

CONTRAINTE THERMIQUE THÉORIE ET APPLICATION DU CONTRÔLE DE LA TEMPÉRATURE À UN POSTE CHAUD

Alain Turcotte, ing.

Beaulier inc.

Encore aujourd'hui, certains procédés chauds requièrent la présence de travailleurs à proximité. L'ambiance chaude, oblige le corps de le travailleur à modifier ses échanges thermiques avec l'environnement. Si certains paramètres interagissant avec le travailleur sont mal contrôlés, il peut en résulter des problèmes de santé. Plusieurs méthodes de prédiction et de mesure de la satisfaction d'un travailleur face à son environnement thermique ont été élaborées. Les plus connues sont certes l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) et l'Astreinte thermique prévisible de la norme ISO 7933-2004. Pour un concepteur, il est nécessaire de connaître ces valeurs de façon théorique afin de solutionner le problème au niveau de la conception. L'article qui suit traite des effets reliés au travail dans une ambiance chaude et les mesures à prendre pour réduire l'astreinte thermique.

Échange thermique et limite tolérable humaine

La température profonde interne du corps humain dépend de l'équilibre entre sa production et ses pertes de chaleur à l'ambient. Lorsque la température ambiante est inférieure à la température profonde interne (37.2°C) le corps diminuera ses échanges afin de maintenir sa température. Si, à l'inverse, la température ambiante est supérieure à la température profonde interne, le corps augmentera ses échanges avec l'ambient.

Le procédé thermodynamique fondamental dans l'échange entre le corps et son environnement peut être décrit par la relation suivante:

$$S=M+R+C-E \quad (1)$$

Où :

- S : Taux de stockage de la chaleur (W)
- M : Taux de production de chaleur (W)
(métabolisme)
- R : Taux de gain ou perte de chaleur par rayonnement (W)
- C : Taux de gain ou perte de chaleur par convection (W)
- E : Taux de perte de chaleur par sudation (W)

Deux autres mécanismes d'échange thermique entre le corps et son environnement ne sont pas inclus dans la formule mathématique #1, soit: la conduction et la respiration. Lorsque le corps est en contact avec d'autres matériels il y automatiquement échange sous forme de conduction. Cet échange peut résulter par une perte ou un gain de chaleur. La respiration implique le réchauffement et l'humidification de l'air respiré. Notez que ces deux phénomènes sont de faible intensité par rapport aux autres et sont généralement négligés.

Le corps tend, par la glande Hypophyse, à maintenir le taux de stockage S égal à 0. Lorsque le taux de stockage devient très positif, la température profonde interne augmente, mettant ainsi en opération différents mécanismes de rejet de chaleur. Lorsque ces mécanismes sont insuffisants pour rétablir la température profonde interne, des problèmes de santé peuvent survenir.

Les échanges thermiques

Tel qu'indiqué dans l'équation 1, les échanges thermiques importants entre le corps humain et son environnement sont:

1. La convection
2. Le rayonnement
3. La sudation

Le corps humain contrôle ces trois mécanismes. Par contre, le mécanisme de sudation est le plus puissant. Les figures suivantes montrent l'importance de la sudation dans le maintien de l'équilibre thermique.

Les figures 1 à 3 montrent différents scénarios de la répartition approximative des pertes de chaleur par le corps humain. Dans le cas d'un travail léger dans une ambiance thermique normale ($T_a \approx 23^\circ\text{C}$ et $T_r \approx 23^\circ\text{C}$) les pertes de chaleur par les différents mécanismes se répartissent de façon approximativement égale (Figure 1). Donc, pour une activité de 100 W, on pourrait diviser le tout en sudation = 34W, convection = 33W et rayonnement = 33W. Si le niveau métabolique est augmenté, mais que les conditions ambiantes demeurent les mêmes ($T_a \approx 23^\circ\text{C}$ et $T_r \approx 23^\circ\text{C}$), le pourcentage de déperdition de chaleur par la sudation augmentera de façon importante (Figure 2). Donc, pour une activité de 200 W, on pourrait diviser le tout en sudation = 100W, convection = 60W et rayonnement = 40W. Si le niveau métabolique demeure élevé, mais que les conditions ambiantes changent ($T_a \approx 38^\circ\text{C}$ et $T_r \approx 38^\circ\text{C}$), le pourcentage de déperdition de chaleur par la sudation augmentera à 100% puisqu'il ne sera plus possible au corps de perdre de la chaleur par convection et rayonnement (Figure 3).

