

Cours: Ambiances physiques

II. Ambiances thermiques

Noura Abdesselam

10/3/2018

Dans un environnement et avec une tenue vestimentaire donnée, un individu peut avoir « trop chaud », « trop froid » ou « être bien ». L'ambiance thermique est un facteur de condition de travail jouant un rôle important sur la santé, la sécurité et le confort des travailleurs. Cela concerne aussi bien les situations de chaleur ainsi que les situations de froid

Ambiances physiques

II- Ambiances thermiques

Introduction

1. Notions de base sur les ambiances thermiques.

1.1. L'homéothermie

1.1.1. Définition :

1.1.2 Thermogénèse : production de chaleur

1.1.3 Thermolyse : perte de chaleur

1.1.4. Le bilan thermique et Evaporation requise (Ereq)

1.2. Lutte physiologique contre les ambiances chaudes et froides

1.2.1. La vasodilatation

1.2.2. La sudation

1.2.3. L'acclimatation

1.2.4. Le frissonnement

1.2.5. La vasoconstriction

1.2.6. Augmentation du métabolisme de base

1.3. Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides

1.3.1. Ambiance chaude

1.3.2. Ambiance froide

2. Méthodes d'analyses des ambiances chaudes

2.1. Confort thermique et neutralité thermique

2.1.1. Neutralité thermique

2.1.2. Confort thermique

2.1.3. Le PMV (Vote moyen Prévisible)

2.1.4. Le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits)

2.2. Evaluation de la contrainte thermique chaude

2.2.1. Principe et définition du WBGT

2.2.1.1. Termes considérés

2.2.2. Principe et définition de l'indice de sudation requise

3. Méthodes d'analyses des ambiances froides

3.1. Isolement vestimentaire

3.1.1. Durée limite d'exposition globale

3.2. Indice de refroidissement (WCI)

4. Réduction de la contrainte

4.1. Eliminer les risques

4.2. Réduire la contrainte thermique dans les ateliers

4.2.1. Activité de l'opérateur

4.2.2. Les échanges par rayonnement

4.2.3 Les échanges par convection

4.2.4 Les échanges par évaporation

4.3 Promouvoir l'hygiène alimentaire

Introduction

L'ambiance thermique est un facteur de condition de travail jouant un rôle important sur la santé, la sécurité et le confort des travailleurs. Cela concerne aussi bien les situations de chaleur ainsi que les situations de froid.

Les ambiances physiques d'inconfort sont très courantes en milieu professionnel. On exprime assez facilement et spontanément les sensations éprouvées face à l'ambiance thermique à laquelle on est soumis : sensation de chaleur, d'étouffement et de froid, associés à des effets caractéristiques tels que la transpiration, le frissonnement... Ces premiers symptômes doivent attirer l'attention du médecin du travail et du responsable Hygiène Sécurité Environnement et conduire à une analyse complète.

L'évaluation du risque ambiance thermique au poste de travail est une étape délicate. La réglementation impose à l'employeur d'assurer la protection de ses employés à travers une analyse des risques annuels ou lors de toute modification du poste de travail et du code du travail. Le facteur ambiance thermique doit être ainsi pris en compte évalué et maîtrisé.

1. Notions de base sur les ambiances thermiques.

1.1. L'homéothermie

1.1.1. Définition :

L'homme est un homéotherme, c-à-d que sa température centrale est stabilisée à environ 37°C, en dépit des variations de la température extérieure. Il s'agit d'un équilibre entre la thermogénèse (production de chaleur) et la thermolyse (perte de chaleur).

Cet équilibre permet les performances biologiques, mentales et physiques optimales. Le centre de la thermorégulation se situe dans l'hypothalamus.

1.1.2 Thermogénèse : production de chaleur

C'est la somme des chaleurs produites par l'organisme à savoir :

- Le métabolisme de base :
Dépense énergétique de l'organisme à la température de neutralité thermique ou à l'état de repos.
- L'exercice musculaire :
Dépense énergétique dû à l'activité de travail.
- Les métabolismes ajoutés :
Particulièrement la digestion

1.1.3 Thermolyse : perte de chaleur

La thermolyse correspond aux échanges de chaleur entre l'organisme et l'environnement. Ce sont, en général, des mécanismes qui permettent à l'organisme d'évacuer la chaleur excédentaire à condition que l'environnement le permette.

