

Aider les travailleurs à supporter les contraintes thermiques extrêmes:

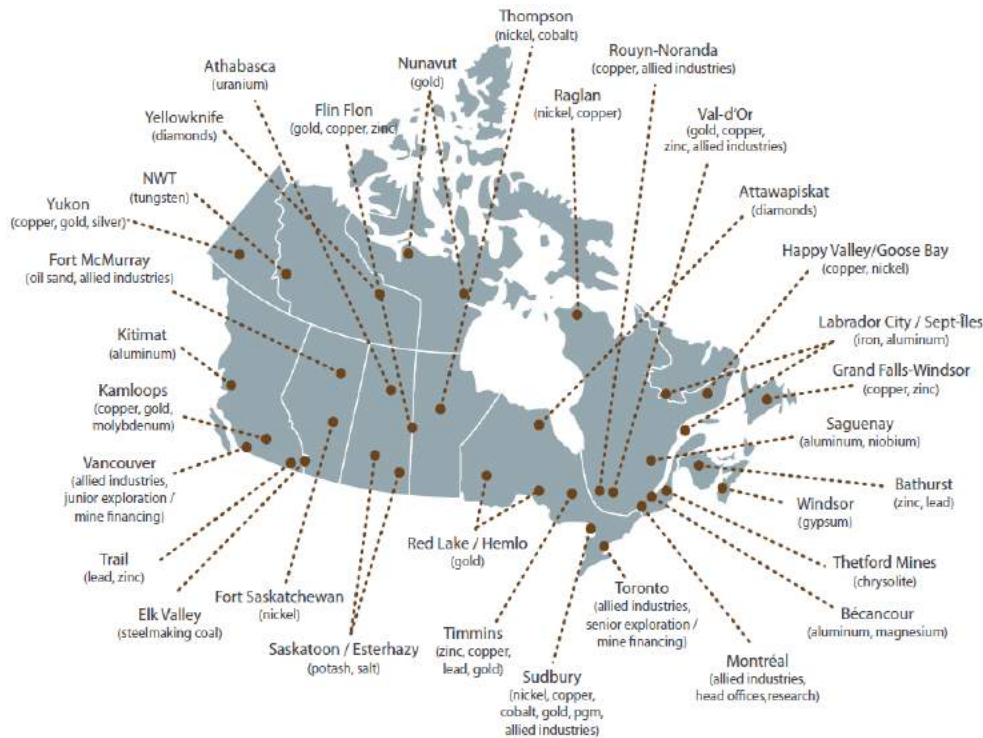
Environnement
minier

Présenté par:
Chady AL SAYED

Préparé par:

Chady Al Sayed, étudiant au doctorat; Ludwig Vinches, Ph.D. et Stéphane Hallé, Ing., Ph.D.
École de technologie supérieure (ÉTS), Montréal, Québec, Canada

Réalité mines canadiennes



Source: Natural Resources Canada

- **Plus que 375 000 travailleurs.**
(Québec: 12 907 emplois miniers en 2014).
- **Contribution produit intérieur brut du Canada:**
57 milliards de dollars canadiens au (2014).
- **Contribution-production:**
Batteries, circuits électriques, ordinateurs, production d'énergie, véhicules et pneus, etc.
- **Augmentation de l'exploitation en profondeur.**