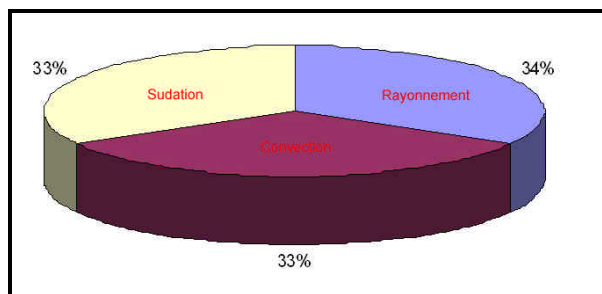


Figure 1 – Perte de chaleur travail léger $T_a \approx 23^\circ\text{C}$

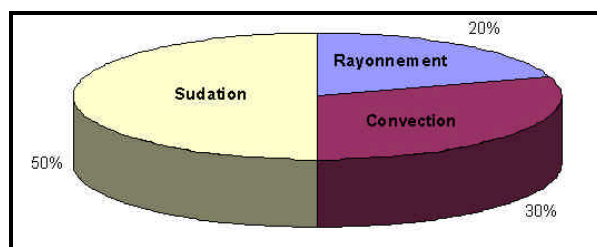


Figure 2 – Perte de chaleur travail lourd $T_a \approx 23^\circ\text{C}$

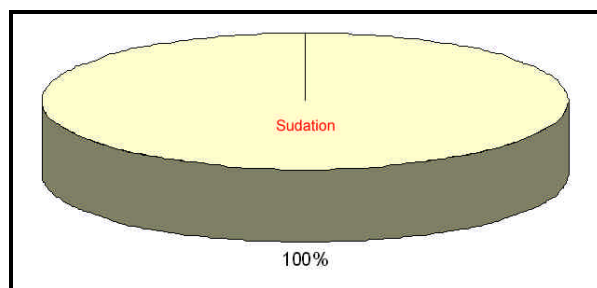


Figure 3 – Perte de chaleur travail léger $T_a \approx 38^\circ\text{C}$

On constate, sur ces figures, que plus le niveau métabolique augmente, plus la fraction de perte de chaleur reliée à la sudation devient importante. Aussi, plus la température ambiante augmente, moins le corps peut évacuer sa chaleur par convection et rayonnement. Il sue donc davantage.

C'est pour cela que la ventilation n'est pas très efficace pour réduire l'astreinte thermique.

Réactions physiologiques engendrées

Lorsqu'un travailleur est confronté à une ambiance chaude, le corps démontrera les symptômes suivantes:

1. Augmentation du rythme cardiaque;
2. Augmentation de la température superficielle de la peau;
3. Diminution de l'effort physique;
4. Transpiration et déshydratation.

Si l'équilibre thermique ne peut être maintenu avec ces réactions physiologiques, il en résultera une augmentation de la température profonde interne qui peut causer:

1. Coup de chaleur
2. Épuisement dû à la chaleur
3. Déshydratation
4. Déperdition saline
5. Crampes de chaleur
6. Maladie des glandes sudoripares

Coup de chaleur

Ce phénomène se produit lorsque le système de régulation thermique du corps perd contrôle. Ceci a pour effet que la température profonde interne augmente continuellement, pouvant facilement dépasser 41°C. Les capacités mentales sont altérées et les mécanismes de dissipation de chaleur peuvent ne plus fonctionner. À l'extrême, le coup de chaleur peut provoquer la mort. Les symptômes sont:

1. Effondrement
2. Convulsion
3. Délire
4. Hallucination
5. Coma

Cette situation est extrêmement rare. Le travailleur, à moins d'être contraint réagit et se sauve.

Épuisement dû à la chaleur

Ce phénomène se produit lorsque le système circulatoire est surchargé. Il peut en résulter une réduction du taux d'oxygénation du sang causé par une augmentation du débit sanguin au niveau cutané et des muscles. Cette diminution d'oxygène affectera principalement le cerveau et le coeur. La température profonde interne n'est généralement pas affectée. Une déshydratation augmentera les risques d'épuisement due à la chaleur. Les symptômes sont:

1. Étourdissement
2. Pâleur
3. Sudation
4. Maux de tête

Déshydratation

La déshydratation survient lorsque la quantité d'eau consommée ne suffit pas à compenser les

pertes hydriques (eau) des reins (urine), des poumons (air expiré) et de la peau (sueur). Lorsque les pertes hydriques atteignent de 5 à 8% du poids corporel, le rendement au travail de le travailleur s'en ressent et il présente les symptômes suivants:

1. Agitation
2. Irritabilité
3. Lassitude
4. Somnolence
5. Soif

Un déficit en eau de 10% du poids corporel associé aux signes précédents marque la limite à partir de laquelle le travailleur ne parviendra plus à accomplir son travail. Une perte de 15% peut signifier la mort.