Quand l'environnement est défavorable (taux d'humidité important, absence de ventilation...), ces mécanismes ne sont plus efficaces et entraînent un stockage de la chaleur excédentaire pouvant engendrer des pathologies.

Il existe 4 types de mécanismes quantifiables, permettant d'évaluer la contrainte thermique s'exerçant sur l'opérateur :

a- La conduction

C'est l'échange de chaleur entre deux corps solides en contact, ici l'organisme est apparenté à un solide quelconque. Elle dépend de :

- La différence de température entre les deux corps : la chaleur allant toujours du corps le plus chaud vers le corps le plus froid.
- La conductivité thermique du solide en contact ;
- L'épaisseur du solide ;
- La surface de contact entre la peau et le solide.

Le mécanisme de conduction est généralement négligé dans l'évaluation de la contrainte thermique. Le fait que les opérateurs soient habillés la rend négligeable face aux autres mécanismes.

b- La convection

C'est l'échange de chaleur entre l'organisme et le fluide qui l'entoure (liquide ou gaz). Elle dépend de :

- La vitesse du fluide :
Selon la vitesse de l'air, il existe deux types de convection, la convection naturelle ou libre quand la vitesse de l'air est inférieure à 0,2m/s et la convection forcée pour des vitesses supérieures à 0,2/s.
- La température de l'air
- La température de la peau.

Les échanges de chaleur par convection sont proportionnels à la vitesse du fluide en contact. Ainsi plus celle-ci est importante, plus la perte de chaleur par ce mécanisme sera importante. C'est le cas des ventilateurs. Ils ne refroidissent pas l'atmosphère mais contribue à une perte calorifique.

c- Le rayonnement (R)

Le rayonnement représente les échanges de chaleur entre l'organisme et un solide séparé. Les corps chauds émettent de la chaleur vers les corps froids par infrarouge. (Sidérurgie, travail devant un four fonderie...).

d- L'évaporation (E)

L'évaporation est le moyen le plus efficace pour éliminer la chaleur produite par le corps humain. Il en existe plusieurs formes :

- Perte de vapeur d'eau par les poumons
Négligeable pour l'homme sauf au cours d'exercices musculaires.
- Perspiration :
Diffusion de l'eau des couches superficielles de la peau vers l'extérieur (en générale faible sauf au cours d'exercices musculaires).
- Sudation
C'est le moyen d'évaporation le plus important à condition que la sueur soit effectivement évaporée c-à-d que l'air ambiant soit renouvelé et non saturé en vapeur d'eau (1 gramme d'eau évaporée permet d'éliminer 0,6 kcal). Elle se fait par la sueur excrétée par les glandes sudoripares.

1.1.4. Le bilan thermique et Evaporation requise (Ereq)

Le bilan thermique correspond à l'ensemble des échanges de chaleur subit par l'organisme

$$\text{Bilan} = M \pm R \pm C-E$$

M représente le métabolisme énergétique général de l'organisme, comprenant le métabolisme de base et le métabolisme d'exercice ($W.m^{-2}$). Le métabolisme d'exercice est fourni par des tables normatives, selon le type d'activité exercé.

Selon diverses conditions, le bilan peut être :

- Supérieur à 0
L'organisme est en hyperthermie et emmagasine de la chaleur. Les mécanismes de thermolyse ne sont pas suffisamment efficaces et

risquent d'engendrer des pathologies. Il est nécessaire d'agir sur le mécanisme pouvant rendre le plus de résultat.

- Egal à 0
C'est la situation la plus favorable. L'opérateur se situe dans une zone de neutralité thermique.
- Inférieur à 0 : hypothermie
L'organisme est en hypothermie, il perd plus de chaleur qu'il en gagne ou qu'il en produit. Cette situation engendre elle aussi des pathologies. Il est nécessaire d'effectuer un bilan des contraintes permettant d'établir les causes de ce dérèglement (cause environnementale, vent froid, sur quel mécanisme agir....)

