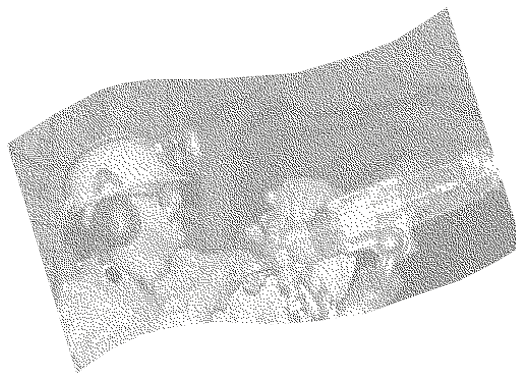


Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes

Pierre C. Dessureault
Mathieu Doucet

ÉTUDES ET RECHERCHES



R-350

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-817-221-7046

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
décembre 2003.

Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes

Pierre C. Dessureault et Mathieu Doucet
École d'ingénierie, UQTR

ÉTUDES ET
RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

L'Association Minière du Québec a logé une demande à l'effet d'utiliser le *Air Cooling Power* (ACP) comme indice de contrainte thermique dans les mines souterraines. Cet indice est en fait une adaptation de l'approche analytique basée sur le calcul du bilan thermique entre l'homme et son environnement. L'objectif premier de cette étude est de déterminer si cette approche rationnelle est au moins équivalente ou encore plus appropriée aux conditions de travail en mine profonde que l'application de l'indice WBGT. Elle doit aussi vérifier que le niveau d'astreinte thermique des travailleurs soit en deçà des limites généralement acceptées sous l'un ou l'autre indice.

L'ACP fait intervenir la pression atmosphérique dans le calcul de l'ensemble des éléments du bilan thermique. Pour le reste, cette approche rationnelle suit le même raisonnement que la norme ISO 7933 (ISO 1989). Assumant un bilan thermique neutre, elle prévoit que la production interne de chaleur soit compensée par les échanges de chaleur au niveau respiratoire, et par les échanges par conduction, convection, rayonnement, et l'évaporation maximale au niveau de la peau.

Les données environnementales; températures de l'air, humide et globe, vitesse de l'air, humidité et pression barométrique ont été enregistrées à des niveaux de profondeur variant entre 1460 et 2150 mètres. Aux fins de l'analyse comparée des différents indices de contrainte thermique (WBGT, ACP, ISO 7933 et la version révisée de ISO faisant l'objet d'une proposition, notée ISO 2000), deux ambiances théoriques ont été définies; l'une composée des valeurs les plus favorables de chacun des paramètres, l'autre composée des plus défavorables. Il convient de mentionner que les valeurs observées de ces paramètres se situent à l'intérieur de plages très restreintes. De son côté, l'astreinte thermique a été estimée sur la base de sa composante cardiaque. Cinq sujets âgés entre 21 et 49 ans ont été l'objet d'un monitoring sur l'ensemble de leur quart de travail. Ils effectuaient des tâches identifiées comme étant parmi les plus contraignantes.

L'analyse comparative des indices sous l'ambiance favorable et défavorable utilise des valeurs de dépense énergétique de 200, 300, 400 et 450 Watts, pour des travailleurs acclimatés et non acclimatés. L'application de l'indice WBGT (corrigé de 3,5°C pour le port d'un bleu de travail) à l'ambiance favorable (WBGT_{corr.} de 26.1°C) montre que les travailleurs acclimatés peuvent supporter des charges de travail allant jusqu'à 450 Watts, les non acclimatés doivent adopter un régime d'alternance / repos sous une charge de 450 Watts. Toujours sous ambiance favorable, l'indice ISO 7933 adopté en 1989 limiterait l'exposition d'un travailleur acclimaté sous une charge de travail de 450 watts sur la base des pertes hydriques. Pour les travailleurs non acclimatés, la durée de travail est limitée dès que la charge de travail atteint 400 Watts. Finalement, la proposition 2000 de la même norme ISO n'indique aucune limite sous cette ambiance.

Il en va différemment sous l'ambiance défavorable. L'indice WBGT prévoit alors des alternances travail/repos pour tous les travailleurs, acclimatés ou non, et ce même pour des charges de travail de 200 Watts. Pour les deux versions ISO 7933, seules la norme de 1989 permet une durée de travail de 8 heures à 200 Watts pour le travailleur acclimaté. Toutes les autres situations ont une durée de travail limitée variant entre 24 minutes et 3h56, déterminées par les pertes hydriques ou l'élévation des températures corporelles.

L'ACP, sous l'ambiance favorable et sous la pression barométrique la plus élevée, soit 122.8 kPa, limite la dépense énergétique à 305 watts/m², soit 549 Watts pour un homme standard, alors qu'elle serait de 111 watts/m², ou 200 watts pour l'homme standard sous l'environnement défavorable. Sous une pression barométrique de une atmosphère, soit 101.3 kPa, ces deux valeurs seraient de 322 watts/m² et 119 watts/m² respectivement.

L'analyse de l'astreinte cardiaque se base sur les valeurs limites de fréquence cardiaque sur des périodes de temps variant depuis la moyenne sur une seule minute (FC_{max}) jusqu'à la durée complète du quart de travail (FC_{moy}) en passant par sept fenêtres de temps variant entre 5 et 90 minutes. Il y a dépassement de certaines des limites utilisées dans quatre cas sur les huit quarts observés retenus dans cette étude. Tous les cas de dépassement sont multiples. Dans deux cas, l'ensemble complet des limites utilisées est dépassé.

Heureusement, l'application de l'indice WBGT corrigé à l'ambiance défavorable, quoique sur une base incorrecte, amène à la conclusion que le travail sous ambiance défavorable est inacceptable. En fait, si on compare la seule conclusion sur l'acceptabilité de la situation de travail, l'étude montre une cohérence surprenante entre les indices WBGT et ISO, autant sous ambiance favorable que défavorable.

L'indice ACP semble pour sa part permettre des expositions trop élevées. Cet indice peut être utile pour situer le niveau de contrainte avant que des modes de surveillance spécifiques aux mines profondes soient développés, cependant, l'utilisation de la norme ISO 7933 a l'avantage d'être supportée scientifiquement par un organisme reconnu et de faire l'objet de mises à jour qui font suite à des études exhaustives. L'indice ACP est aussi lourd d'application que ISO 7933, et sa documentation scientifique est incomplète, voire parfois contradictoire. Les limites d'application proposées par certains auteurs ne sont pas respectées par le logiciel qui nous a été fourni. L'ACP ne considère que l'élévation des températures corporelles, non pas les pertes hydriques qui limitent pourtant la durée d'exposition selon ISO. Pour toutes ces raisons, nous ne retenons pas l'indice ACP, dans la forme qui nous a été proposée, comme un outil valable d'analyse des contraintes thermiques.

À défaut d'une norme spécifique, l'application du WBGT et de l'indice ISO 7933 peut assurer une sécurité acceptable dans les mines profondes à la condition d'assurer un contrôle stricte de l'acclimatement des travailleurs, d'appliquer les facteurs de correction pour la tenue vestimentaire, d'estimer les valeurs de métabolisme de façon conservatrice (favorisant les valeurs supérieures), d'utiliser les deux indices à la fois et retenir le plus sévère, d'assurer un suivi médical étroit des travailleurs, d'offrir à tous une formation adaptée sur le travail en ambiance chaude, et enfin, de maintenir de l'eau potable et des breuvages disponibles partout.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	i
TABLE DES MATIÈRES	iii
INTRODUCTION.....	1
Contexte	1
Objectif.....	1
PROBLÉMATIQUE DES MINES SOUTERRAINES	3
Ambiance thermique	3
Charge physique de travail.....	4
Tenue vestimentaire	5
Indices de contrainte thermique	5
<i>Approches</i>	5
<i>Domaine d'application</i>	6
Monitoring de l'astreinte thermique.....	7
MÉTHODE	9
Approche	9
Choix des tâches et des sujets	9
Collecte de données.....	10
Analyse.....	10
<i>Contrainte thermique</i>	10
<i>Astreinte cardiaque</i>	11
- <i>Valeurs moyennes sur des fenêtres de 5 à 90 minutes</i>	11
- <i>Fréquence cardiaque moyenne</i>	11
- <i>Fréquence cardiaque maximale</i>	12
RÉSULTATS	13
Ambiance thermique	13
<i>Pression barométrique</i>	13
<i>Vitesse de l'air</i>	13
<i>Température de l'air</i>	13
<i>Température humide</i>	13
<i>Température globe</i>	14
<i>Définition des environnements favorables et défavorables</i>	14
Énergie métabolique.....	14

Analyse comparative des indices de contrainte thermique	15
<i>ISO 7933 (1989)</i>	15
<i>ISO 7933 (2000)</i>	16
<i>Comparatif WBGT</i>	17
<i>Air cooling power</i>	18
Analyse de l'astreinte	19
DISCUSSION	20
Collecte de données.....	20
Analyse de la contrainte thermique.....	20
Analyse de l'astreinte thermique.....	23
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	25
RÉFÉRENCES.....	27
Remerciement	

INTRODUCTION

Contexte

Dans les mines souterraines, la contrainte thermique pose un problème sérieux. L'ambiance thermique est défavorable du fait de la paroi rocheuse plutôt chaude et du niveau extrême d'humidité. En saison chaude, puisque l'air poussé dans les mines a déjà une enthalpie assez élevée, les conditions environnementales deviennent sévères. Des mesures de l'indice WBGT (Wet Bulb and Globe Temperature) le confirment. En plus de l'environnement, la charge de travail est élevée pour certaines tâches et la tenue vestimentaire de prédilection (le bleu de travail) ajoute à la contrainte que subissent les travailleurs.