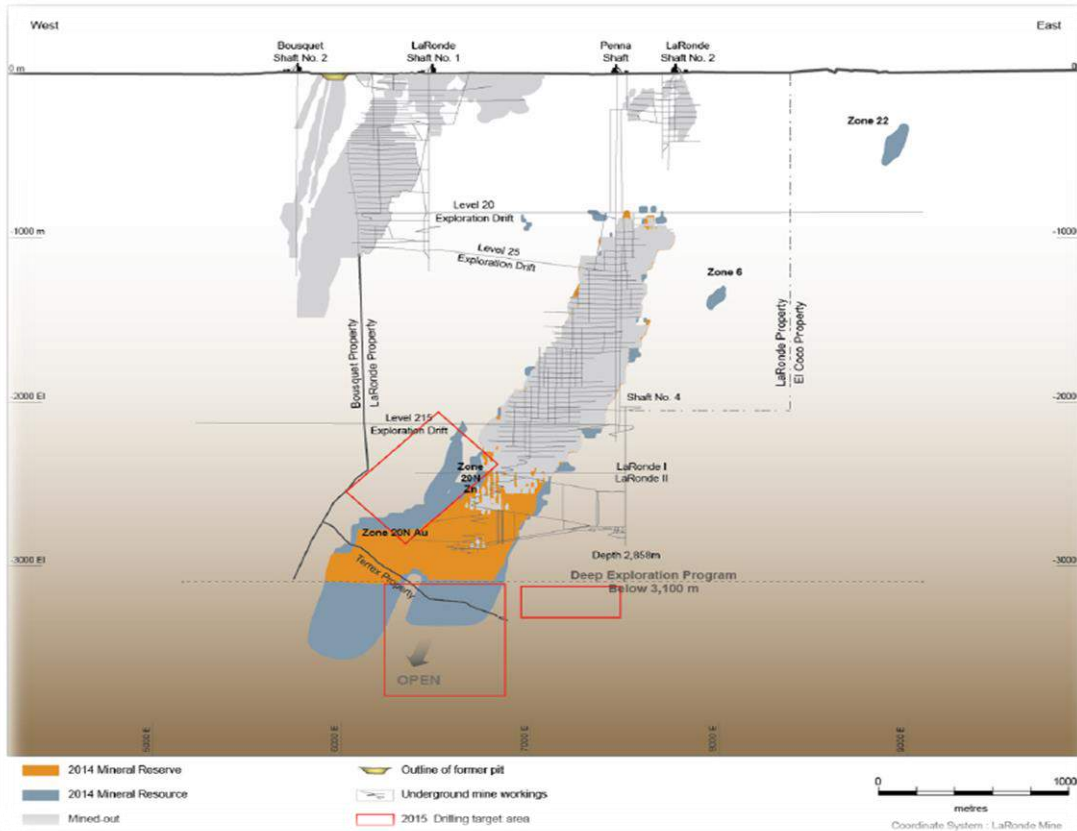
Référence: Marshall, B., *The Mining Association of Canada (MAC): Facts and Figures of the Canadian Mining Industry*. W.C.E. Associates, Editor. 2015

Environnement sévère

Mine LaRonde: Profondeur > 3100 mètres

Facteurs:

- Température des roches : 50°C.
- Auto-compression de l'air avec la profondeur ($9^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$).
- Température de l'eau souterraine.
- Explosions.
- L'usage de l'eau dans la plupart des activités.
- Equipement motorisé : Véhicules, etc.
- Appareils électriques: Compresseur, etc.



Source: AGNICO EAGLE-LaRonde Mine - Composite Longitudinal Section

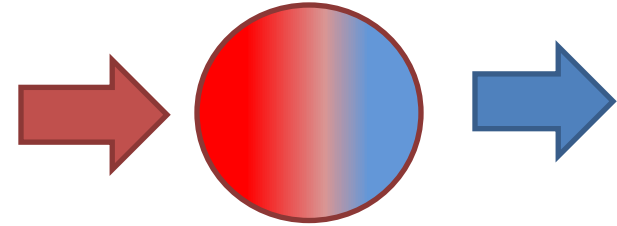
Référence: Glen P. Kenny, Matthieu Vierula, Joseph Maté, François Beaulieu, Stephen G. Hardcastle & Francis Reardon (2012): A Field Evaluation of the Physiological Demands of Miners in Canada's Deep Mechanized Mines, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9:8, 491-501

Technologies de climatisation dans les mines

Température des roches entre 31°C et 37°C



Climatisation non-artificielle



La température des roches > 37°C : Cas des mines



Climatisation artificielle



- Climatisation centrale d'air
- Climatisation par stockage du froid (glace)
- Climatisation par eau jaillissante

