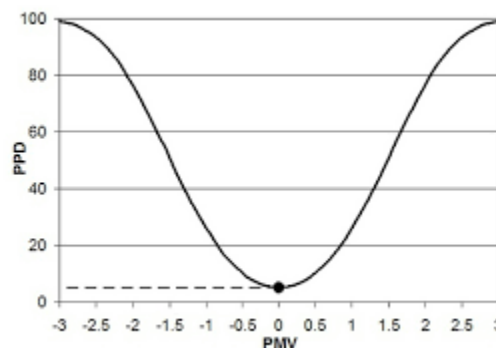
PMV compris entre (-0.5) et (+0.5)

2.2. PPD : Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits

Même avec une valeur proche de zéro, des individus pourront ne pas être en situation de confort. Il persistera toujours des personnes insatisfaites.

Il est donc utile de prédire dans une situation donnée le pourcentage de personnes satisfaites ou insatisfaites par rapport à l'environnement thermique. C'est la vocation de l'indice PPD.

Les indices PMV et PPD sont liés. Pour une population donnée, le pourcentage de personnes insatisfaites est déterminé à partir d'un graphe en fonction de la valeur du PMV.



De ce graphe, il ressort qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100% des individus et que dans le cas le plus favorable (PMV=0) il subsiste 5% d'insatisfaits.

La norme ISO 7730 préconise de **limiter à 10% le nombre d'insatisfaits**, ce qui correspond à un PMV compris entre -0.5 et +0.5.

V. AFECTIIONS LIEES A LA CHALEUR

Elles résultent de la défaillance de la thermorégulation par action centrale sur les centres de la thermorégulation ou de la mise en jeu excessive de la thermorégulation.

1. Coup de chaleur

Il survient brutalement après une sudation importante suivie d'un arrêt de la thermorégulation (arrêt de la sudation).

Le tableau clinique comporte :

- Hyperthermie à 41 °C
- Malaise avec accélération du pouls
- Visage cyanosé, peau rouge et chaude
- Dyspnée avec respiration rapide et superficielle
- Vertiges, troubles visuels et confusion.

L'évolution vers un état de choc est fréquente avec manifestations neurologiques : syndrome pyramidal, Babinski bilatéral, convulsions voire coma. Le coup de chaleur est une urgence thérapeutique : la mort peut survenir brutalement si un refroidissement et une réhydratation ne sont pas rapidement entrepris.

Des séquelles peuvent être observées : insuffisance rénale (par destruction des membranes cellulaires et des systèmes enzymatiques thermolabiles) et insuffisance hépatique.

2. Etat d'épuisement

La température centrale est souvent moins élevée que dans le coup de chaleur, la peau est humide et pâle, le sujet devient somnolent puis de plus en plus confus, avec des vertiges, des vomissements et des crampes musculaires. La pression artérielle tend à s'abaisser jusqu'au collapsus.

3. Accidents généraux de déshydratation

Ils associent une déshydratation intra et extracellulaire avec soif intense, pli cutané, baisse de la pression artérielle, baisse de la diurèse, langue sèche et troubles de la conscience. Une perte de 1 litre de sueur représente 2,5 % du volume d'eau total d'un adulte. Les accidents de déshydratation peuvent survenir dès que la perte atteint 5 % du volume d'eau totale du corps. Le déficit sodique est lié à l'absence de remplacement du sodium perdu par sudation excessive. Chez un sujet non acclimaté la perte peut avoisiner 6 à 9 g/l, alors que chez le sujet acclimaté elle n'est plus que de 3 ou 4 g/l.

4. Syncope de chaleur

Elle est liée à une chute tensionnelle due à l'afflux du sang aux muscles et à la peau. Il en résulte un déficit sanguin au cerveau d'où la syncope sans élévation de la température centrale. Le rafraîchissement et la mise en décubitus suffisent à rétablir la conscience.

5. Crampes de chaleur

Elles sont dues à une hyponatrémie et une hypochlorémie conséquences de la transpiration excessive. Elles sont précédées de troubles du goût et de l'odorat. Ce sont des contractions spasmodiques involontaires des muscles et en premier des muscles fléchisseurs des doigts qui se contractent entraînant une demi-flexion de tous les doigts. La bouche se déforme en contraction circulaire comme si le sujet sifflait. Des douleurs plus ou moins violentes y sont associées ainsi qu'une tachycardie. Les accès durent 2 ou 3 minutes et se reproduisent après une pause de quelques minutes. Le traitement consiste en l'administration de sel (NaCl).

VI. PREVENTION

Cette partie ne sera pas développée.