L'indice WBGT a été développé sous des conditions tout à fait différentes de celles observées dans les mines souterraines, c'est-à-dire à l'extérieur, en ambiance naturelle. Or les mines présentent un milieu hyperbare, sans soleil où tout l'air qui y circule est forcé. L'application de cet indice empirique dans des conditions aussi différentes de son domaine d'études peut mener à des erreurs d'application importantes. Cependant, puisque la réglementation l'exige, les inspecteurs de la Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail du Québec (CSST) interviennent, là aussi, selon le WBGT.

L'Association Minière du Québec a logé une demande de dispositions particulières concernant le travail en ambiance chaude dans les mines souterraines à la Commission de la santé et sécurité du travail (CSST), qui a confié le mandat à l'Institut de recherche Robert Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST). La demande de l'Association est à l'effet d'utiliser le *Air Cooling Power* (ACP) comme indice de contrainte thermique dans les mines souterraines. Cet indice est en fait une application adaptée aux environnements miniers de l'approche analytique basée sur le calcul des échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Selon les demandeurs, cet indice serait plus représentatif des conditions de travail et permettrait une meilleure gestion de la contrainte thermique. Cet avantage découlerait du fait que les calculs sont basés sur les paramètres observés (vitesse, température et humidité de l'air, tenue vestimentaire, etc), et non sur un ensemble de conditions pré-établies tel que le WBGT.

Objectif

L'objectif premier de cette étude est de s'assurer d'une mesure adéquate de la qualité du milieu de travail dans cet environnement et de déterminer une approche rationnelle qui est au moins équivalente ou encore plus appropriée aux conditions de travail en mine profonde que l'application de l'indice WBGT. Cette étude doit aussi vérifier que le niveau d'astreinte thermique des travailleurs soit en deçà des limites généralement acceptées sous l'une ou l'autre approche.

Un premier volet consiste donc en une étude comparative des avantages et inconvénients respectifs de l'indice WBGT versus les indices rationnels, dont l'ACP, en regard de la mesure de l'ambiance et de l'évaluation des contraintes thermiques en situation de mines souterraines profondes. Ce volet a pour but de s'assurer d'une mesure adéquate de la qualité du milieu de

travail dans cet environnement et de déterminer si l'approche rationnelle est au moins équivalente ou encore plus appropriée aux conditions des travailleurs que l'application du WBGT.

Le second volet vise à vérifier que le niveau d'astreinte thermique (réponse physiologique des travailleurs exposés) est à l'intérieur des plages généralement acceptées, et ce pour le WBGT aussi bien que l'approche rationnelle. En effet, la seule cohérence entre ces deux approches, basée sur les paramètres de la contrainte ne nous permet pas de conclure qu'elles soient appropriées aux conditions des travailleurs.

PROBLÉMATIQUE DES MINES SOUTERRAINES

Ambiance thermique

Le travail en mine souterraine se fait sous des ambiances thermiques très particulières. La chaleur dégagée par les équipements, le dynamitage et le personnel demeure dans cet environnement fermé par une paroi rocheuse déjà chaude. La Mine Safety and Health Administration (MSHA 2002) estime que 50 à 100% de l'énergie libérée lors du dynamitage est dissipée sous forme de chaleur. Toute cette chaleur ne peut être évacuée que par la ventilation forcée, aussi les débits mis en jeu sont énormes. Malgré ce qui précède, ce n'est pas tant la température qui pose problème, mais l'humidité. L'eau est abondamment utilisée dans les opérations de forage de la roche. Les taux d'humidité très élevés, parfois au-dessus de 80%, limitent beaucoup l'évaporation de la sueur nécessaire au refroidissement des travailleurs. La température de l'air, autour de 30°C, réduit la perte de chaleur par convection. Finalement, les échanges par rayonnement sont à peu près nuls.

La vitesse de l'air est cependant généralement favorable. Les débits mis en jeu pour assurer la qualité de l'air sont tels que la vitesse de l'air dépasse parfois, en certains points, les 3 mètres par seconde. Malheureusement, l'air n'est pas distribué également dans l'ensemble des lieux de travail de sorte qu'en bout de tunnel, la vitesse de l'air peut être négligeable.

Le paramètre le plus distinctif des mines profondes est certainement la pression atmosphérique. À 2200 mètres de profondeur, la pression oscille autour de 122 kilopascals (kPa). Cette variable n'a jamais été tenue en compte dans l'établissement des normes courantes de contrainte thermique (ACGIH 2002, AIOH 2002, ISO 2000, MSHA 2002, MOSHAB 1997, Malchaire 1999) pourtant, elle influence largement, et inversement la propriété de l'air à absorber la vapeur d'eau.

Le taux d'évaporation maximum de la sueur à la surface corporelle (noté E_{\max}) détermine directement la capacité de déperdition de chaleur. Or, ce taux est influencé négativement par la pression ambiante. Le Tableau I montre les valeurs d'humidité absolue, exprimée en kilogrammes de vapeur d'eau par kilogramme d'air, à saturation, sous une ambiance thermique initiale où la température de l'air est de 30°C et la température humide de 20°C et selon deux niveaux de pression, soit 100 et 125 kPa. Les valeurs d'humidité absolue respectives sont de 0.0107 et 0.0077 kg/kg air sec. On remarque donc que l'humidité absolue décroît avec la pression, ce qui est à la défaveur du travailleur qui doit perdre de l'énergie par évaporation. Un travailleur couvert de sueur sous ces conditions dispose d'un taux d'évaporation qui est gouverné par le gradient entre l'humidité absolue dans l'air et celle à saturation, correspondant à 100% d'humidité. Ces valeurs sont, dans le même ordre respectif de 0.0276 et 0.0219 kg/kg air sec. Exprimé en pourcentage de l'humidité à 100 kPa, les valeurs à 125 kPa représentent 72% sous les conditions initiales et 79% sous les conditions saturées. La relation entre les valeurs d'humidité sous ces deux pressions n'est donc pas linéaire.

La marge entre les conditions initiales et saturées, qui représente en quelque sorte le pouvoir d'absorption de vapeur d'eau de l'air, est de 0.0169 kg/kg air sec à 100 kPa et 0.0142 à 125 kPa. Mais si l'ambiance sous pression élevée est défavorable de ce point de vue, il faut aussi considérer la densité de l'air qui elle est à la faveur d'une plus grande évaporation. La documentation scientifique recensée ne permet pas de proposer une correction globale du taux

d'évaporation sur une surface saturée tenant compte à la fois du fait de l'humidité absolue et de la densité de l'air. Contrairement aux indices courants, l'approche du *Air cooling power* propose de telles corrections qui sont en partie basées sur les travaux de Stewart en Afrique du sud selon Brake et Bates (Brake et Bates 2002).

Il faut donc retenir que la pression atmosphérique influence les échanges thermiques par évaporation d'une façon non linéaire et que la documentation ne permet pas de proposer un facteur de correction spécifique s'appliquant au taux d'évaporation de la sueur.

Tableau I : Contenu en vapeur d'eau (kg H₂O/kg air sec)

	Condition initiale	Condition à saturation	Différentielle
Pression	T_a = 30°C et T_{bm} = 20°C	T_a et T_{bm} = 30°C	
100 kPa	0.0107	0.0276	0.0169
125 kPa	0.0077	0.0219	0.0142
% 125 vs 100	72	79	84

Charge physique de travail

La détermination exacte de la charge physique de travail, ou métabolisme, en mine souterraine, revêt également sa part de problème. D'une part, l'utilisation des tables suggérées par le règlement sur la santé et sécurité du travail (RSST 2001) et autres tables du même genre est souvent biaisée dans l'évaluation des déplacements. En effet, ces tables sur lesquelles figurent différentes conditions de marche en fonction de la vitesse et de l'angle de montée ont été construites sur des chemins unis, avec des souliers de marche. Or les déplacements dans les mines se font sur des surfaces caillouteuses, boueuses, avec des bottes lourdes. Il est certain qu'une correction devrait être appliquées pour adapter ces tables aux conditions des mines mais aucun document ne propose la valeur d'un tel facteur.

D'autre part, les tâches autres que les déplacements sont constitués de nombreuses sous-tâches qui varient continuellement selon les conditions du milieu. L'écaillage illustre bien cette remarque puisque ce travail est extrêmement lourd durant les périodes où le travailleur frappe la voûte de son outil. La durée et le nombre de coups nécessaire à déloger un morceau de pierre varient largement. Les mini-pauses durant lesquelles il dépose son outil et analyse la situation sont nombreuses et de durée variable.

Tayyari et ses collaborateurs (Tayyari et al. 1989) a utilisé une approche appelée *systematic workload estimate* qui, basée sur une technique de codage a permis une estimation de la charge de travail en mines souterraine avec une précision de 12.7 %. Il demeure que la technique la plus sûre est la mesure de la consommation d'oxygène.

Tenue vestimentaire

La tenue vestimentaire varie peu entre les travailleurs de la mine où a eu lieu la présente étude. Elle comporte habituellement un sous-vêtement de type boxer, des chaussettes longues, des bottes imperméables mi-jambe, un T-shirt, un surtout (bleu de travail) et un chapeau de sécurité. Des gants sont généralement portés. Nous estimons cet ensemble vestimentaire à 0.8 clo ($0.124 \text{ m}^2\text{°C/W}$), soit légèrement supérieure à la tenue vestimentaire normalisée de 0.6 clo ($0.093 \text{ m}^2\text{°C/W}$) prévue par l'indice WBGT. Thomas E. Bernard (Bernard 2000), repris par l'ACGIH (ACGIH 2002) propose une correction de $+3.5\text{°C}$ à la valeur WBGT mesurée pour compenser l'ajout d'un bleu de travail par dessus une tenue vestimentaire normale.