Déperdition saline

Lorsqu'il y a sudation, il y aussi perte de chlorure de sodium (NaCl). Si cette perte n'est pas compensée par une ingestion adéquate de chlorure de sodium, il en résultera une exténuation. Ils surviennent surtout chez les travailleurs non-acclimatés buvant beaucoup d'eau et portant peu d'attention au remplacement du chlorure de sodium.

Crampes de chaleur

Ces crampes surviennent dans les muscles ayant fournis beaucoup d'effort soutenu. Elles sont généralement très douloureuses. Elles surviennent surtout chez les travailleurs non-acclimatés transpirant beaucoup et buvant beaucoup d'eau non salée.

Un refroidissement local de type canon d'air peut aussi provoquer des crampes.

Maladie des glandes sudoripares

Cette maladie se développe chez les travailleurs ayant une exposition prolongée à un environnement chaud où la sudation ne peut efficacement s'effectuer. Dans ce cas, les glandes de certaines régions de la peau peuvent arrêter leur production de sueur. Ceci réduira donc la sudation de le travailleur ayant pour conséquence de réduire sa to-

lérance à la chaleur. Ce phénomène est souvent associé à des démangeaisons cutanées.

Pratique de travail

Afin d'optimiser le rendement d'un travailleur à un poste chaud:

1. Un examen médical pour s'assurer que le travailleur peut travailler dans un environnement chaud;
2. Acclimater à la chaleur;
 - i. Première journée – Exposition seulement de 50%;
 - ii. Augmentation de 10%/j de l'exposition à la chaleur;
3. Permettre des périodes d'arrêt;
4. Fournir des suppléments de sel;
5. Former les travailleurs concernant l'hydratation et l'ingestion de sel;
6. Former les travailleurs à reconnaître les symptômes reliés aux différents problèmes de santé;
7. Réduire le rayonnement des surfaces chaudes environnant le travailleur;
8. Contrôler la température et de la vitesse de l'air ambiant au poste de travail de le travailleur.

Le Règlement sur la Santé et sécurité au Travail S-2.1, r19.01 traite ce phénomène par la réduction de la durée de l'exposition en fonction de la valeur WBGT. Si nous voulons éviter ces périodes coûteuses de repos, il faut diminuer la valeur de l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide (WBGT).

La figure 4 montre la relation entre le niveau métabolique et l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide (WBGT).

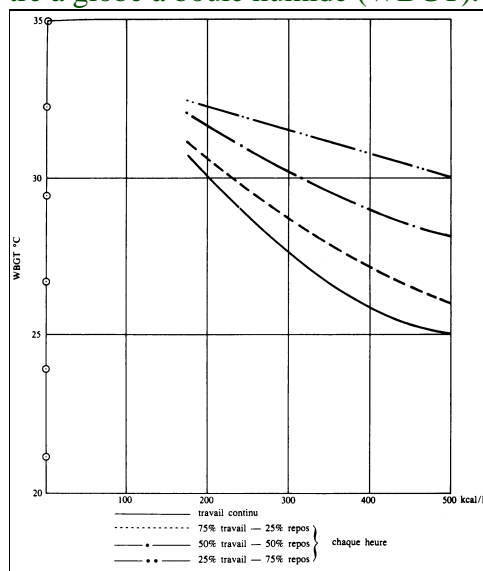


Figure 4 – Période d'arrêt selon le WBGT

La réglementation

Le tableau suivant permet d'établir le degré d'activité d'un travailleur.