En résumé la prévention se base sur :

- Des actions techniques visant à agir sur les différents éléments intervenant dans le bilan thermique (réduire la convection, le rayonnement et la charge physique, favoriser l'évaporation) et donc agir sur les paramètres climatiques (température de l'air, température de rayonnement, vitesse de l'air, humidité de l'air), le métabolisme et l'isolement vestimentaire.
- Des actions organisationnelles visant à agir sur la situation de travail
- La surveillance médicale
- Des mesures générales (par exemple aménagement d'aires de repos climatisées, fourniture de d'eau et boissons fraîches)

ANNEXE :

Méthodes de calcul des indices de contrainte thermique WBGT, Indice HSI, Indice Sudation requise

WBGT (Wet Bulb Globe Temperature)

Norme ISO 7243

1) Mode de calcul du WBGT

Le WBGT (en °C) est déterminé à partir des formules empiriques suivantes :

- Dans des conditions avec rayonnement solaire :

$$\text{WBGT} = 0,7T_{\text{hn}} + 0,2T_g + 0,1T_a$$

- Pour des conditions intérieures sans rayonnement solaire :

$$\text{WBGT} = 0,7T_{\text{hn}} + 0,3T_g$$

où

T_{hn} = température humide naturelle (ventilation naturelle et non forcée),

T_a = température de l'air

T_g = température d'un globe noir de 150 mm

La mesure de ces températures se fait simultanément à des hauteurs normatives au niveau de la tête, de l'abdomen et des chevilles. Le WBGT global est obtenu d'après la formule :

$$\text{WBGT} = \frac{\text{WBGT}_{\text{tête}} + 2(\text{WBGT}_{\text{abdomen}}) + \text{WBGT}_{\text{cheville}}}{4}$$

2) Valeurs de référence du WBGT pour un travail continu de 4 heures et un isolement vestimentaire de 0.6 clo. Norme ISO 7243 (2017)

Métabolisme (W)	Sujet acclimaté (WBGT °C)	Sujet non acclimaté (WBGT °C)
100 - 125	33	32
126 - 235	30	29
236 - 360	28	26
361 - 465	25	22
> 465	23	16

*

HSI (Heat Stress Index)

(Belding et Hatch, 1955).

$$HSI = \frac{E_{req}}{E_{max}} \times 100$$

- Equations utilisées dans le calcul de l'indice de contrainte thermique (HSI) et des durées d'exposition admissibles (AET)

Flux de chaleur	Equation	Vêtus	Non vêtus
1) Rayonnement (R)	$R = k_1 (35 - T_r) \quad Wm^{-2}$	$k_1 = 4,4$	$k_1 = 7,3$
2) Convection (C)	$C = k_2 V_a^{0,6} (35 - T_a) \quad Wm^{-2}$	$k_2 = 4,6$	$k_2 = 7,6$
3) Evaporation (E_{max})	$E_{max} = k_3 \cdot V_a^{0,6} (5.6 - P_a) \quad Wm^{-2}$ (limite supérieure de $390 Wm^{-2}$)	$k_3 = 7,0$	$k_3 = 11,7$
4) Evaporation requise (E_{req})	$E_{req} = M + R + C$		
où: M = puissance métabolique; T_a = température de l'air; T_r = température de rayonnement; P_a = pression partielle de vapeur; V_a = vitesse de l'air			

- Interprétation des valeurs de l'indice de contrainte thermique (HSI)

HSI %	Effet d'une exposition pendant 8 heures
0	Pas d'astreinte thermique
10-30	Astreinte chaude légère à modérée. Peu d'effet sur le travail physique, mais effet possible sur le travail qualifié
40-60	Astreinte chaude sévère, avec menace pour la santé si faible forme physique. Acclimatement requis
70-90	Astreinte chaude très sévère. Le personnel doit être sélectionné médicalement
100	Astreinte chaude maximale tolérée chaque jour par des hommes jeunes, en forme, acclimatés

- Durée d'exposition admissible (AET) : en minutes

$$EAT = \frac{2440}{E_{req} - E_{max}}$$

Le calcul n'est possible que si $E_{req} > E_{max}$

Indice de sudation requise (ISO 7933)

$$SW_{req} = \frac{E_{req}}{r}$$

La détermination de cet indice comporte les 3 étapes suivantes :

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

Si le débit sudoral requis peut être réalisé par des sujets sans provoquer de perte hydrique inadmissible, aucune limitation n'est à apporter à l'exposition à la chaleur pendant un poste de 8 heures. Si tel n'est pas le cas, c'est à dire si $E_{req} > E_{max}$ et si $SW_{req} > D_{max}/8$ des durées limites d'exposition (DLE) seront calculées sur deux bases :

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

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

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

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

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

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

Valeurs limites de mouillure cutanée ($\omega_{\max}$), débit sudoral maximal ($SW_{\max}$), stockage maximal de chaleur ($Q_{\max}$) perte hydrique cumulée ($D_{\max}$). (ISO 7933).