Les indices de contrainte thermique

Approches

Aucun des deux indices de contrainte thermique d'usage courant (WBGT, ou ISO 7933) n'a prévu de conditions autres que le travail à pression atmosphérique normale. Pourtant, bon nombre de guides de surveillance de la contrainte thermique vise spécifiquement les mines profondes; le Mines Safety and Health Administrations (MSHA 1972) pour le sud des Etats-Unis; le Department of Minerals and Energy (MSHI, 2002) pour l'Afrique du Sud; Sue Leveritt (Sue Leveritt) pour l'ouest Australien. Aucun de ces guides ne fait mention de corrections pour les conditions de pression atmosphériques. Des propositions récentes de standard australien (AIOH 2002) et international (ISO 2000) n'en font pas mention, pas plus que le *thermal work limit* proposé récemment par Brake et Bates (Brake & Bates 2002) qui semble par ailleurs être identique au *Air cooling power*.

De son côté, l'approche du *Air cooling power* (Howes, communications personnelles) fait intervenir la pression atmosphérique dans le calcul de l'ensemble des éléments du bilan thermique. Pour le reste, cette approche rationnelle suit le même raisonnement que la norme ISO 7933 (ISO 1989). Assumant un bilan thermique neutre, elle prévoit que la production interne de chaleur (M), moins le travail mécanique (W) soit compensé par les échanges de chaleur par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}) au niveau respiratoire, et les échanges par conduction (K), convection (C), rayonnement (R), et finalement l'évaporation (E) au niveau de la peau. Afin de donner à M-W la valeur maximale acceptable, c'est l'évaporation maximale qui est considérée ici.

$$M-W = C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R + E_{\text{max}} \quad \text{Équation 1}$$

Il importe de distinguer cette approche de la norme ISO 7933 (ISO 1989) qui, assumant un bilan thermique neutre, calcule l'évaporation requise, notée E_{req} . Le calcul de E_{req} utilise la même formule de l'équation 1 à la seule différence qu'on y calcule l'évaporation requise étant donné le niveau de travail demandé.

$$E_{\text{req}} = M-W + C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R \quad \text{Équation 2}$$

En quelque sorte, outre la considération pour la pression barométrique, la différence entre l'*Air cooling power* et la norme ISO 7933 est que le premier calcule le niveau de travail maximum acceptable en posant que l'évaporation est au maximum alors que le second calcule l'évaporation

requisse considérant le niveau de travail observé. La norme ISO vérifie par la suite que l'évaporation requise soit inférieure à l'évaporation maximale. Si cette dernière condition est rencontrée, elle vérifie ensuite que la sudation requise soit atteignable par l'individu pour finalement s'assurer que la perte hydrique ne soit pas trop sévère. Cette norme prescrit, le cas échéant, une durée limite d'exposition basée sur ce paramètre. Dans la négative (lorsque l'évaporation requise est supérieure à l'évaporation maximale), elle calcule une durée limite d'exposition basée sur l'élévation des températures corporelles.

Considérant ce qui précède, il convient de mentionner que quoique semblable dans leur approche, le *Air cooling power* (ACP) ne vise qu'à prévenir l'élévation des températures corporelles alors que la norme ISO 7933 vise en plus à limiter les pertes hydriques. Brake (2000) justifie cette omission par le fait qu'il n'a observé aucun cas de déshydratation involontaire chez les mineurs. Cet auteur prétend qu'il n'est pas pertinent de limiter la durée d'exposition sur la base des pertes hydriques comme le propose ISO 7933 (1989 et 2000).

La documentation scientifique a permis de relever quelques cas d'adaptation de normes aux conditions spécifiques de mines profondes autres que l'ACP (MSHA, 1972, Sue Leveritt 2002). Elles sont toutes basées sur l'indice WBGT et l'adaptation concerne généralement la tenue vestimentaire. L'Australian Institute of Occupational Hygiene (AIOH 2002) propose, pour les mines, une surveillance en trois paliers; le premier consiste à vérifier la présence d'une contrainte thermique avec la lecture du WBGT. Si confirmée, le deuxième palier prévoit l'analyse de la contrainte thermique par la norme ISO 7933. Finalement, pour les cas d'exposition les plus sévères, le troisième palier exige le monitoring physiologique (température profonde et fréquence cardiaque).

Domaine d'application

Le domaine d'application de l'indice WBGT est cependant singulièrement différent des ambiances thermiques observées en mine profonde. Les expériences qui ont permis le développement de cet indice ont eu lieu à l'extérieur, à la surface, sous des valeurs d'humidité plus faibles, exposés au rayonnement solaire, avec des sujets qui portaient un sous-vêtement, un pantalon de coton, une chemise de coton à manche longue, des chaussettes et des souliers (LIND, 1963). Cet indice, de loin le plus utilisé dans le monde, est souvent appliqué à des conditions qui divergent largement de son domaine. Ainsi des facteurs de correction ont été développés pour deux entités, l'acclimatement (ACGIH 2002) et la tenue vestimentaire (Bernard 2000). De l'avis même de Thomas E. Bernard, les facteurs de correction pour les tenues vestimentaires qu'il a proposés doivent être interprétés avec beaucoup de discernement. Le WBGT suppose aussi que le travailleur soit acclimaté. Plusieurs organismes insistent sur l'importance de ce point en mine profonde (MSHA 2002, MOSHAB 1997, AIOH 2002). Cependant, les mineurs oeuvrant en mine profonde sur une base régulière doivent être considérés comme pleinement acclimatés sauf lors de retour au travail après une absence d'une semaine ou plus.

La norme ISO 7933 est beaucoup plus souple dans son application que l'indice WBGT. Parce qu'elle se base sur le calcul du bilan thermique entre l'homme et son environnement, les paramètres ne sont pas prédéterminés mais plutôt des variables qui entrent dans le calcul des échanges thermiques. Cette norme n'en a pas moins des limites pour chacune de ces variables. Par exemple, les vitesses de l'air étudiées sont plus petites ou égales à 3 mètres par seconde. Les vitesses de l'air observées en mines profondes peuvent parfois dépasser cette limite.

L'expérience d'application de cette norme, adoptée par l'ISO en 1989 et une vaste étude regroupant plusieurs équipes de recherche européennes dans le cadre du programme BIOMED a permis de préciser certaines équations dans le calcul du bilan thermique en plus de modifier les limites admissibles pour tenir compte non seulement d'une astreinte moyenne de la population mais également le niveau d'astreinte protégeant 95% de la population étudiée. Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications. Le recueil des communications d'une rencontre internationale sur ce sujet reprend l'ensemble de ces travaux (Malchaire 1999). Ces chercheurs proposent de réviser la norme ISO 7933 dans sa version de 1989. La version révisée permet généralement des expositions plus sévères que la norme actuellement en vigueur. Bethea et Parsons (2002) rapportent cependant que la version 2000 de cette norme sous-estime la sudation dans un environnement humide où le port de vêtements de protection est nécessaire.

Toutes les études citées plus haut qui ont observé les conditions de contrainte thermique en mine profonde font état d'un niveau élevé de contrainte thermique. Kampmann et Piekarski (1994) et Piekarski (1995) ont observé le niveau d'astreinte dans des mines d'antracite dans le cadre d'une vaste étude longitudinale en Europe. Ces auteurs rapportent un niveau sévère d'astreinte thermique, notamment des pertes hydriques qui dépassent souvent la limite de 5.2 litres recommandée par ISO 7933 pour le travailleur acclimaté.

Monitoring de l'astreinte thermique

Lors d'une vaste étude sur la contrainte thermique dans les mines, Piekarski (Piekarski 1995) propose d'utiliser à la fois les mesures des paramètres climatiques, soit la contrainte thermique, et le monitoring de paramètres physiologiques dans un programme de surveillance. La démarche en trois paliers proposée par l'AIOH (2002) va dans ce même sens. L'équipe de recherche du programme BIOMED a ensuite étudié abondamment l'astreinte cardiaque, notamment dans les mines (Malchaire 1999).

L'astreinte thermique se définit comme étant la réponse physiologique d'un travailleur exposé à la chaleur. Cette réponse se traduit par trois phénomènes bien distincts soit :

- l'augmentation de la fréquence cardiaque.
- une perte hydrique non compensée, ou déshydratation.
- l'élévation des températures corporelles.

L'augmentation de la fréquence cardiaque constitue une mesure très représentative de l'astreinte due autant à une charge de travail qu'à un environnement chaud (Malchaire 1999, Bernard et Kenney 1994, Fuller et Smith 1981, Dessureault 1995). Il est connu depuis longtemps que l'astreinte cardiaque atteint généralement les limites proposées par la documentation scientifique plus précocement que l'astreinte hydrique ou l'élévation de la température corporelle. Cette observation est maintes fois vérifiée par plusieurs chercheurs, sous des environnements thermiques très différents (Bernard et Kenney 1994, Fuller & Smith 1981, Dessureault 1995). Aussi, la fréquence cardiaque a un caractère englobant, étant conditionnée à la fois par un ensemble de paramètres pertinents, dont la charge physique de travail. L'analyse de l'astreinte thermique, plutôt que l'application d'un indice de contrainte thermique tel que le WBGT ne

requiert donc pas l'évaluation du métabolisme, source dominante d'imprécision. Rappelons que le métabolisme au travail se situe généralement entre 100 et 500 watts et qu'une différence de l'ordre d'une dizaine de watts dans un bilan thermique a un impact significatif sur le régime d'alternance travail / repos.

Grâce à une instrumentation simple et accessible, le monitoring cardiaque en continu est rendu possible sur tout le quart de travail. Ces données permettent donc une analyse sur des périodes de temps variables, allant des valeurs minute par minute jusqu'à la moyenne sur la période entière de travail.

MÉTHODE

Approche

La présente étude comporte deux grands volets, à savoir l'étude des différents indices de contrainte thermique dans les ambiances thermiques rencontrées en mine profonde, puis l'étude du niveau d'astreinte thermique de quelques travailleurs.

L'analyse comparative de la contrainte thermique selon différents indices est relativement simple. Elle demande d'abord de définir l'ambiance thermique couverte par la lecture des valeurs limites, inférieures et supérieures, de chacun des paramètres de l'environnement que sont la vitesse de l'air, la température de l'air, la température radiante, l'humidité de l'air (estimée par la lecture de la température bulbe mouillée), les postures de travail et l'isolement vestimentaire. L'analyse par l'indice ACP demande également la lecture de la pression barométrique.