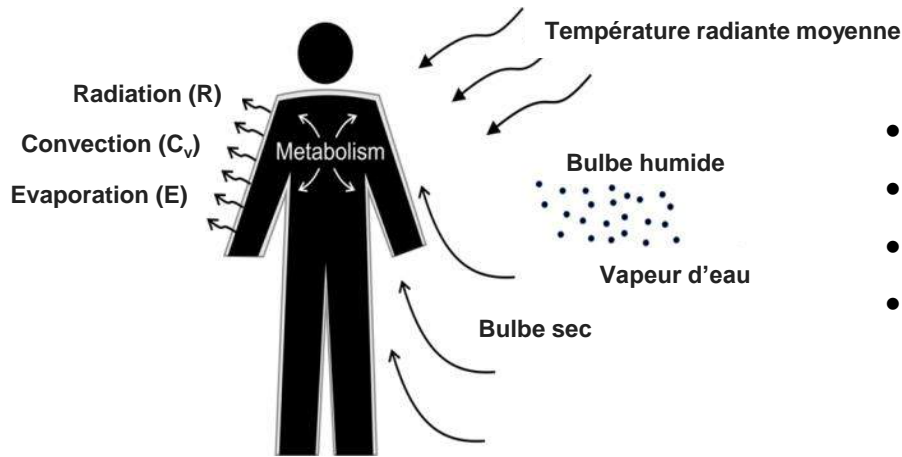
NB: Malgré l'utilisation des systèmes de ventilation et de climatisation massifs et complexes, les conditions de température et d'humidité demeurent extrêmes dans les zones de travail les plus profondes.

Mine au Canada

$T_{\text{ambiante}} = 34^{\circ}\text{C}$ HR= 100%
(Mesures prises au mois de mars 2016)

Référence: Xiaojie, Y., et al., *Progress of heat-hazard treatment in deep mines. Mining Science and Technology (China)*, 2011. 21(2): p. 295-299.

La thermorégulation humaine



- Convection (C_v)
- Radiation (R)
- Conduction (C_d): négligeable
- Evaporation (E): par transpiration
par respiration (négligeable)

Equilibre thermique

$H \pm R \pm C_d \pm C_v - E = 0$ (aucun stockage de chaleur dans le corps)

avec H : activité métabolique

H = Métabolisme de base – Puissance mécanique fournie

NB: R, C_d et C_v peuvent être aussi des sources de gain de chaleur (cas des mines),
d'où l'utilisation du symbole \pm

Référence: Misaqi, F. L., Inderberg, J. G., Blumenstein, P. D. and Naiman, T. (1976) 'Heat Stress in Hot U.S. Mines and Criteria for Standards for Mining in Hot Environments', Mining Enforcement and Safety Administration, United States Department of the Interior, MESA Report No. 1048, pp. 1-47.

La thermorégulation dans les mines profondes

La température ambiante est plus que 35°C

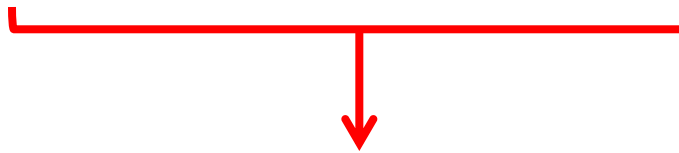


La conduction et la convection deviennent des sources de gain de chaleur

La température des roches est plus que 37°C



La radiation devient une source de gain de chaleur



$$(H + R + C_d + C_v) - E = 0$$



$$E \approx 0$$



L'humidité relative dépasse 95%

$$(H + R + C_d + C_v) - \cancel{E} \neq 0$$

Travailleur exposé au stress thermique sans aucune défense!



Stress thermique, symptômes et problématique

- Les **crampes** de chaleur se produisent après une forte perte hydrique et sont associées à la perte excessive de minéraux du corps.
- Epuisement par chaleur est caractérisé par une perte hydrique abondante, **faiblesse**, **pouls rapide**, **étourdissements**, **maux de tête** et **nausées**.
- Le **coup de chaleur** est caractérisé par une température de base au-dessus de 40°C. Lorsque la température interne du corps continue d'augmenter les vaisseaux sanguins près de la peau se dilatent et réduisent le retour du sang au cœur. Il peut conduire à la **mort**.
- La fatigue de chaleur chronique est connue pour entraîner une **diminution de la performance au travail** et **affecter le comportement social**, provoquer un **manque de motivation** et **une incapacité à se concentrer**.