Tableau 2 – Valeurs moyennes de métabolisme pour différentes activités

A. Position et mouvement du corps	kcal/h
Assis	18
Debout	36
Marche	120-180
Marche en montant	Ajouter 48 par mètre de montée

B. Type de travail	Moyenne (kcal/h)	Limites inférieures et supérieures (kcal/h)
Travail impliquant la main Léger Lourd	24 54	12-72
Travail impliquant un seul bras Léger Lourd	60 108	42-150
Travail impliquant les deux bras Léger Lourd	90 150	60-210
Travail impliquant le corps léger Moyen Lourd Très lourd	210 300 420 540	150-900
Travail léger impliquant la main		Écrire, tricoter
Travail lourd impliquant la main		Dactylographier
Travail lourd impliquant un seul bras		Enfoncer des clous (cordonnier, tapissier)
Travail léger impliquant les deux bras		Limer du métal, raboter du bois, ratisser un jardin
Travail moyen impliquant des deux bras		Nettoyer le sol, battre un tapis
Travail lourd impliquant le corps		Poser une voie, creuser la terre, écorcer un arbre
C. Métabolisme basal		60 kcal/h

La somme de A+B+C équivaut à la valeur moyenne de métabolisme pour l'activité.

La valeur l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide (WBGT) ne tient pas compte de la vêtue de le travailleur. Le tableau 3, indique la valeur de correction à déduire du WBGT en fonction de la vêtue tel que définie par l'ACGIH. Ce tableau ne fait pas partie de la réglementation mais reflète plus précisément la réalité.

Tableau 3 – Correction au WBGT

	Résistance de la vêtue (clo)	Correction au WBGT (°C)
Uniforme de travail estival	0.6	0
Survêtement de coton	1	-2
Uniforme de travail hivernal	1.2	-4
Imperméable qui respire	1.4	-6

Sur le terrain, l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide se mesure à partir du protocole WBGT (Wet Bulbe Globe Temperature). L'indice de température au thermomètre à globe à boule humide WBGT est fonction de la température humide naturelle et la température rayonnante moyenne.

La combinaison de ces paramètres se traduit par la formule mathématique approximative suivante pour des conditions intérieures:

$$WBGT=0.7Th+0.3Tg \quad (2)$$

Où :

WBGT: Wet Bulb Globe Temperature ou l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide WBGT (°C)

Thn : La température humide naturelle (sans vent forcé) approximativement égale à la température humide thermodynamique mesurée avec un hygromètre (avec vent forcé) (°C).

Tg : Température globe, la température sèche (°C) mesuré à l'intérieur d'un globe noir étanche, cette grandeur peut être calculée approximativement avec l'équation 3

$$Tg \cong \frac{Tr + Ta\sqrt{10Ua}}{1 + \sqrt{10Ua}} \quad (3)$$

Où :

Tr : Température rayonnante moyenne (°C). Cette grandeur ne se mesure pas directement et elle dépend de la température superficielle, de la proximité et de l'aire des surfaces chaudes qui entourent le travailleur.

Ta : Température sèche de l'ambient (°C)

Ua : La vitesse de l'air moyenne sur le travailleur. Se mesure avec un anémomètre omnidirectionnel faisant automatiquement la moyenne. (m/s).

Norme internationale ISO 7933-2004 Astreinte thermique prévisible

La Norme internationale ISO 7933-2004 spécifie une méthode d'évaluation analytique et d'interprétation de la astreinte thermique subie par un sujet dans un environnement thermique chaud. Elle décrit une méthode permettant de prédire le débit sudoral et la température corporelle centrale que l'organisme humain met en oeuvre en réaction aux conditions de travail.

Les divers termes intervenant dans ce modèle prédictif et notamment dans le bilan thermique, permettent de déterminer les parts respectives prises par les divers paramètres physiques de l'environnement dans l'astreinte thermique subie par le sujet. Cette Norme internationale permet ainsi de déterminer sur quels paramètres il convient d'agir, et dans quelle mesure, pour réduire le risque d'astreintes physiologiques.

Les principaux objectifs de cette Norme internationale sont les suivants:

1. l'évaluation de l'astreinte thermique dans des environnements susceptibles d'entraîner une élévation de la température corporelle centrale ou des pertes hydriques importantes chez un sujet standard;
2. la détermination des durées d'exposition compatibles avec une astreinte physiologique tolérable (pas de dommage physique prévisible). Dans le cadre de ce modèle prédictif, ces durées sont dites «durées limites d'exposition admissibles».

Cette Norme internationale ne vise pas à prédire la réponse physiologique d'un sujet donné, mais concerne uniquement un sujet standard en bonne santé et apte à faire son travail.