1.2. Lutte physiologique contre les ambiances chaudes et froides

1.2.1. La vasodilatation

C'est le premier mécanisme de lutte mis en œuvre face à une ambiance chaude C'est un mécanisme surtout efficace au repos puisque l'exercice physique augmente la quantité de sang vers les muscles rendant la vasodilatation difficile.

1.2.2. La sudation

L'exercice physique limitant la vasodilatation, l'organisme fait intervenir la sudation. C'est le moyen le plus efficace de lutter contre la chaleur.

Cette sudation est rendue possible grâce aux glandes sudoripares qui vont puiser l'eau et le sel dans le sang. Les glandes vont ensuite de façon pulsative faire remonter l'eau et le sel à la surface de la peau pour que l'eau soit évaporée. Cette eau puise la chaleur de l'organisme pour passer à l'état gazeux et se diluer dans l'air ambiant.

1.2.3. L'acclimatation

L'exposition régulière à la chaleur va déclencher une acclimatation du sujet, c-à-d :

- Déclenchement de la sudation plus rapide
- Débit sudoral plus important
- Efficacité thermolytique plus grande.

Les normes prennent en compte l'acclimatation du sujet dans l'évaluation de la contrainte thermique. D'une manière générale, le laps de temps à cette dernière est d'environ 15 jours.

1.2.4. Le frissonnement

Les muscles horripilateurs libèrent, face au froid, de la chaleur en soulevant un poil, ce qui donne une sensation de « chair de poule ».

Ce phénomène peut s'amplifier jusqu'à provoquer la contraction de gros muscle : c'est le frissonnement. Il a pour objectif le dégagement de chaleur.

1.2.5. La vasoconstriction

Le diamètre des capillaires sanguins, situés sous la peau soumise au froid, va se réduire. Ainsi le volume de sang exposé au froid diminue (l'échange par convection diminue). Parallèlement le sang chaud réchauffe le sang froid en profondeur.

Ce mécanisme est peu efficace car les tissus extérieurs doivent être irrigués pour ne pas entraîner de gelure.

1.2.6. Augmentation du métabolisme de base

Le corps va libérer des hormones qui accélèrent les réactions enzymatiques et ainsi augmentent la production de chaleur générale.

Il faut noter que les mécanismes hormonaux mettent environ une semaine pour lutter et s'adapter efficacement contre le froid. Durant cette phase d'adaptation, l'opérateur nécessite une surveillance particulière.

1.3. Pathologies liées aux ambiances chaudes et froides

.D'une manière générale, les effets dus aux contraintes thermiques chaudes ou froides sont accompagnés d'une diminution des capacités mentales et physiques des opérateurs.

1.3.1. Ambiance chaude

- Augmentation du rythme des battements du cœur entraînant un risque de syncope,
- Déficit en eau et en sels consécutifs à une transpiration excessive. Ceci entraîne une augmentation de la température du corps ainsi que fatigue, vertiges, nausées ;
- Affection cutanée : brûlure, rougeur ;
- Coup de chaleur avec perte de connaissance pouvant entraîner la mort (appelé syncope de chaleur).

1.3.2. Ambiance froide

- Chute de la dextérité articulaire
- Pâleur extrême due à une faible irrigation sanguine de la peau
- Gelures
- Baisse de la température (hypothermie) pouvant conduire à une atteinte du système nerveux et des perturbations respiratoires
- Augmentation de la pression artérielle et des risques d'accident cardiaque (lié à la vasoconstriction).

2. Méthodes d'analyses des ambiances chaudes

2.1. Confort thermique et neutralité thermique

2.1.1. Neutralité thermique

Elle correspond à une zone d'ambiance thermique pour laquelle on ne mobilise aucun mécanisme de lutte contre le froid ou le chaud.

2.1.2. Confort thermique

C'est une appréciation subjective. Ainsi, la notion de confort est équivalente pour les trois exemples suivants :

Température	40°C	32°C	28°C
Humidité	26%	68%	100%
Vitesse de l'air	1 mètre par seconde	0,1 mètre par seconde	nulle

Tant que les mécanismes physiologiques de lutte sont suffisants pour assurer un bon équilibre thermique, ce sont des ambiances tolérables. Quand ces mécanismes sont saturés (ex : environnement défavorable), l'équilibre peut être rompu. Il faut alors déterminer des durées maximales d'exposition.