Augmentation du risque d'accidents du travail

Diminution significative de la productivité

Indices de stress thermique

Température effective corrigée pour le rayonnement (TECR)

Predicted Four-Hour Sweat Rate (P4SR)

Indice de stress Thermique (IST)

ISO 7933

Indice de température au thermomètre-globe mouillé (WBGT)

Humidex

Facteurs pris en considération

Température de l'air
Température humide
Rayonnement solaire
Vitesse de l'air

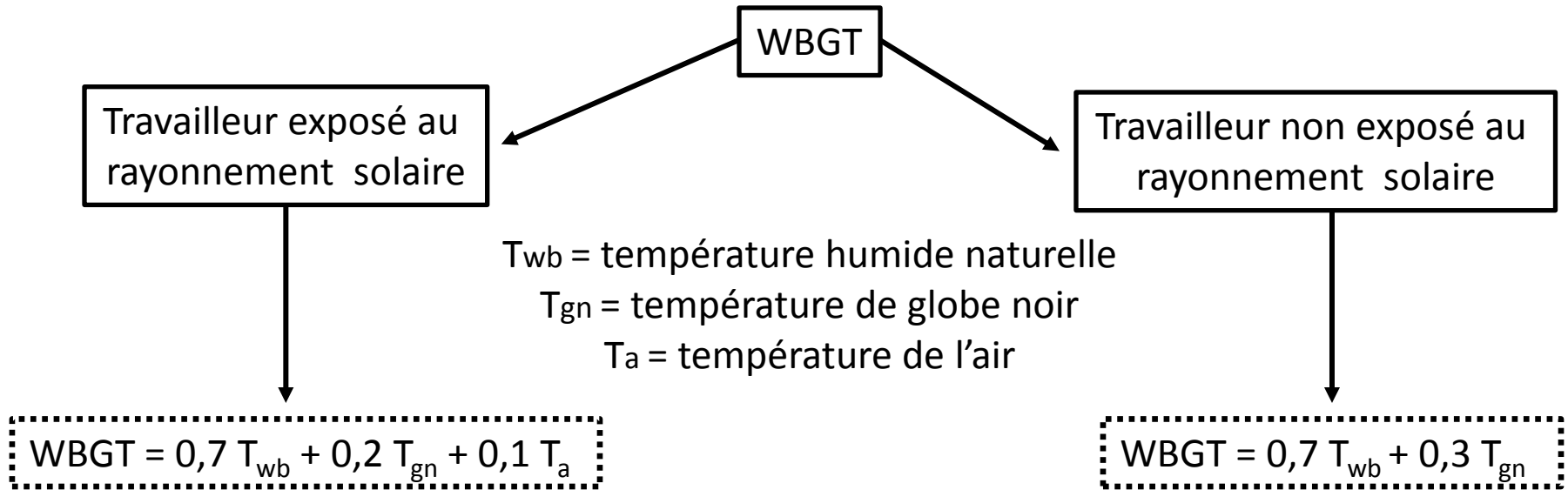
Utilisé
par le
RSST

Instrument de mesure



Source: <http://www.rps.nl/producten/heatstress-wbgt-monitor>

Calcul de l'indice WBGT



Exemple de calcul

Données:

Humidité relative = 100%

$$T_a = 34^\circ\text{C}$$

$$T_{wb} = 34^\circ\text{C}$$

$$T_a \leq T_{gn} \leq T_{\text{roches}}$$

$$T_{gn} \approx 37^\circ\text{C}$$

$$WBGT \approx 0,7 T_{wb} + 0,3 T_{gn}$$

$$WBGT \approx 0,7 \times 34^\circ\text{C} + 0,3 \times 37^\circ\text{C}$$

$$WBGT \approx 34,9^\circ\text{C}$$

Activités métaboliques des mineurs

Glen P. Kenny et al. (2012) : Surveiller et enregistrer les activités typiques que les mineurs effectuent et mesurer la dépense d'énergie métabolique et réponses thermiques pendant l'exécution de ces activités.