La méthode d'évaluation et d'interprétation dresse le bilan thermique du corps à partir des éléments suivants:

1. Paramètres de l'environnement thermique:
 - a) température de l'air, T_a ;
 - b) température moyenne de rayonnement, T_r ;
 - c) pression partielle de vapeur, P_a ;
 - d) vitesse de l'air, U_a ;
2. Paramètres moyens caractérisant les sujets exposés à cette situation de travail:
 - a) métabolisme énergétique, M ,
 - b) caractéristiques thermiques de la tenue vestimentaire..

Les valeurs numériques ainsi que les équations données dans la Norme correspondent à l'état actuel des connaissances. Certaines de ces expressions sont susceptibles d'être modifiées au fur et à mesure de l'avancée des connaissances.

L'algorithme décrit a été validé sur une base de données comprenant 747 expérimentations en laboratoire et 366 expérimentations de terrain, provenant de 8 instituts de recherche. Le Tableau 4 donne les plages des conditions pour lesquelles le modèle d'astreinte thermique prévisible peut être considéré comme validé. Lorsqu'un ou plusieurs paramètres sont en dehors de ces plages, il est recommandé d'utiliser les modèles mathématiques

présentés avec précaution et de porter une attention toute particulière aux travailleurs exposés.

Tableau 4 - Plages de validité du modèle d'astreinte thermique prévisible (PHS)

Paramètre Minimum Maximum

Paramètres	Minimum	Maximum
T_a (°C)	15	50
P_a (kPa)	0	4.5
$T_r - T_a$ (°C)	0	60
U_a (m/s)	0	3
M (W)	100	450
I_{cl} (clo)	0.1	1

Afin d'établir l'astreinte d'un individu, il faut établir certains paramètres:

1. La mouillure cutanée maximale
2. Le débit sudoral maximal
3. La déshydratation et perte hydrique maximale
4. La température rectale maximale

Le tableau 5 donne les limites tolérables en fonction de l'acclimatation de l'individu.

Le tableau 5 – Valeurs limites

	Non acclimaté	Acclimaté
Mouillage cutanée maximal (Wmax)	0.85	1.0
Débit sudoral maximal SWmax (W/m ²) (g/h)	$(M-32) \times A_D$ $2.6 \times (M-32) \times A_D$	$1.25 \times (M-32) \times A_D$ $3.25 \times (M-32) \times A_D$
Déshydratation et perte hydrique maximale		
Dmax50	7.5% × Masse corporelle	7.5% × Masse corporelle
Dmax95	5.0% × Masse corporelle	5.0% × Masse corporelle
Température rectale maximale (Tremax)	38.0°C	38.0°C

Influence de la ventilation et du conditionnement de l'air

Sans conditionnement d'air, seule la vitesse de l'air sur la peau a un peu d'influence sur l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide c'est à dire le confort thermique en milieu chaud. L'expérience montre que la vitesse de l'air a un effet décroissant en même temps qu'augmentent les crampes musculaires des tra-

vaillours. La limite pratique se situe vers 1,0 m/s et même à ces vitesses le travailleur doit pouvoir fréquemment changer le régime, la position et la température pour y « survivre ».

Dans le cas de ventilation par douches d'air avec diffusion, l'air de ventilation, c'est à dire l'air primaire mélangé avec l'air chaud ambiant, arrive sur le travailleur presque à la même température que l'air chaud ambiante. Le WBGT est parfois augmenté au lieu d'être diminué par de la ventilation par une douche d'air avec diffusion.

On peut pallier à cela par de la ventilation par déplacement. La température de l'air de ventilation arrivant sur le travailleur est alors presque égale à la température d'alimentation et le WBGT est diminué d'autant.

Enfin, en conditionnant l'air, les températures sèche T_a et humide T_{hn} de l'air arrivant sur la peau des travailleurs peuvent être diminuées et le WBGT peut être amélioré d'autant. La température d'alimentation ne devrait pas être inférieure à environ 25°C.

Diffusion d'air à un poste chaud

Le soufflage de l'air à un poste chaud est très important. Une mauvaise diffusion pourrait avoir pour effet:

1. D'induire énormément d'air chaud ambiant annulant ainsi le refroidissement voulu.
2. De provoquer des crampes musculaires si la vitesse de l'air est trop élevée.

Les travailleurs sous un canon d'air pour les refroidir ont souvent des crampes musculaires. Ces canons sont généralement inefficaces car l'inconfort des crampes devient éventuellement suffisamment insupportable pour que le travailleur ne veuille plus accepter le canon d'air. L'effet voulu est alors annulé.