2.1.3. Le PMV (Vote moyen Prévisible)

Le PMV est un indice de confort thermique qui permet de prévoir la valeur moyenne des expressions subjectives d'un groupe de personnes exposées à une certaine ambiance thermique et situant leurs sensations sur une échelle de sensation thermique à 7 points :

- +3 : Très chaud +2 : Chaud +1 : Légèrement chaud
- 0 : neutre, ni chaud ni froid
- 1 : Légèrement froid -2 : Froid -3 : Très froid

Pour déterminer cet indice on utilise des tables correspondant aux niveaux d'activités (métabolisme M) en considérant l'isolement thermique (Icl), et la température de l'air (Ta)

Cet indice n'est utilisable que sous certaines conditions de métabolisme, d'isolement vestimentaire, de température d'air (Ta), de rayonnement (Tr) et de vitesse d'air (Va) :

- M : 46-232W.m⁻²
- Icl : 0-0.31 m². °C.W⁻¹
- Ta : 10-30°C
- Tr : 10-40°C
- Va : 0-1m.s⁻¹

On estime que l'ambiance thermique est acceptable, c'est à dire propice au confort thermique, pour la majorité des personnes qui y sont soumise quand cet indice est compris entre +/- 0,5.

2.1.4. Le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits)

Le PMV ne permet pas de déterminer le pourcentage de personnes insatisfaites. Il est intéressant, dans une population donnée, de calculer le nombre de personnes insatisfaites correspondant au PMV de confort. Pour cela on utilise un deuxième indicateur : le PPD (Pourcentage Prévisible d'insatisfaits).

Ainsi, pour un PMV de 0,5, on a environ 10% de personnes insatisfaites.

Il est à présent possible de déterminer le pourcentage d'insatisfaits et donc le confort thermique qui résulte pour diverses situations

2.2. Evaluation de la contrainte thermique chaude

Deux indices permettent d'évaluer la contrainte thermique :

- WBGT : Wet Bulb Globe Temp,
- La sudation

Ces deux indices permettent avec précision d'évaluer le bilan thermique.

2.2.1. Principe et définition du WBGT

Le WBGT est un indice permettant de déterminer si le sujet est capable de travailler dans une ambiance donnée sur une durée de 8 heures. C'est la première démarche à effectuer dans le cas de l'analyse d'un poste de travail soumis à la chaleur

C'est un indice qui permet une évaluation simplifiée de la contrainte thermique grâce à une analogie physique entre les échanges thermiques du corps humain et ceux d'un dispositif de thermomètre humide d'une part et de thermomètre à globe noir d'autre part.

La mesure de ces températures se fait simultanément à des hauteurs normatives au niveau de la tête, de l'abdomen et des chevilles.

- A l'intérieur d'un bâtiment : $WBGT = 0,7T_{hn} + 0,3T_g$
- A l'extérieur d'un bâtiment: $WBGT = 0,7T_{hn} + 0,2T_g + 0,1T_a$

Le WBGT globale est donné d'après la formule :

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

En parallèle, il est nécessaire de procéder à une évaluation du métabolisme de l'opérateur selon son type d'activité. Des tables normatives fixent ces valeurs par classe.

Ces valeurs repères permettent de savoir si l'opérateur est capable de travailler 8h sans danger dans l'ambiance thermique étudiée. En effet, si le WBGT déterminé est supérieur à la valeur repère de la situation étudiée, cet opérateur ne pourra pas travailler 8h dans cette ambiance thermique.

Elles tiennent compte de l'acclimatation des sujets. Est considérée comme acclimatée une personne en bonne santé qui travaille depuis plus d'une semaine en ambiance chaude au poste considéré.

2.2.1.1. Termes considérés

Il y a plusieurs termes à considérer :

- a- La température humide naturelle (T_{hn}) en m/s

C'est une température obtenue par un thermomètre recouvert d'une mèche humide ventilée naturellement.