Environnement de travail:

$T_{\text{ambiante}} = 25,8^{\circ}\text{C}$ Humidité relative = 61% WBGT = $22,0^{\circ}\text{C}$ (sans stress thermique)

TABLE III. Mean (\pm SD) and Peak Energy Expenditure (W) and Core and Mean Skin Temperatures ($^{\circ}\text{C}$) During the Work Shift

	Conventional Mining	General Services	Manual Bolting	Manual Shotcrete	Production Drilling	Production Ore Transport
Energy expenditure (W) ^A						
Mean	220.5 (43.9)	331.5 (98.3)	290.0 (94.6)	187.4 (77.3)	271.4 (11.3)	238.7 (67.0)
Peak	295.0	512.8	529.0	276.1	279.4	297.6
Core temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^B						
Start of work shift						
Mean	37.11 (0.15)	37.14 (0.28)	36.88 (0.30)	36.79 (0.36)	36.62 (0.49)	37.13 (0.19)
Work period						
Mean	37.37 (0.16)	37.34 (0.20)	37.38 (0.33)	37.20 (0.22)	37.40 (0.07)	37.42 (0.18)
Peak	38.30	38.07	38.34	37.81	38.33	38.13
Mean skin temperature ($^{\circ}\text{C}$) ^B						
Start of work shift						
Mean	32.50 (1.18)	32.64 (0.68)	33.05 (0.60)	32.93 (0.46)	32.28 (0.50)	32.37 (0.12)
Work period						
Mean	33.67 (0.97)	33.45 (0.82)	33.18 (0.97)	33.69 (0.69)	34.49 (1.22)	34.82 (0.50)
Peak	35.61	35.66	34.99	35.81	36.36	36.16

Notes: Mean values calculated from the average values recorded for all subjects during the work shift. Peak value represents the highest average value recorded for a subject.

^ARates of energy expenditure are for work period only and do not include the work shift lunch break.

^BMean core and skin temperatures include the work shift lunch break.

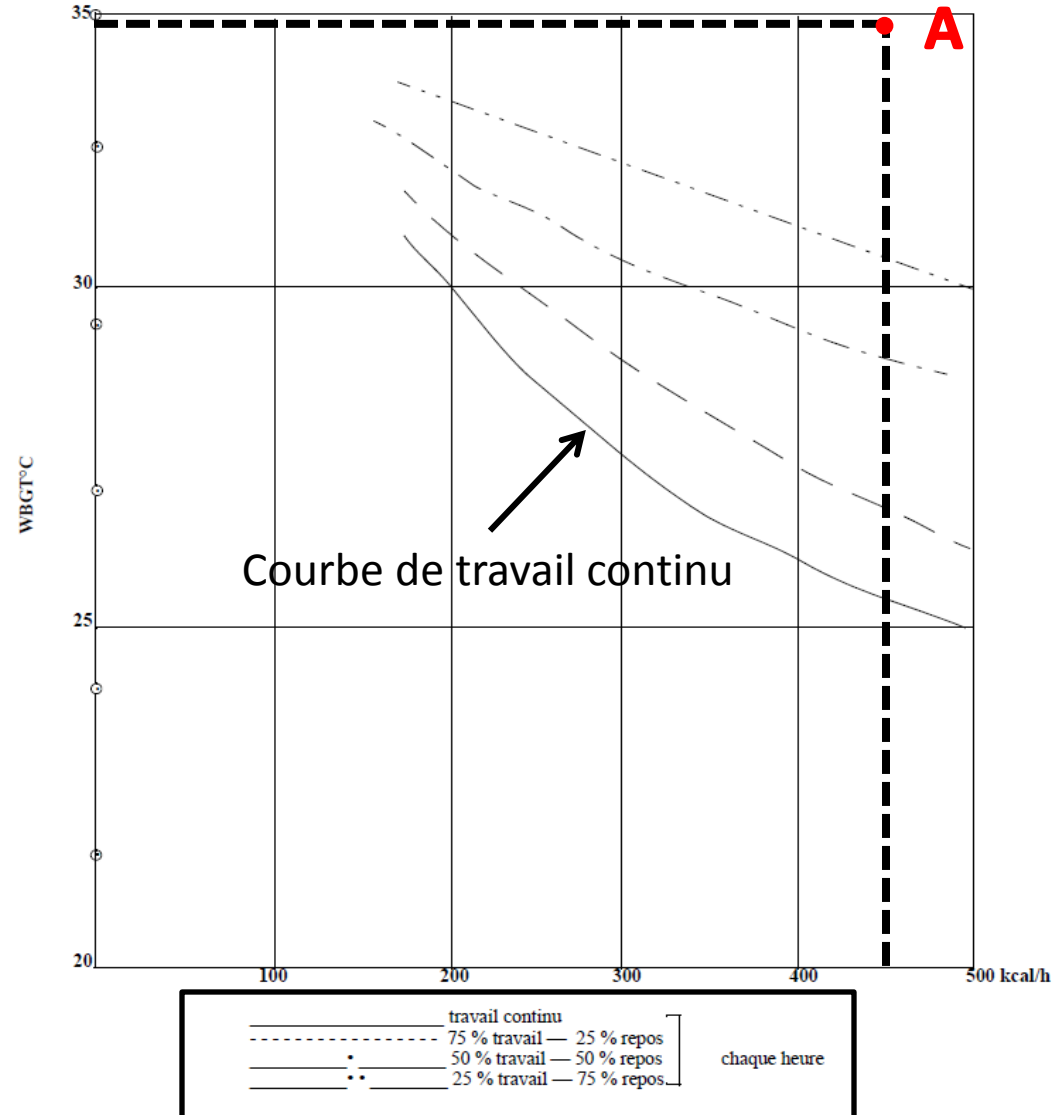
Référence: Glen P. Kenny, Matthieu Vierula, Joseph Maté, Francois Beaulieu, Stephen G. Hardcastle & Francis Reardon (2012): A Field Evaluation of the Physiological Demands of Miners in Canada's Deep Mechanized Mines, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9:8, 491-501