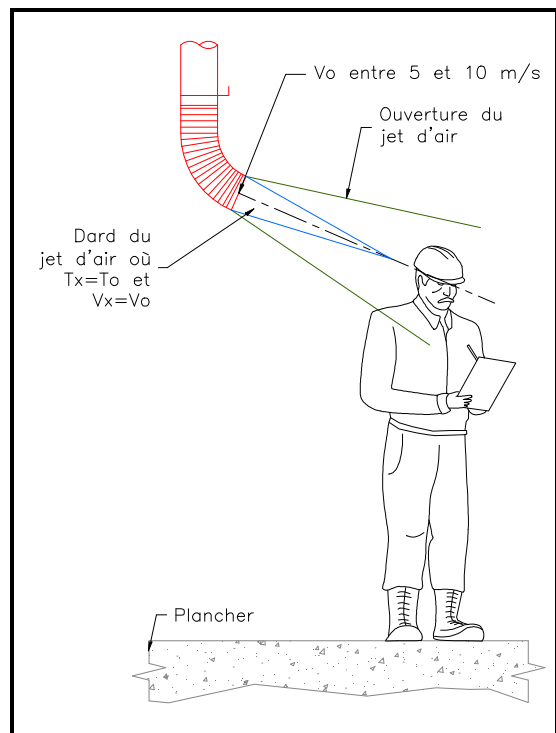


Figure 5 – Canon d'air avec diffusion

Un soufflage lent créant un bain d'air conditionné est généralement une meilleure solution. Il s'agit de souffler l'air à une vitesse suffisamment lente pour ne pas provoquer de crampe musculaire; généralement sous 0.5 m/s. Afin de bien contrôler les paramètres ambiants (température et vitesse de l'air), la bouche devrait être conçue pour maintenir le travailleur dans le dard du jet d'air. Si cela est le cas et qu'il n'y a pas de courant d'air déviant le dard d'air conditionné, le travailleur sera dans une zone dont la température ambiante est égale à la température et la vitesse de soufflage.

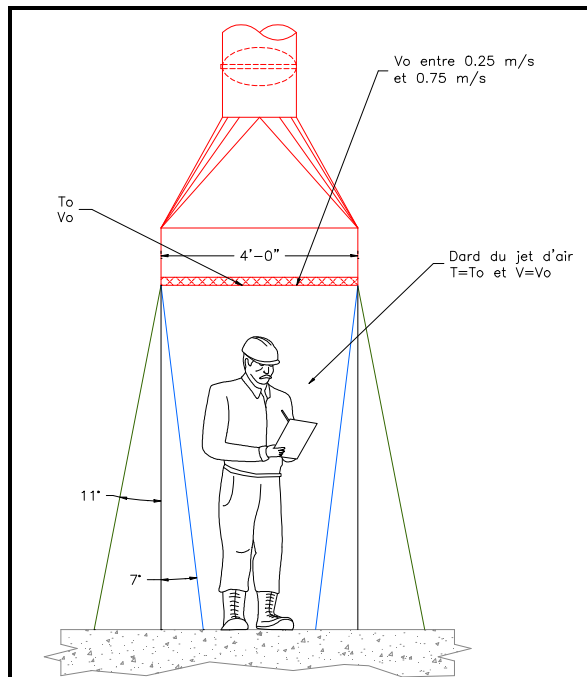


Figure 6 – Douche d'air par déplacement

Influence de la température de surface

On constate, dans les équations de l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide (WBGT), que la température des surfaces environnantes (T_{rm}) affecte significativement la valeur de l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide (WBGT). Il est donc possible de réduire l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide en réduisant la température des surfaces que voit le travailleur.

Il existe plusieurs façons de réduire cette température.

Par des matériaux réfléchissants:

1. Installer une barrière opaque entre le travailleur et le procédé chaud. Cette barrière aura une température de surface inférieure à celle du procédé chaud. Un matériau très réfléchissant est généralement installé (Aluminium, acier poli, acier inoxydable pouvant réduire jusqu'à 95% le rayonnement infrarouge).
2. Isoler les parois du procédé chaud afin de réduire sa température de surface. En plus, ajoutez un recouvrement d'aluminium de faible épaisseur pour réduire le coefficient d'émissivité.
3. Réduire le coefficient d'émissivité de la surface chaude par l'application d'une peinture à faible émissivité (peinture d'aluminium par exemple).