- b- La température de globe noir (T_g) en °C

Elle correspond à la température relevée au centre d'un globe peint en noir mate. La température de globe noir permet d'estimer la température perçue au niveau de la peau de l'individu.

c- La température d'air (Ta) en °C

C'est la température relevée au thermomètre sec, protégé du rayonnement et de l'air environnant. On utilise un psychromètre

On utilise pour ces différentes températures des thermomètres à thermo-résistance ou à thermocouple.

Exemple :

Un opérateur effectue un transport de matériaux lourds. C'est un nouveau embauché (non acclimaté). Il transporte les matériaux devant un four radiant.

Peut-il travailler 8 heures dans ces conditions ?

Les mesures de terrains :

	Thn	Tg
Tête	25°C	50°C
Abdomen	19°C	45°C
Cheville	17 °C	20°C

Nous calculons le WBGT pour la tête, l'abdomen et la cheville :

$$\text{WBGT Tête} = 0,7 \times 25 + 0,3 \times 50 = 32,5^\circ\text{C}$$

$$\text{WBGT Abdomen} = 0,7 \times 19 + 0,3 \times 45 = 26,3^\circ\text{C}$$

$$\text{WBGT Cheville} = 0,7 \times 17 + 0,3 \times 20 = 17,5^\circ\text{C}$$

Nous calculons ensuite le WBGT globale :

$$\text{WBGT} = \frac{32,5 + (2 \times 26,3) + 17,3}{4}$$

$$\text{WBGT} = 25,15^\circ\text{C}$$

Selon l'activité de l'opérateur est de classe 3, soit un métabolisme élevé. On observe que la valeur repère WBGT, pour un opérateur non acclimaté, est fixée à :

- Absence de courant d'air : 22°C,
- Mouvement de l'air perceptible : 23°C.

2.2.2. Principe et définition de l'indice de sudation requise

L'indice de sudation requise permet une approche plus précise que le WBGT et de caractériser les différents échanges de chaleurs sèches et latentes (convection, rayonnement et évaporation).

On peut ainsi connaître le mécanisme sur lequel il faut agir pour rendre acceptable la contrainte thermique. Cette méthode doit être utilisée en complément de la méthode basée sur l'indice WBGT si celle-ci s'avère négative.

3. Méthodes d'analyses des ambiances froides

L'action du froid doit être considérée :

- D'une part quant à son effet global sur l'ensemble du corps. La contrainte froide est alors estimée par l'isolement vestimentaire requis (I_{req})
- D'autre part quant à son effet local sur une partie du corps peu ou non protégée. La contrainte froide est alors estimée par l'indice de refroidissement WCI (Wind Chill Index)

3.1. Isolement vestimentaire

L'isolement thermique s'exprime par l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur du vêtement déterminant une densité de flux calorifique de 1 watt/m².

Les praticiens du vêtement expriment habituellement cet isolement vestimentaire en une unité pratique le clo : 1 clo = 0.155°C/Watt/m².

3.1.1. Durée limite d'exposition globale

Lorsque l'isolement vestimentaire disponible est inférieur à I_{req} , la durée de l'exposition au froid doit être limitée.

Le bilan thermique négatif ainsi calculé est la quantité de chaleur que la masse corporelle perd par unité de temps. Il lui correspond la vitesse d'abaissement de la température corporelle moyenne.

L'abaissement maximum tolérable de celle-ci est de 1°C. La durée limite d'exposition s'obtient alors en divisant 1°C par la vitesse d'abaissement de la température corporelle moyenne correspondant à la valeur du bilan thermique calculé.

Exemple

L'abaissement de 1°C de la température corporelle moyenne correspond à un déficit calorifique total de 60 Kcal/h pour un homme de 70

Kg. Si le bilan des flux thermiques est de 30 Kcal/h , la DLE sera de 2 heures.
Si le bilan des flux thermiques est de 120 Kcal/h, la DLE sera de 0.5 heures.
La température corporelle moyenne s'abaisserait de 0.5°C/h dans le premier cas et de 2°C/h dans le second cas.