Avec ces données en main, il suffit ensuite de faire varier ces paramètres entre les valeurs les plus favorables et défavorables afin d'analyser les résultats obtenus par l'indice WBGT, ACP, ISO 7933 et la version révisée de ISO faisant l'objet d'une proposition, notée ISO 2000.

L'analyse de l'astreinte thermique est basée sur la réponse cardiaque des travailleurs exposés. Le choix de cette composante de l'astreinte thermique est basé sur le fait qu'elle atteint très généralement les limites recommandées plus précocement que les deux autres composantes à savoir, l'élévation des températures corporelles et le déficit hydrique (déshydratation). De plus, le monitoring de l'astreinte cardiaque est facile grâce à des moniteurs robustes, peu encombrants et d'une capacité d'enregistrement qui permet de couvrir un quart de travail complet.

Choix des tâches et des sujets

Le choix des tâches devant faire l'objet du monitoring cardiaque a été arrêté avec les gens de la mine où l'étude avait lieu, les responsables de l'étude n'ayant aucune expérience de ce milieu de travail. Les critères de choix étaient la lourdeur de la tâche et leur présence dans la partie profonde de la mine. Les six tâches retenues sont celles:

1. d'un mineur conventionnel
2. d'un opérateur de jumbo
3. du boulonnage et de l'opération d'une foreuse à béquille
4. du câblage
5. d'un opérateur de chargeuse navette
6. d'un opérateur de boulonneuse

Le choix des travailleurs qui portaient les moniteurs cardiaques (sujets de l'étude) a été fait par les responsables de la mine en fonction de la collaboration du travailleur et de son superviseur. Ce dernier devait faire état, à la fin du quart de travail de la nature du quart de travail. Les commentaires du travailleurs étaient également pris en note. L'âge des sujets varie entre 21 et 49 ans. Tous étaient expérimentés au travail en mines profonde et à la tâches qu'ils assumaient au moment de participer.

Collecte de données

Les sujets qui avaient été informés la veille de leur participation passaient au bureau du responsable de l'hygiène industrielle avant de prendre l'ascenseur. Le moniteur, *Personal Heat Stress Monitors* de Metrosonics (Metrosonics inc. Rochester, N.Y., modèle hs-3800) était installé en même temps que nous les informions sur la nature de l'étude et de leur droit de mettre fin à leur participation en tout temps. Les responsables de l'étude prenaient l'ascenseur au tour suivant pour rejoindre les sujets, vérifier le bon fonctionnement du moniteur, corriger la situation au besoin et répondre aux questions.

Les enregistrements des paramètres de l'environnement étaient prélevés en différents points le long du parcours qui nous permettait de rejoindre les sujets les 29 et 30 juillet. Les conditions dans les salles de repos ont également été enregistrées. Ces paramètres étaient lus sur un WiBGeT (IST RSS-214 Reuter-Stokes), un psychromètre (Psychro-Dyne modèle 3312-40, Cole Parmer) un thermo-anémomètre (Digitale air velocity meter, Kurz) et anémomètre à ailettes (Turbo Meter, Davis Instruments).

Les responsables de l'étude remontaient à la surface avec les contre-maîtres et se préparaient à recevoir les sujets qui remontaient plus tard. Les quarts observés étaient de huit heures (7h30 à 15h30) ou de 10 heures (7h30 à 17h30).

En l'absence de définition exacte de *mine profonde*, et après discussion avec les responsables de la mine, les niveaux étudiés varient entre 146 et 215, correspondant à une profondeur de 1460 et 2150 mètres sous la surface.

Analyse

Contrainte thermique

L'analyse de la contrainte thermique doit permettre une analyse comparative des résultats de l'application de différents indices avec le *Air cooling power* (ACP). Nous avons retenus les indices suivants :

1. ISO 7933 (1989) Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de la sudation requise. Cet indice est bien supporté par une approche rationnelle comparable à celle du ACP.
2. ISO / CD 7933 (2000) Ergonomics of the thermal environment : Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of Predicted Heat Strain. Il s'agit d'une proposition de norme formulée par le comité responsable. Cette proposition est une mise à jour de la version 1989 qui inclue plusieurs modifications et précisions provenant du vaste programme BIOMED. Ces bonifications proviennent de plusieurs équipes de recherche, toutes européennes, et sont regroupées dans le recueil des communications d'une rencontre scientifique tenue à Barcelone en 1999 (Malchaire 1999).
3. L'indice WBGT dont l'utilisation est en vigueur au Québec et qui demeure l'indice de contrainte thermique le plus utilisé dans le monde.

La comparaison entre ces indices et l'ACP se fera entre deux conditions climatiques limites définies à partir des lectures les plus favorables et les plus défavorables sur chacun des paramètres pertinents relevés *in situ*. Ces conditions, appelées ambiance favorable et défavorable ne correspondent donc pas à une situation observée mais plutôt à des limites qui englobent l'ensemble des situations possiblement rencontrées.

Astreinte cardiaque

- Valeurs moyennes sur des fenêtres de 5 à 90 minutes

Des valeurs limites de fréquence cardiaque correspondant à des fenêtres de temps variant entre 5 et 90 minutes sont proposées, et ce, pour trois classes d'âge (Bernard & Kenney, 1994). Le Tableau II présente ces valeurs limites sur deux niveaux. Le premier niveau vise à avertir le travailleur qui porte l'appareil qu'il atteindra la limite (second niveau) dans environ dix minutes si le travail est maintenu au même rythme. Il doit donc être interprété comme une incitation à prévoir une période de récupération. Le second devrait être interprété comme étant la limite à ne pas dépasser.

Tableau II. Valeur limite de fréquence cardiaque pour des périodes de 5 à 90 minutes (Battements par minute)

Fenêtre de temps (mn)	Équivalent %VO ₂	Classes d'âge					
		20 à 35 ans		36 à 50 ans		51 à 65 ans	
		Second niveau	Premier niveau	Second niveau	Premier niveau	Second niveau	Premier niveau
5	83	169	164	160	156	152	148
10	75	160	156	152	149	145	141
20	67	151	148	145	141	138	135
30	63	146	143	140	137	134	131
45	59	141	138	136	133	130	127
60	56	138	135	132	129	127	124
90	51	133	130	128	125	123	120

D'autres valeurs peuvent servir à situer l'astreinte cardiaque. Nous avons retenu, outre les limites apparaissant au Tableau II, un ensemble de paramètres qui nous semble à la fois complet et bien supporté scientifiquement. Ces paramètres sont :

- limite de fréquence cardiaque moyenne pour le quart de travail de 110 bpm,
- limites de la fréquence cardiaque d'une minute à deux niveaux; soient 85% et 90% de la fréquence cardiaque maximale,

- Fréquence cardiaque moyenne

La fréquence cardiaque moyenne d'un quart de travail englobe l'ensemble des activités, incluant les périodes de pauses et des repas. Elle est calculée en divisant simplement la somme des valeurs de fréquence cardiaque pour chaque minute par le nombre total d'enregistrements.

- *Fréquence cardiaque maximale*

La fréquence cardiaque maximale d'un individu varie avec l'âge et peut être estimée selon deux méthodes. La plus répandue dans le domaine médical consiste à simplement soustraire l'âge de la personne à 220.

$$FC_{\max} = 220 - \text{âge} \quad \text{équation 3}$$

La seconde méthode a été proposée pour l'analyse des coûts énergétiques et cardiaques du travail physique :

$$FC_{\max} = 195 - 0.67 (\hat{\text{Age}} - 25) \quad \text{équation 4}$$

Ces deux modes d'expression de la fréquence cardiaque maximale ont été retenus pour la présente étude. La Figure 1 montre que les deux valeurs convergent à 25 ans (FC_{\max} de 195 bpm), et s'écartent avec l'âge, de sorte qu'à 60 ans, l'équation 1 estime la FC_{\max} à 160 bpm alors que selon l'équation 2, elle est de 172 bpm.

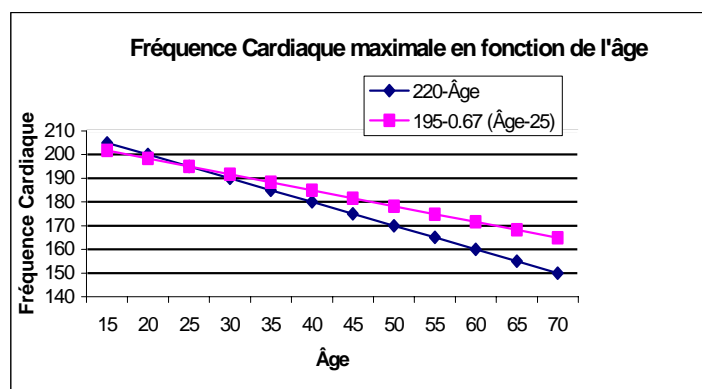


Figure 1. Valeurs de la fréquence cardiaque maximale (FC_{\max})

RÉSULTATS

Ambiance thermique

Les valeurs enregistrées de chacun des paramètres environnementaux servent à définir les limites supérieure et inférieure qui détermineront l'étendu des conditions analysées sous chacun des indices de contrainte thermique retenus.

Pression barométrique

Les valeurs de pression barométrique apparaissent au Tableau III. L'analyse de l'indice ACP, seul indice à considérer la pression barométrique, comparera donc la valeur de pression atmosphérique (101.3 kPa) avec la valeur observée la plus élevée, soit 122.8 kPa.