Que nous dit le RSST sur l'alternance travail-repos?

Exemple de calcul

- $WBGT \approx 34,9^{\circ}\text{C}$
- Activité métabolique = **529 W**
(Mesure maximale trouvée par Glen P. Kenny et al. pour un mineur qui effectue un boulonnage manuel)
- $529 \text{ W} \approx 455 \text{ kcal/h}$

État A: Le mineur est exposé à un stress thermique



Que nous dit le RSST sur l'alternance travail-repos?

Règlement sur la santé et la sécurité du travail
Loi sur la santé et la sécurité du travail
(chapitre S-2.1, a. 223)

124. Mesures particulières: Dans tout établissement où des travailleurs sont soumis à des conditions thermiques telles que l'indice de contrainte thermique dépasse la courbe de travail continu indiquée au graphique de l'annexe V, les mesures suivantes doivent être prises:

1° **réaménager le poste de travail** exposé à l'aide d'écrans réfléchissants, d'une isolation ou d'une ventilation additionnelle, **de manière à réduire l'indice de contrainte thermique** à ce poste de travail à une valeur inférieure ou égale aux valeurs de la courbe de travail continu;

2° si l'application du paragraphe 1 s'avère impossible ou ne permet pas d'atteindre la courbe de travail continu, **contrôler la charge de travail, le temps d'exposition et le temps de récupération** conformément au régime d'alternance travail et repos prévu à cette fin à l'annexe V;

3° si l'application des paragraphes 1 et 2 se révèle impossible ou ne permet pas d'atteindre les courbes indiquées au graphique de l'annexe V ou en attendant que les transformations requises selon le paragraphe 1 soient faites, **s'assurer que les travailleurs portent des équipements de protection individuels appropriés**, selon la nature de la contrainte thermique.

Vestes de refroidissement individuelles existantes

PCG



Source:
<http://www.keepshooting.com/us-steele-cooling-vest.html>

DESSICCATION



Source:
<https://www.shroomery.org/forums/show-flat.php/Number/11051388>

PASSIVES

LCG



Source:
<http://www.veskimo.com/liquid-cooled-microclimate-vest.html>

ACG



Source:
http://www.chygoing.com/Products_detail.asp?ID=362

DÉTENTE



Source:
<http://www.porticos.net/portfolio/porticool-personal-cooling-system>

HYBRIDE



Source:
<http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=49331&picture=astronaut>

ACTIVES

Description, avantages et inconvénients

Veste de refroidissement par changement de phase:

Utilise des matériaux (comme la glace, l'hydroxyde de sodium, l'acide phosphorique, etc.) qui ont la capacité d'absorber et de stocker de l'énergie thermique sous forme latente à une température bien adaptée au refroidissement personnel. Généralement, une PCG couvre le torse et possède des poches qui contiennent les paquets de matériau à changement de phase.



Source:
<http://www.keepshooting.com/us-steele-cooling-vest.html>

Avantages

- Ne nécessite aucune source d'énergie électrique pour fonctionner ce qui rend ce système de refroidissement très simple.