3.2. Indice de refroidissement (WCI)

La formule de l'indice WCI :

L'indice WCI permet de prévoir le délai probable de gelure des zones de peau nue :

WCI (Kcal/ hm ²)	Effet
1000	Peau très froide(pas de gelure)
1200	Gelure cutané après 1 heure
1400	Après20mn
1600	Après15 mn
1800	Après10 mn
2000	Après8 mn
2200	Après4 mn

Exemple :

Dans une ambiance où $T_a = -30^{\circ}\text{C}$ et $V_a = 5,0 \text{ m/s}$. $WCI = 2,116 \text{ Kcal/h/m}^2$, auquel correspond un délai de gelure probable de 6 minutes. L'indice WCI est utilisable en milieu industriel (processus avec congélation).

4. Réduction de la contrainte

Les moyens de réduire la contrainte thermique, et donc d'éviter ses effets sur les opérateurs, sont multiples. Tout en reposant sur des principes simples, ils seront spécifiques à chaque atelier, chaque situation de travail et leur mise en œuvre nécessitera toujours une étude particulière. Pour cela, le recours à des spécialistes est souvent nécessaire.

4.1. Eliminer les risques

Avant toute intervention de correction d'une situation, il y a lieu de s'interroger sur les possibilités d'élimination du risque :

- En remplaçant les équipements sources de chaleur ou de froid par d'autres moyens faisant appel à des technologies différentes (exemple : le chauffage par induction se substituant au chauffage à la flamme),
- En procédant à de nouveaux agencements des équipements et locaux de travail (exemple : l'éloignement des équipements des zones où s'exerce l'activité des opérateurs).

4.2. Réduire la contrainte thermique dans les ateliers

Pour réduire la contrainte thermique, il est nécessaire d'intervenir sur les différents facteurs de production de chaleur et d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement. Ce qui suppose préalablement une observation et une analyse des postes de travail et de l'activité des opérateurs.

4.2.1. Activité de l'opérateur

L'activité physique de l'opérateur conduit à une production de chaleur par métabolisme. Pour limiter cette production, on peut :

- Automatiser le poste de travail,
- Implanter des aides à la manutention manuelle,
- Limiter les efforts par une étude du poste de travail,
- Fractionner l'exposition à la chaleur en organisant des pauses, des périodes de repos.

L'activité de l'opérateur contribue favorablement à compenser le refroidissement du corps lors de l'exposition en ambiance froide. C'est cependant un moyen dont il ne faut pas user au-delà des nécessités de la tâche.

4.2.2. Les échanges par rayonnement

Les sources extérieures rayonnent de la chaleur vers le corps lorsqu'elles sont plus chaudes que celui-ci. A l'inverse, c'est le corps qui cède de la chaleur aux sources plus froides que lui.

Pour limiter ces échanges on peut :

- Isoler les parties chaudes des machines,
- Encoffrer certaines machines et évacuer l'air chaud par des systèmes de ventilation canalisée,
- Interposer des écrans entre les sources et les opérateurs. Plusieurs types d'écrans sont utilisables (écrans équipés de surfaces réfléchissantes, écrans à circulation d'eau ou d'air interne, écrans à ruissellement d'eau, écrans filtrants),
- Equiper les opérateurs de vêtements spéciaux de protection antithermique en ambiance chaude ou de protection contre le froid.

4.2.3 Les échanges par convection

Il est utile de contrôler ces échanges pour leur donner un rôle bénéfique de réduction de la contrainte thermique.

En ambiance chaude, la ventilation par de l'air frais permet de refroidir le sujet ; en ambiance froide, la ventilation par de l'air chaud permet de le réchauffer. Tout procédé contraire à ces principes renforce la contrainte thermique. Pour mettre en œuvre ces moyens on peut :

- Conditionner l'air des locaux par le contrôle de la température et de son humidité,
- Ventiler les locaux (de façon générale, de façon localisée).

4.2.4 Les échanges par évaporation

Pour contrôler l'humidité de l'air on peut :

- Eliminer toute fuite de vapeur,
- Conditionner l'air (comme pour le contrôle de la convection),
- Egalement utiliser des vêtements de protection ventilés et refroidis qui permettent les échanges évaporatoires.

4.3 Promouvoir l'hygiène alimentaire

Il est également intéressant de promouvoir l'hygiène alimentaire. En effet, la consommation de boissons non alcoolisées et le contrôle diététique de l'alimentation participent favorablement à la réduction de la contrainte thermique.

Le médecin du travail joue un rôle essentiel dans ce domaine.