Tableau III. Valeurs de pression barométriques observées

Dates	Niveau (Dm)	Presion (kPa)
29 juillet 2002	215	122.8
29 juillet 2002	206	121.6
30 juillet 2002	149	114.7
30 juillet 2002	146	114.5

Vitesse de l'air

Les valeurs de vitesse de l'air varient très largement en des points pouvant être très rapprochés. Les ouvertures dans les conduits de ventilation peuvent faire en sorte que la vitesse soit au-dessus des 3 mètres par seconde alors que quelques enregistrements pris en bout de tunnel n'étaient pas détectables. Dans l'ensemble les vitesses de l'air ont varié entre les valeurs nulles jusqu'à un maximum de 5.2 mètres par seconde. Cinq lectures sur un total de 29 dépassent 3 m/s. Donc pour permettre l'analyse comparative entre les indices dont la norme ISO qui a pour limite supérieure 3 m/s, c'est cette valeur que nous allons retenir pour limite supérieure. La limite inférieure est déterminée par la convection naturelle propre aux indices rationnels.

Température de l'air

La température de l'air (aussi appelée température sèche) varie très peu, et ce même lorsque nous considérons les salles à dîner. Aux deux niveaux les plus profonds (206 et 215) la température de l'air la plus basse, soit 27.7°C a été enregistrée dans une salle à dîner alors que le maximum a été de 33.1°C dans l'aire de travail. Aux niveaux 146, 149 et 152 les minimum et maximum sont de 24.1 et 30.9°C respectivement. L'analyse comparative des indices utilisera donc les limites de température de l'air de 24.1 et 33.1°C.

Température humide

Les variations de température humide sont également très limitées. Aux niveaux plus profonds, les limites vont de 23.3 (salle à dîner, excluant la valeur de 21.75 mesurée à l'échelle qui n'est pas fréquenté par les travailleurs) à 27.25°C. Aux niveaux moins profonds, les limites sont de 22.0 et 25.75°C respectivement. L'analyse comparative des indices utilisera donc les limites de température humide de 22.0 et 27.25°C. L'humidité est parfois tellement élevée que la lecture de

la température humide naturelle était légèrement supérieure à celle de la température humide forcée.

Température globe

La température globe est toujours très près de la valeur de température sèche. Les échanges par rayonnement sont à toute fin pratique négligeables sous les conditions observées. Ceci s'explique par la température de la roche mère qui est très près de celle de l'air. Pour cette raison l'analyse comparative des indices utilisera donc les mêmes valeurs que celles de la température de l'air.

Dans le cas des opérateurs de machines/véhicules industriels, il conviendrait de mesurer la température globe à l'endroit exact où l'opérateur prend place. La machine peut atteindre une température qui en fasse une source d'émission significative. Dans la présente étude, les travailleurs concernés étaient descendus de leur véhicules au moment de notre visite et ce sont les paramètres ambiants qui ont été enregistrés.

Définition des environnements favorables et défavorables

L'ensemble des limites arrêté ci-haut permet de définir deux environnements de travail théoriques, notés favorable et défavorable. Ces deux conditions climatiques servent seulement à délimiter la portée de l'étude comparative entre les indices et ne correspondent pas à une situation observée.

Tableau IV. Conditions environnementales de l'étude comparative des indices

Paramètre	Ambiance favorable	Ambiance défavorable
Vitesse de l'air (V_a) (m/s)	3	Convection naturelle
Température de l'air (T_a) °C	24.1	33.1
Température humide (T_{bm}) °C	22.0	27.25
Température globe (T_g) °C	24.1	33.1
Isolation vestimentaire (I_{cl}) clo	0.8	0.8

Énergie métabolique

Pour des raisons discutées plus haut, l'énergie métabolique, ou charge physique de travail, est extrêmement variable. Puisque l'indice *Air cooling power* permet justement de calculer la limite supérieure de ce paramètre, l'étude comparative des indices doit donc couvrir un ensemble de niveau qui englobe la totalité des situations possibles. Pour ces raisons, l'analyse comparative des indices utilisera les valeurs 200, 300, 400 et 450 Watts, correspondant à un travail léger (tel que l'opération de machines) jusqu'à la limite supérieure déterminée par l'indice ISO 2000.

Analyse comparative des indices de contrainte thermique

ISO 7933 (1989)

Le Tableau V présente une synthèse de l'application de la norme ISO 7933 dans sa version 1989 aux ambiances favorable (Tableau IV A) et défavorable (Tableau IV B). Il présente d'abord les valeurs du taux de sudation requise pour éviter l'élévation des températures corporelles. Par exemple, sous ambiance favorable (Tableau V A), un travailleur non acclimaté dont la charge de travail est de 400 Watts devrait suer à un taux de 530 grammes à l'heure, ce qui lui permettrait d'éviter l'accumulation de chaleur. Cependant, à ce rythme, après une durée de 6 heures et 8 minutes, il aura perdu 3250 grammes de sueur et le travail devra cesser puisque la limite sera atteinte. L'interprétation indique donc « déshydratation ». Ce même travailleur, avec une charge de travail de 450 Watts, ne pourrait conserver l'équilibre thermique parce qu'incapable de suer au taux nécessaire. La durée limite d'exposition de 3 heures et 4 minutes correspond alors au temps où sa température rectale aura monté de 1,2°C, soit la limite supérieure tolérée.

Sous ambiance favorable, le travail devrait donc être maintenu sous les 400Watts pour qu'un travailleur non acclimaté puisse performer sur tout un quart de 8 heures. Pour le travailleur acclimaté, cette limite est sous les 450 watts. Les résultats sont singulièrement différents sous ambiance défavorable où le travailleur non-acclimaté ne peut supporter une charge de travail de 200 watts alors que pour les travailleurs acclimatés, cette limite se situe entre 200 et 300 watts. La durée limite d'exposition est basée sur une élévation de la température rectale de 1,2 °C.

Tableau V Analyse selon ISO 7933 (1989)

A) Ambiance favorable

Métabolisme (watts)	Sudation requise (g/h)		Durée limite d'exposition		Interprétation	
	Acclimaté	Non accl.	Acclimaté	Non accl.	Acclimaté	Non accl.
200	92	92	8:00	8:00		
300	255	255	8:00	8:00		
400	530	530	8:00	6:08		Déshydratation
450	792	582	6:34	3:04	Déshydratation	↑T°corps

B) Ambiance défavorable

Métabolisme (watts)	Sudation requise (g/h)		Durée limite d'exposition		Interprétation	
	Acclimaté	Non accl.	Acclimaté	Non accl.	Acclimaté	Non accl.
200	495	330	8:00	3:56		↑T°corps
300	547	364	1:23	1:01	↑T°corps	↑T°corps
400	565	376	0:39	0:33	↑T°corps	↑T°corps
450	565	376	0:30	0:24	↑T°corps	↑T°corps

ISO 7933 (2000)

Le Tableau VI présente une synthèse de l'application de l'indice ISO 7933, proposition de 2000 aux ambiances favorable (Tableau VI A) et défavorable (Tableau VI B).

Tableau VI Analyse selon ISO 7933 (2000)

A) Ambiance favorable

Métabolisme (watts)	Perte hydrique totale (g)		Température rectale après 8 heures (°C)		Durée limite d'exposition		Interprétation	
	Acclim	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.
200	598	598	37.2	37.2	8 heures	8 heures		
300	1565	1565	37.5	37.5	8 heures	8 heures		
400	2594	2594	37.7	37.7	8 heures	8 heures		
450	3169	3169	37.8	37.8	8 heures	8 heures		

B) Ambiance défavorable

Métabolisme (watts)	Perte hydrique totale (g)		Température rectale après 8 heures (°C)		Durée limite d'exposition		Interprétation	
	Acclim	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.	Acclim.	Non acclim.
200	5347	4484	38.9	>39.2	2:49	1:40	Déshydratation	Déshyd. et ↑T°corps
300	7120	5664	>39.2	>39.2	1:03	0:50	Hydr. et ↑T°corps	Hydr. et ↑T°corps
400	9546	7558	>39.2	>39.2	0:39	0:33	Hydr. et ↑T°corps	Hydr. et ↑T°corps
450	10906	8618	>39.2	>39.2	0:32	0:28	Hydr. et ↑T°corps	Hydr. et ↑T°corps

La proposition de 2000 de la norme ISO 7933 présente globalement des durées limite d'exposition plus longues que la version adoptée en 1989. Sous ambiance favorable, le Tableau VI A) ne montre aucune durée limite en deçà des 8 heures, soit la durée maximum prévue par cet indice. Les résultats sont très différents sous l'ambiance défavorable (Tableau VI B). Un travailleur acclimaté ne limiterait sa température centrale sous 39,2°C que sous une charge de travail de 200 watts, cependant que sa durée d'exposition serait limitée à 2 heures 49 minutes à cause des pertes hydriques. Pour toutes les autres situations, et les pertes hydriques et l'élévation de la température rectale sont trop sévères et limitent l'exposition à des durées très courtes, variant entre 28 minutes et 1 heure 40 minutes.

Comparatif WBGT

Le Tableau VII montre les résultats de l'analyse comparative sous des conditions favorables (Tableau VII A) et défavorables (Tableau VII B) selon l'indice WBGT, ISO 7933, puis la proposition de norme révisée ISO 7933 en 2000. L'indice WBGT est calculé selon l'équation :

Pour les travailleurs acclimatés :

$$WBGT_{lim} = 56.7 - 11.5 \log_{10}M \quad \text{Équation 5}$$

Pour les travailleurs non-acclimatés :

$$WBGT_{lim} = 59.9 - 14.1 \log_{10}M \quad \text{Équation 6}$$

où M est l'énergie métabolique (watts).

Les valeurs WBGT observées ont été corrigées pour tenir compte du bleu de travail suivant la recommandation de Bernard (2000) citée plus haut en y ajoutant 3.5°C.

Tableau VII. Analyse selon les indices WBGT, ISO 7933 (1989) et ISO 7933 (2000).