Par des matériaux transparents:

1. La vitre teintée. La vitre teintée réduit le passage des rayons infrarouges à l'aide d'une pellicule absorbante. Le désavantage de ce matériau est que pour être très efficace, le pourcentage de lumière visible passant au travers de la vitre teintée doit être faible. Il devient donc difficile de voir au travers.
2. Un treillis de métal ou un rideau de chaînes tressées serrées mais permettant quand même au travailleur de voir au travers peut servir d'écran efficace. Le rideau a l'avantage de permettre au travailleur d'y passer les mains (Figure 7).
3. Une combinaison des deux principes, est la vitre de four avec armature de treillis de métal (comme celle des cuisinières et des micro-ondes).

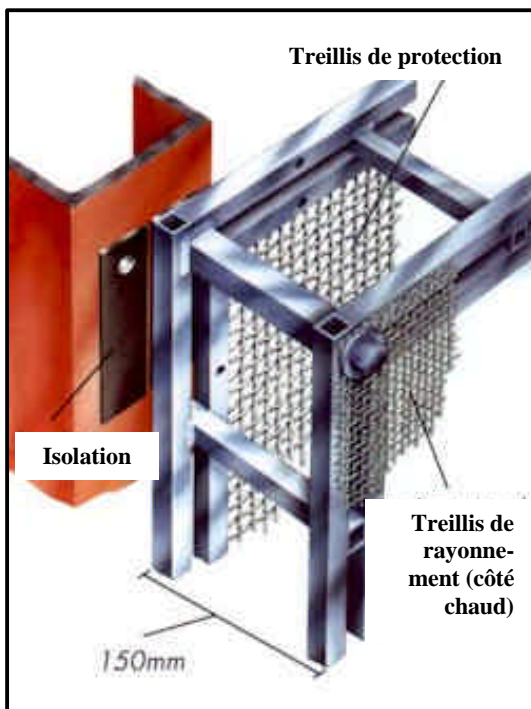


Figure 7 – Treillis de protection

Conclusion

Souvent, dans les cas d'astreinte thermique, la solution préconisée est de retirer le travailleurs du milieu. Cela a pour effet de faire augmenter les coûts.

En général, il y a toujours moyen de réduire la sévérité des conditions ambiantes.

De façon générale, les actions ayant les plus gros impacts sont, dans l'ordre:

1. La réduction du rayonnement par:
 - L'isolation;
 - La réduction du coefficient d'émissivité (peinture réfléchissante)
 - L'installation d'écran
2. L'amélioration des conditions ambiantes par:
 - La réduction de la température ambiante (douche d'air si poste fixe de dimensions raisonnables);
 - Le conditionnement de l'air (refroidissement mécanique, atomisation d'eau)

Bibliographie

1. **Olesen, W.B.**, Technical review – Heat stress, Brüel & Kjaer, Denmark, 1985.
2. **American Industrial Hygiene Association**, Heating and cooling for man in industry, AIHA, USA, 1975.
3. **Gouvernement de Québec**, Règlement sur la qualité du milieu S-2.1, r.19.01, Éditeur officiel du Québec, Québec, 2001.
4. **Locas L.**, Le stress thermique, Association de prévention des accidents industriels, Québec, 1979.
5. **Organisation internationale de Normalisation**, Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation de la astreinte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible, Bruxelles, Suisse, 2004.
6. **ACGIH**

- avec un hygromètre (avec vent forcé) (°C).
- Tg : Température globe, la température sèche (°C) mesuré à l'intérieur d'un globe noir étanche
- Tr : Température rayonnante moyenne (°C).
- Ta : Température sèche de l'ambient (°C)
- Ua : La vitesse de l'air moyenne sur le travailleur (m/s).
- Pa : Pression partielle de vapeur (kPa)
- Icl : Isolation de la vêtue (clo)
- Ad : Aire corporelle de DuBois (m²)

Liste des symboles

- S : Taux de stockage de la chaleur (W)
- M : Taux de production de chaleur (W) (métabolisme)
- R : Taux de gain ou perte de chaleur par rayonnement (W)
- C : Taux de gain ou perte de chaleur par convection (W)
- E : Taux de perte de chaleur par sudation (W)
- WBGT : Wet Bulb Globe Temperature ou l'indice de température au thermomètre à globe à boule humide WBGT (°C)
- Thn : La température humide naturelle (sans vent forcé) approximativement égale à la température humide thermodynamique mesurée