Critères	Sujet non acclimaté		Sujet acclimaté	
	Alarme	Danger	Alarme	Danger
$\omega_{\max}$	0,85		1,0	
$SW_{\max}$: - repos ($W \cdot m^{-2}$) ($g \cdot h^{-1}$)	100 260	150 390	200 520	300 780
$SW_{\max}$: - travail ($W \cdot m^{-2}$) ($g \cdot h^{-1}$)	200 520	250 650	300 780	400 1040
$Q_{\max}$ ($W \cdot h \cdot m^{-2}$)	50	60	50	60
$D_{\max}$ ($W \cdot m^{-2}$) (g)	1000 2600	1250 3250	1500 3900	2000 5200

Le débit sudoral est exprimé en $W \cdot m^{-2}$, 100 $W \cdot m^{-2}$ sont équivalent à 260 $g \cdot h^{-1}$. Les valeurs proposées sont calculées pour un sujet moyen de 1,70 m et 70 kg

ISO 7933 Sudation requise : équations utilisées dans le calcul de l'indice SW_{req}

- $SW_{req} = \frac{E_{req}}{r_{eq}}$
- $E_{req} = (M - W) - C_{res} - E_{res} - C - R$
- $C_{res} = 0,0014 M(35 - t_a)$
- $E_{res} = 0,0173 M(5,624 - P_a)$
- $C = h_c \cdot F_{cl} (t_{sk} - t_a)$
- $R = h_r \cdot F_{cl} (t_{sk} - t_r)$
- $\omega = \frac{E}{E_{max}}$
- $r = 1 - \frac{\omega^2}{2}$
- $h_c = 2,38(\bar{t}_{sk} - \bar{t}_a)^{0,25}$ par convection naturelle
- $h_c = 3,5 + 5,2 v_{ar}$ convection forcée pour $v_{ar} < 1 \text{ ms}^{-1}$
- $h_c = 8,7 v_{ar}^{0,6}$ pour $v_{ar} > 1 \text{ ms}^{-1}$
- $v_{ar} = v_a + 0,0052(M - 58)$
- $h_r = \sigma E_{sk} \frac{A_r}{A_{du}} \cdot \frac{[(\bar{t}_{sk} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4]}{(\bar{t}_{sk} - \bar{t}_r)}$
- $F_{cl} = \frac{1}{(h_c + h_r)I_{cl} + \frac{1}{f_{cl}}}$

- Dans le cas d'un vêtement en coton, les deux caractéristiques thermiques du vêtement F_{clC} et F_{clR} peuvent être déterminées par :

$$F_{cl} = \frac{1}{1 + (h_c + h_r) \cdot I_{cl}}$$

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

- $h_e = 16,7 h_c$

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

Le F_{pcl} peut être approximé avec la formule suivante :

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 2,22 h_c I_{cl}}$$

- $\bar{t}_{sk} = 30,0 + 0,093 t_a + 0,045 t_r - 0,571 v_a + 0,254 P_a + 0,00128 M - 3,57 I_{cl}$

Définition des termes employés dans la norme ISO 7933

Symbole	Terme	Unité
A_r/A_{du}	Fraction de la surface de la peau impliquée dans un échange thermique par rayonnement	ND
C	Echange thermique sur la peau par convection	Wm^{-2}
C_{res}	Déperdition de chaleur respiratoire par convection	Wm^{-2}
E	Ecoulement de chaleur par évaporation à la surface de la peau	Wm^{-2}
E_{max}	Taux d'évaporation maximal pouvant être atteint lorsque la peau est complètement mouillée	Wm^{-2}
E_{req}	Evaporation requise pour l'équilibre thermique	Wm^{-2}
E_{res}	Déperdition de chaleur respiratoire par évaporation	Wm^{-2}
E_{sk}	Pouvoir d'émission de la peau (0,97)	ND
F_{cl}	Facteur de réduction d'échange thermique sensible dû aux vêtements	ND
F_{pcl}	Facteur de réduction d'échange thermique latent	ND
f_{cl}	Rapport entre superficie vêtue et non vêtue d'un sujet	ND
h_c	Coefficient de transfert thermique par convection	$Wm^{-2}K^{-1}$
h_e	Coefficient de transfert thermique par évaporation	$Wm^{-2}kPa^{-1}$
h_r	Coefficient de transfert thermique par rayonnement	$Wm^{-2}K^{-1}$
I_{cl}	Isolation thermique sèche fondamentale des vêtements	$m^2 KW^{-1}$
K	Echange thermique sur la peau par conduction	Wm^{-2}
M	Puissance métabolique	Wm^{-2}

P_a	Pression partielle de vapeur	kPa
$P_{sk,s}$	Pression de vapeur saturante à la température de la peau	kPa
R	Echange thermique sur la peau par rayonnement	Wm^{-2}
r_{req}	Rendement évaporatoire de la sudation pour le débit sudoral requis	ND
SW_{req}	Débit sudoral requis pour l'équilibre thermique	Wm^{-2}
σ	Constante de Stefan-Boltzmann : $5,67 \times 10^{-8}$	$Wm^{-2}K^{-4}$
t_a	Température de l'air	°C
t_r	Température rayonnante moyenne	°C
t_{sk}	Température moyenne de la peau	°C
V_a	Vitesse de l'air pour un sujet immobile	ms^{-1}
V_{ar}	Vitesse relative de l'air	ms^{-1}
W	Puissance mécanique	Wm^{-2}
ω	Humidité de la peau	ND
ω_{req}	Humidité requise de la peau	ND