A) Ambiance favorable

Métabolisme (watts)	WBGT observé corrigé (°C)	WBGT limite (°C) Accl./non accl.	ISO 7933 (1989) Durée limite d'exposition hh:mm Accl./non accl.	ISO 7933 (2000) Durée limite d'exposition
200	26.1	30.2 / 27.5	8 heures / 8 heures	8 heures / 8 heures
300	26.1	28.2 / 25.0	8 heures / 8 heures	8 heures / 8 heures
400	26.1	26.8 / 23.2	8 heures / 6:08	8 heures / 8 heures
450	26.1	26.2 / 22.5	6:34 / 3:04	8 heures / 8 heures

B) Ambiance défavorable

Métabolisme (watts)	WBGT observé corrigé (°C)	WBGT limite (°C) Accl./non accl.	ISO 7933 (1989) Durée limite d'exposition hh:mm Accl./non accl.	ISO 7933 (2000) Durée limite d'exposition Accl./non accl.
200	32.4	30.2 / 27.5	8 heures / 3:56	2:49 / 1:40
300	32.4	28.2 / 25.0	1:23 / 1:01	1:03 / 0:50
400	32.4	26.8 / 23.2	0:39 / 0:33	0:39 / 0:33
450	32.4	26.2 / 22.5	0:30 / 0:24	0:32 / 0:28

Le Tableau VII A) montre que les travailleurs acclimatés peuvent supporter des charges de travail très élevées sous l'ambiance favorable selon le WBGT (les cas de dépassements ou de durée limités d'exposition sont en caractère gras). Les travailleurs non-acclimatés doivent cependant adopter une régime d'alternance travail/repos dès que la charge de travail atteint 300 watts. Les choses sont singulièrement différentes sous l'ambiance défavorable (Tableau VII B). L'indice WBGT prévoit alors des alternances travail/repos pour tous les travailleurs et ce, même pour des charges de travail légères.

Air cooling power

L'application de l'approche *Air cooling power* consiste à calculer le métabolisme limite qui respecte des conditions d'équilibre dans le bilan thermique. Ce calcul complexe a été fait à l'aide de la version septembre 2000 du logiciel *RHP –Air cooling power Program* qui nous a été fourni par le Dr. Howes.

Sous l'ambiance favorable telle que définie au Tableau IV et sous la pression barométrique la plus élevée, soit 122.8 kPa, la limite serait de 305 watts/m², soit 549 Watts pour un homme standard, alors qu'elle serait de 111 watts/m², ou 200 watts pour l'homme standard (Hstd) sous l'environnement défavorable (Tableau VIII). Sous une pression barométrique de une atmosphère, soit 101.3 kPa, ces deux valeurs seraient de 322 watts/m² et 119 watts/m² respectivement pour les ambiances favorable et défavorable.

Tableau VIII. Métabolisme limite selon l'indice *Air cooling power*

Pression barométrique (kPa)	Ambiance favorable		Ambiance défavorable	
	Watts/m ²	Watts (Hstd)	Watts/m ²	Watts (Hstd)
122.8	305	549	111	200
101.3	322	580	119	214

Analyse de l'astreinte

La synthèse de l'analyse de l'astreinte cardiaque apparaît au Tableau IX. Des onze quarts de travail qui ont fait l'objet d'un monitoring, trois ont dû être rejetés pour cause de défaillance technique. Le ciment, la poussière de roche et les conditions d'humidité ont mis à dure épreuve les moniteurs personnels. Il reste donc huit quarts de travail pour lesquels nous avons obtenu un enregistrement fiable des valeurs de fréquence cardiaque minute par minute. Ils concernent des travailleurs âgés entre 28 et 49 ans. Aucun des enregistrements retenus ne concerne la tâche de câblage.

Il y a dépassement de certaines des limites utilisées dans quatre cas sur les huit quarts. Tous les cas de dépassement sont multiples. Dans deux cas, l'ensemble complet des 10 valeurs limites de fréquence cardiaque utilisées est dépassé. La quasi totalité des dépassements des limites de valeurs moyennes sur des fenêtres de temps entre 5 et 90 minutes (MTA) proposées franchissent le niveau 2. Ce niveau prévoit la cessation immédiate du travail.

Tableau IX. Analyse de l'astreinte cardiaque

	Tâche et environnement			Résultats														
				Valeurs enregistrées							Dépassements fenêtres de temps [†]							
	Classe d'âge *	FC _{max} NIOSH	FC _{max} b&k	Tâche **	Horaire ***	Température disque	FC _{moy}	FC _{platfond}	% max. NIOSH	% max. b&k	5	10	20	30	45	60	90	Niveau
Sujet 1	2	181	186	1	1	37.1	89	135	74.6	72.7								206
Sujet 2	2	184	188	2	1	36.5	98	118	64.1	62.9								206
Sujet 1	2	181	186	1	1	37.2	102	166	91.7	89.4	1	2	2	2	2			206
Sujet 3	2	182	186	6	1	37.4	98	166	91.2	89.1	2	2	2	2	2	2	2	206
Sujet 2	2	184	188	2	1	37.6	124	197	107	105	2	2	2	2	2	2	2	206
Sujet 4	2	171	179	3	1	38.7	125	168	98.3	93.9	1	2	2	2	2	2	2	170
Sujet 5	1	192	193	5	2	37.3	89	142	73.9	75.6								170
Sujet 5	1	192	193	5	2	37.1	88	129	67.2	66.8								191

* Classe d'âge : 1 = 20-35; 2 = 35-50 ans; 3 = 51-65 ans et +

** Tâche : 1 = Mineur conventionnel; 2 = Opérateur de jumbo; 3 = Boulonnage, foreuse, béquille; 4 = Câblage; 5 = Opérateur de chargeuse navette; 6 = Opérateur de *boulonneuse*

*** Horaire : 1 = 7: 30 h à 15: 30 h; 2 = 7: 30 h à 17 : 30 h.

† Dépassements : 1 = niveau 1; 2 = niveau 2

DISCUSSION

Collecte de données

Les conditions rencontrées dans une mine souterraine sont extrêmement dures pour l'instrumentation. Le choix de cardio-tachymètres, beaucoup moins dispendieux quoique moins fiables, pourrait s'avérer judicieux sous ces conditions.

Les contremaîtres, les sujets de l'étude et une personne chargée de surveiller ces sujets par la direction de la mine n'ont rapporté rien d'inhabituel dans les conditions qui prévalaient au moment de la cueillette de données. Nous considérons donc les quarts de travail enregistrés comme étant représentatifs du travail en mine profonde. La taille de l'échantillon est cependant très modeste de sorte qu'une relation étroite entre contrainte et astreinte ne peut être extraite de ce seul ensemble de données.

L'ensemble de critères d'analyse retenu s'avère à la fois pertinent et complet. L'indice empirique WBGT est à la fois le plus utilisé dans le monde et celui cité par notre réglementation. Cependant, les conditions de l'étude qui ont permis d'établir cette relation contrainte-astreinte étant très différentes de celles observées en mine profonde, et l'application d'un facteur de correction pour tenue vestimentaire, font que l'analyse de cet indice doit se limiter aux grandes tendances. Les deux versions de la norme ISO 7933 représentent quant à elles les indices rationnels les mieux documentés. Elles partagent la même assise que l'indice ACP. Le fait qu'elles ne considèrent pas la pression barométrique amène une incertitude qui ne peut être levée. Le calcul du métabolisme limite par l'ACP, qui inclue cette pression, montre une différence faible entre la limite calculée à 101,3 versus 122,8 kPa.

Quant à l'astreinte thermique, le choix de la fréquence cardiaque semble encore une fois s'avérer judicieux, pratique et performant. De plus, l'ensemble de dix limites retenues couvre des fenêtres de temps allant d'une seule minute (FC_{max}) jusqu'à la durée complète du quart de travail (FC_{moy}) en passant par sept périodes variant entre 5 et 90 minutes.

Analyse de la contrainte thermique

Le jeu de quatre niveaux de métabolisme utilisé pour analyser les deux ambiances extrêmes, favorable et défavorable, permet de fermer la boucle. En effet, l'analyse de ces ambiances montre un dépassement sous l'ambiance favorable aux valeurs de 400 et 450 watts alors que sous l'ambiance défavorable, le dépassement apparaît déjà à 200 watts pour le travailleur non-acclimaté.

L'analyse selon la norme ISO 7933 dans sa version adoptée en 1989 démontre la pertinence de considérer à la fois les pertes hydriques et l'élévation des températures corporelles puisque des durées limite d'exposition basées sur la déshydratation apparaissent sous l'ambiance favorable. Cette ambiance permet une forte évaporation maximale, prévenant sous ces conditions l'élévation des températures corporelles, mais causant une perte hydrique sévère. Une telle limite aurait échappé à l'indice ACP qui, tel que mentionné plus haut, ne s'assure que de l'équilibre thermique. Brake (2000) suite à des observations en mine souterraines, conclue qu'il n'est pas pertinent de considérer les pertes hydriques dans les cas où les travailleurs ont accès à de l'eau à

volonté. Cette conclusion est en opposition avec celles du groupe de recherche BIOMED (Malchaire 1999) et la proposition de norme ISO 7933 (2000) qui en découle.

L'ambiance défavorable, toujours selon la version 1989 d'ISO 7933 ne serait acceptable que pour des travailleurs acclimatés dont la dépense énergétique se situe entre 200 et 300 watts, soit de léger à moyen. Le Tableau V illustre bien une faiblesse de cette version de la norme qui considère l'évaporation maximale de l'environnement dans le calcul de la sudation requise lorsque celle-ci est inférieure à l'évaporation requise. Ainsi, la sudation requise, en ambiance chaude, plafonne aux valeurs de 565 gr/h et 376 gr/h respectivement pour les travailleurs acclimatés et non-acclimatés. Pourtant, même si c'est le taux d'évaporation sous cette ambiance excessivement humide qui limitera les pertes de chaleur, le sujet lui, suera abondamment, et l'excès de sueur sera perdu, non évaporé. Cette irrégularité avait été soulignée par plusieurs auteurs (Kampmann et Piekarski 1994, Malchaire 1999).

La version de cette norme proposée en 2000 corrige cette lacune. Ainsi, les pertes hydriques prédites sous l'ambiance défavorable atteignent des valeurs aussi élevées que 10906 grammes. Ainsi, la durée limite d'exposition pour cette condition n'est que de 32 minutes pour un travailleur acclimaté. Par ailleurs, les résultats de l'analyse de l'astreinte thermique selon cette version sont assez cohérents avec la version originale. Elle permet un niveau d'exposition un peu plus sévère sous l'ambiance favorable puisqu'elle ne limite aucunement le travail. Les choses en vont tout autrement sous ambiance défavorable. Sous un métabolisme de 200 watts, le travailleur non-acclimaté ne peut éviter une hausse de la température rectale au-delà de la limite de 39.2°C, alors que le travailleur acclimaté dépasse légèrement la perte hydrique limite de 5200 grammes. Toutes les autres situations montrent à la fois un niveau de déshydratation élevé et une élévation des températures rectales pour tous les travailleurs. L'élévation constante des températures rectales prédite sous ambiance défavorable est une contre-indication à l'utilisation de l'indice WBGT sous de tels ambiances thermiques. En effet, l'indice WBGT repose sur la prémisse qu'une température rectale d'équilibre est atteinte après une certaine période de travail en ambiance chaude (Lind 1963). Les corrections pour la tenue vestimentaire développées par Bernard et reprises dans les TLV (ACGIH, 2002) reposent sur les mêmes bases. Donc, cet indice est non fondé pour de telles situations.

Heureusement, l'application de l'indice WBGT corrigé à l'ambiance défavorable, quoique sur une base incorrecte, amène à la conclusion que le travail sous ambiance défavorable est clairement inacceptable. En fait, si on compare la seule conclusion sur l'acceptabilité de la situation de travail, le Tableau VII montre une cohérence assez surprenante, autant sous ambiance favorable que défavorable. Les observations de Malchaire sont plutôt à l'effet que l'indice WBGT est généralement plus limitatif que la version adoptée en 1989 de ISO 7933 (Mairiaux et Malchaire 1990). L'AIOH (2002), à l'instar de Malchaire (1999) propose d'utiliser l'indice WBGT comme outil de ségrégation entre les problèmes d'inconfort et de contrainte thermique et d'analyser les situations de contrainte thermique selon la norme ISO 7933 et le monitoring physiologique.

L'indice ACP semble pour sa part permettre des expositions trop élevées sous ambiance favorable puisqu'elle limite le métabolisme à 580 watts pour l'homme standard (à pression atmosphérique) alors que les indices WBGT et ISO 7933 (1989) limitent la durée d'exposition sous un métabolisme de 450 watts.

Aussi, sous ambiance défavorable, la limite ACP de 214 watts (pour un homme standard) dépasse les limites obtenues par les deux versions ISO, sauf le cas d'un travailleur acclimaté sous ISO 7933 (1989) et l'indice WBGT.

Le domaine d'application de l'indice ACP ne semble pas clairement défini. Le métabolisme, pour un, devrait avoir une limite supérieure. En ce sens, Brake et Bates (2002) situent le domaine d'application du Thermal Work Limit, indice semblable au ACP, citant les études de Wyndham, entre 60 et 380 watts/m². La norme ISO 7933, à laquelle l'ACP emprunte pourtant les équations pour le calcul des échanges thermiques, limite la valeur du métabolisme à moins de 272 watts par mètre carré. Le logiciel qui nous a été fourni dépasse largement ces deux limites. Malheureusement, il nous a été impossible d'obtenir toutes les équations permettant de calculer les valeurs de ACP et la programmation du logiciel. Nos échanges avec le Dr. Howes concernant les conditions d'application sont à l'effet que le ACP ne serait approprié qu'aux seules ambiances thermiques dont la température humide dépasse 25°C (or, environ la moitié des lectures prises dans le cadre de cette étude montrent des valeurs inférieures à cette limite); que lorsque la sudation débute sous une charge de travail modérée; et finalement, que lorsque tous les vêtements portés sont mouillés/humides. Cette dernière condition est très significative car elle explique que la valeur du coefficient de réduction des échanges de chaleur sensibles (F_{cl}) associé au port de vêtements (vapor permeability efficiency) recommandé par le Dr Howes soit de 1, correspondant à 100% d'efficacité (les valeurs au Tableau VIII utilisent cette valeur). Pourtant, le calcul de ce même coefficient par ISO 7933 (1989) suggère une valeur d'environ 0.37. Appliqué au calcul du ACP sous ambiance défavorable, à pression atmosphérique, la limite de travail passerait de 214 Watts ($F_{cl} = 1$) à 157 Watts ($F_{cl} = 0.37$)! Nos observations sur le terrain laissent croire qu'effectivement les vêtements des mineurs sont généralement mouillés mais les replis, la saleté incrustée, les taches d'huile, la poussière de ciment et autres affectent nécessairement la perméabilité des tissus à la vapeur d'eau.

L'analyse détaillée des bilans thermiques selon ISO 7933 (1989) confirme que les échanges de chaleur par convection, rayonnement, sous ambiance défavorable sont non significatifs (moins de 6 watts). L'analyse détaillée selon la proposition 2000 de ISO 7933 montre que les échanges par les voies respiratoires, soit par convection autant que par évaporation, sont de moins de 12 watts. Le bilan thermique sous de telles conditions peut donc en pratique ignorer ces modes d'échange et ainsi se résumer aux conditions d'évaporation qui sont, dans une vaste mesure, dépendante des températures humide et sèche. Il peut donc être possible de simplifier la surveillance de la contrainte thermique en mines profondes en établissant une relation entre l'astreinte et un ensemble très limité de paramètres environnementaux, possiblement la température sèche et humide naturelle. Une telle approche aurait l'immense avantage d'être beaucoup plus pratique à appliquer que les indices rationnels, ISO et ACP, en évitant notamment de mesurer la vitesse de l'air. Sue Leveritt (2002) dans ses notes de cours mentionne que le Mount Isa Mines s'est doté de limites basées sur la température humide.

La réduction du niveau de contrainte thermique dans un environnement aussi vaste que les mines souterraines passe généralement par l'instauration d'un régime d'alternance travail/repos. Lors du repos, le métabolisme se situe autour d'une centaine de watts ce qui abaisse le métabolisme moyen du travailleur. Mais aussi, lorsque le repos se prend dans une aire climatisée, les conditions environnementales nettement plus favorables permettent une récupération beaucoup

plus grande. Malheureusement, les salles de dîner répertoriées lors de la cueillette de données montrent un environnement à peine moins contraignant que le milieu de travail. Aussi, la distance à parcourir depuis les postes de travail jusqu'à ces salles est souvent grande et les conditions de marche difficiles. La MSHA (2002) recommande d'ailleurs des aires de repos climatisées. Cet ensemble de considérations fait en sorte que l'instauration d'un régime travail/repos doit être soigneusement planifiée afin de faciliter l'accès aux travailleurs à une salle climatisée.

La recherche d'un indice adapté aux mines souterraines devrait étudier la simple température humide naturelle (T_{hn}). Contrairement à ce que bon nombre d'intervenants nous ont affirmé, la température humide naturelle est influencée par la vitesse de l'air dans une proportion significative. La Figure 2 montre la variation de la T_{hn} en fonction de la vitesse de l'air et de la température moyenne de rayonnement. La variation de la vitesse de l'air entre 0,1 et 2 mètres par seconde se traduit par une différence sur la T_{hn} pouvant atteindre quelques degrés Celsius. Sachant que le niveau de travail permis selon l'indice WBGT s'échelonne sur une échelle comprise entre 25 et 30°C, et que la T_{hn} compte pour 70% de cet indice, il apparaît que la vitesse de l'air influence très significativement cet indice, comme tout autre indice d'ailleurs.

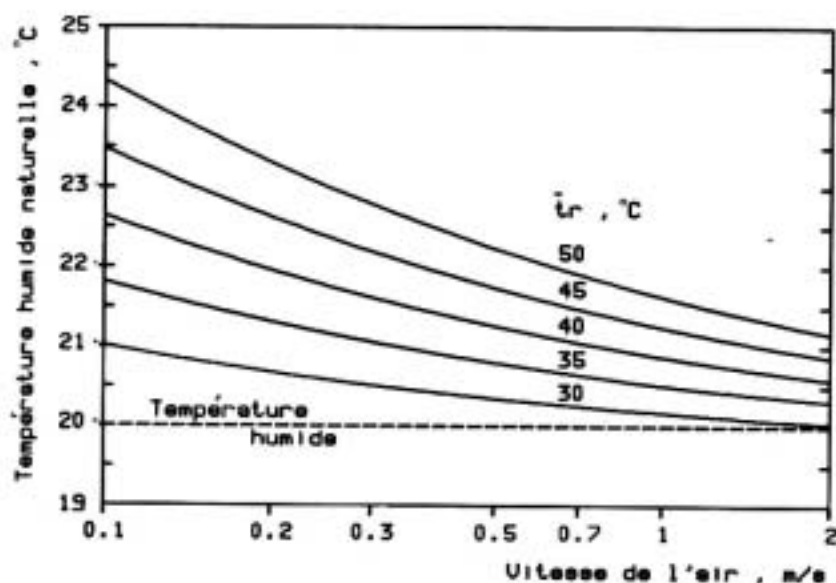


Figure 2. Variation de la température humide naturelle en fonction de la vitesse de l'air et de la température moyenne de rayonnement (selon Mairiaux et Malchaire, 1990)

Analyse de l'astreinte thermique

Les sujets qui ont fait l'objet d'un monitoring cardiaque étaient exposés à des ambiances thermiques comprises entre les deux limites exprimées par les ambiances favorables et défavorables utilisées dans la présente étude. Il était impensable de mesurer avec une précision raisonnable les paramètres de l'environnement tout au long de leur quart de travail pour ensuite calculer l'astreinte thermique sur la même période. L'étude de l'astreinte thermique ne sert donc

pas à statuer sur l'indice de contrainte thermique le plus performant mais plutôt à vérifier que ces indices assurent une protection adéquate.

Les températures disque observées doivent être interprétées avec discernement (Tableau IX). D'une part, les senseurs étaient souvent déplacés lors des vérifications en cours de monitoring ou lorsque le sujet revenait à la fin du quart. D'autre part, les concepteurs même de cette approche (Bernard et Kenney, 1994) mettent en garde contre toute modification du coussinet isolant entourant le disque. Parce que ces coussinets étaient souvent perdus, nous avons tenté de fabriquer des substituts qui peuvent avoir affecté sérieusement les lectures. Le seul cas de dépassement de la limite de 38°C proposée par l'OMS concerne le sujet 4 qui montre également le cas d'astreinte cardiaque le plus lourd.

L'étude de l'astreinte cardiaque est très concluante, dans 50% des cas, soient 4 quarts sur 8, le niveau d'astreinte doit être considéré comme très élevé, voire extrême. Les cas de dépassement sont nombreux et concernent plusieurs limites basées sur des périodes de temps différentes. L'analyse détaillée de ces enregistrements montre des fréquences cardiaques très élevées sur des périodes prolongées. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Brake (2000) portant sur les valeurs de fréquence cardiaque moyenne sur le quart de travail. Certaines valeurs dépassaient les 110, voire 120 battements par minute (bpm) dans certains cas. Dans cette même étude, les pertes hydriques et l'élévation des températures corporelles dépassaient aussi les limites proposées dans plusieurs cas. Ce dernier auteur suggère d'utiliser des niveaux d'astreinte cardiaque, thermique et hydrique plus élevés chez les populations de mineurs, n'ayant observé aucun cas de désordre physiologique sévère.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le règlement sur la santé et sécurité du travail prévoit déjà l'instauration d'un programme de surveillance médicale pour les travailleurs exposés à des contraintes plus élevées que celles permises en continu dans les cas où l'instauration de mesures de correction à la source ne sont pas encore possibles. Cette étude montre que dans une mine souterraine, à 1700 mètres de profondeur et plus, l'indice WBGT n'est pas approprié. Il convient donc de définir la surveillance médicale prévue.

L'indice ACP peut être utile pour situer le niveau de contraintes avant que d'autres modes de surveillance soient développés, cependant, l'utilisation de la norme ISO 7933 a l'avantage d'être supportée scientifiquement par un organisme reconnu et de faire l'objet de mises à jour qui font suite à des études exhaustives. Il est souvent possible de se procurer le support informatique nécessaire à son application gratuitement. Cette norme s'intéresse à la fois à la hausse des températures corporelles et aux pertes hydriques, ce dernier paramètre limitant souvent les durées d'exposition. Dans les conditions observées dans cette étude, l'indice ACP s'est avéré difficile d'application. La documentation scientifique que nous avons pu obtenir est incomplète. Les limites d'application proposées par certains auteurs ne sont pas respectées par le logiciel qui nous a été fourni. Pour toutes ces raisons, nous ne retenons pas l'indice ACP comme un outil valable d'analyse des contraintes thermiques, dans les mines comme ailleurs. L'approche rationnelle qu'elle emprunte serait beaucoup mieux supportée par l'application pure et simple de l'indice ISO 7933 qui exige la lecture des mêmes paramètres que l'ACP. La norme ISO ne tient pas compte de la pression atmosphérique dans le calcul du bilan thermique, cependant ce paramètre cause une différence assez mince selon l'ACP.

Le développement d'un programme de surveillance de la contrainte thermique spécifique aux mines profondes demande de clarifier deux entités à savoir, la détermination du métabolisme et les conditions d'évaporation en milieu hyperbare. La détermination du métabolisme peut mener à des tables telles que celle du règlement sur la santé et sécurité du travail. La construction de telles tables doit reposer sur une étude exhaustive, idéalement par calorimétrie indirecte. Des dispositifs ambulatoires d'enregistrement de la consommation d'oxygène légers et peu encombrants existent, il reste cependant à vérifier que ces appareils puissent résister aux conditions particulièrement difficiles des mines souterraines.

Les conditions d'évaporation de l'eau dans l'air en milieu hyperbare sont mal définies. Si la lecture de la température du thermomètre humide est généralement bien acceptée, elle n'en demeure pas moins une approximation de la température de l'air à saturation. La littérature ne confirme pas que cette substitution ait une précision acceptable sous condition hyperbare. Nous recommandons une étude théorique visant à déterminer le taux d'évaporation entre 100 et 140 kPa, en laboratoire d'abord, suivie d'une validation en situation réelle de travail.

Après éclaircissement des deux points mentionnés ci-haut, une relation entre la contrainte et l'astreinte en fonction du métabolisme, soit un nouvel indice de contrainte thermique spécifique aux conditions rencontrées en mine profonde pourrait être proposé puis validé. Il est possible que la simple température humide naturelle soit le paramètre le mieux corrélé à l'astreinte thermique observée. Le développement d'un tel indice permettrait de limiter au minimum l'instrumentation

requis et de récupérer l'immense avantage de l'indice WBGT, à savoir de ne pas avoir à lire la vitesse de l'air, ce que requièrent ISO 7933 et ACP.

À court terme, l'application du WBGT et de l'indice ISO 7933 peut assurer une sécurité acceptable aux conditions suivantes :

- Un contrôle strict de l'acclimatement des travailleurs
- Appliquer les facteurs de correction pour la tenue vestimentaire
- Estimer les valeurs de métabolisme de façon conservatrice (favorisant les valeurs supérieures)
- Respecter les limites de l'un et l'autre indice
- Assurer un suivi médical étroit des travailleurs
- Offrir à tous les travailleurs une formation adaptée sur le travail en ambiance chaude, ses paramètres, l'astreinte thermique et ses méthodes de reconnaissance
- Maintenir de l'eau potable disponible partout

Finalement, et considérant le fort volume de perte hydrique que subissent les travailleurs, l'administration des mines profondes devrait considérer d'offrir à ses travailleurs des breuvages tels les fluides de remplacement et les jus de fruit à des prix incitatifs.

RÉFÉRENCES

ACGIH (2002). Threshold limit values and biological exposure indices for 2002. American Conference of Governmental Industrial Hygienist, Cincinnati, OH. ISBN1-882417-46-1.

AIOH (2002). Documentation of the heat stress standard developed for use in the Australian environment. Draft 2.0. Heat Stress Working Group, Australian Institute of Occupational Hygienists.

ISO/CD 7933 (2000). Ergonomics of the thermal environment : Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. Working. Draft. ISO/TC159/SC5/WG1.

ISO 7933 (1989). Ambiances thermiques chaudes – Détermination analytique et interpretation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de la sudation requise. Première édition.

MHSI (2002). Guideline for a compilation of a mandatory code of practice for an occupational health programme on thermal stress. Mine health and safety inspectorate, department of minerals and energy, Republic of South Africa.

MSHA (2002). Heat stress in mining. U.S. Department of Labor. Mine safety and health administration.

MOSHAB (1997). Management and prevention of heat stress -Guideline. Department of minerals and energy, Western Australia. Document No. ZMR002SX.

Règlement sur la santé et la sécurité du travail. Décret 885-2001. Éditeur officiel du Québec, 2001. ISBN 2-551-20625-1.

Bernard, T.E. (2000). WBGT analysis for application of heat stress and strain TLV. WBGT workbook. Monographie.

Bernard, T.E. and M. Pourmoghani (1999). Prediction of workplace WBGT. Applied Occupational and Environmental Hygiene 14:126-134.

Bernard, T.E. et W.L. Kenney (1994). Rationale for a personal monitor for heat strain. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. Vol. 55, No 6.

Bethea, D. et Ken Parsons (2002). The development of a practical heat stress assessment methodology for use in UK industry. Health and safety executive research report 008. ISBN 0 7176 2533 8.

Brake, D. J. et G.P. Bates (2002). Limiting metabolic rate (thermal work limit) as an index of thermal stress. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 17:176-186.

Brake, D. J. (2000). The deep body core temperatures, physical fatigue and fluid status of thermally stressed workers and the development of thermal work limit as an index of heat stress. Thèse de doctorat. Curtin University of Technology. School of Public Health.

Pierre C. Dessureault, Richard B. Konzen, Newton C. Ellis et Daniel Imbeau (1995). Heat strain assessment for workers using an encapsulating suit and a self-contained breathing apparatus. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 10: 200-208.

Fuller, R.H. et P.E. Smith (1981). Evaluation of heat stress in hot workshop by physiological measurements. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 42 : 32-37.

Howes, M.J. Communications personnelles.

Kampmann, B. et C. Piekarski (1994). Calculation of the permissible length of exposure in workplaces with extreme climatic conditions according to the standard ISO 7933. Monographie.

Leveritt, Sue (2002). Heat stress in mining. Notes de cours.
<http://www.uq.edu.au/eaol/apr98/leveritt.pdf>

Lind, A.R. (1963). A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work. *J. Appl. Physiol.*, 18 :51.

Mairiaux, P. et J. Malchaire (1990). *Le travail en ambiance chaude*. Masson, Paris. ISBN : 2-225-82036-8.

Malchaire, Jacques (1999) éditeur. Evaluation and control of warm working conditions. BIOMED Heat Stress research project. Barcelona conference.

Piekarski, C. (1995). Climatic stress in coalmining in Germany: Occupational health aspects. *Ergonomics*, 38: 23-35.

Tayyari, F., C.L. Burford et J.D. Ramsey (1989). Guidelines for the use of systematic workload estimation. *International journal of industrial ergonomics*, 4: 61-65.

Les auteurs tiennent à remercier l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail (IRSST) pour le support financier et logistique.