Inconvénients

- Efficacité trop faible.
- Nécessite un contact direct avec la peau.
- Autonomie courte (2h pour une veste de 5 kg).

Description, avantages et inconvénients

Veste de refroidissement par dessiccation à vide:

Un prototype d'une veste de refroidissement basé sur le refroidissement par dessiccation (élimination de l'eau d'un corps à un stade poussé) à vide a été testé par Yang et al. Les paquets de refroidissement de cette veste sont formés par: un récipient contenant de l'eau, un noyau d'absorption, une entretoise en forme de nids-d'abeilles, et un sac extérieur en plastique. Le prototype pesait 3,4 kg et couvrait environ 0,4 m² de surface corporelle.

DESSICCATION



Source:

<https://www.shroomery.org/forums/showflat.php/Number/11051388>

Avantages

- Ne nécessite aucune source d'énergie électrique pour fonctionner ce qui rend ce système de refroidissement très simple.
- Favorise l'évaporation de la sueur.
- Plus efficace qu'une PCG de même masse.

Inconvénients

- Nécessite un contact direct avec la peau.
- Autonomie courte liée au matériau à changement de phase.

Description, avantages et inconvénients

Veste de refroidissement par circulation d'un liquide:

Utilise un fluide caloporteur (généralement l'eau), qui circule à travers des tubes insérés dans la veste, à l'aide d'une micro-pompe alimentée par une batterie. Habituellement, ces tubes sont en chlorure de polyvinyle (PVC).



Source:
<http://www.veskimo.com/liquid-cooled-microclimate-vest.html>

Avantages

- Améliore la performance des travailleurs et diminue la contrainte thermique.

Inconvénients

- Lourde.
- Nécessite un contact direct avec la peau.
- Si l'activité métabolique diminue, le travailleur sera face à une perte de chaleur indésirable du corps et à un inconfort thermique.
- Dans un environnement humide, si le liquide circule dans l'espace entre la peau et l'équipement de protection individuel, de la vapeur peut se condenser sur la peau puis provoquer des brûlures.

Description, avantages et inconvénients

Veste de refroidissement par circulation d'air:

Elle contient deux couches, où l'extérieur est imperméable à l'air ambiant, et la deuxième, perméable à l'air, est en contact direct avec la peau. L'air est soufflé entre les deux couches puis quitte la veste à travers la couche intérieure vers la peau. Le principal mode du refroidissement d'une ACG est par évaporation de la sueur du corps .



ACG

Source:

http://www.chygoing.com/Products_detail.asp?ID=362

Avantages

- Masse petite.
- Conserve les vêtements secs.
- Élimine le risque de refroidissement excessif.
- Grande autonomie(12H).

Inconvénients

- Diminution de l'efficacité de refroidissement lorsque l'air ambiant est saturé ou à un niveau d'humidité élevé.

Description, avantages et inconvénients

Veste de refroidissement par détente de CO₂:

Le refroidissement de cette veste est basé sur la vaporisation endothermique du dioxyde de carbone liquéfié (CO₂). Le CO₂ à haute pression se diffuse à travers une vanne d'expansion où sa pression chute à la pression ambiante. Durant cette évolution thermodynamique, le CO₂ liquide se transforme en un gaz et absorbe une énergie thermique égale à celle de sa vaporisation.

DÉTENTE



Source:
<http://www.porticos.net/portfolio/porticoool-personal-cooling-system>

Avantages

- Masse ne dépassant pas 1,4 kg.

PORTICOOL Personal Cooling System

<http://www.porticos.net/portfolio/porticoool-personal-cooling-system>

Inconvénients

- Autonomie trop courte.
- Dégagement de CO₂.

Description, avantages et inconvénients

Vestes de refroidissement hybrides:

Les vestes de refroidissement hybrides combinent plusieurs techniques de refroidissement dans un système fonctionnel comme la combinaison Air-PCM, PCM-Liquide ou Air-Liquide. Le type le plus connu est la veste hybride Air-Liquide utilisée par l'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) pour les activités extravéhiculaires dans l'espace.

HYBRIDES



Source:

<http://www.publicdomainpictures.net/view-image.php?image=49331&picture=astronaut>

Avantages

- Plus efficaces que les vestes traditionnelles fonctionnant sous une technologie de refroidissement.

Inconvénients

- Volumineuses.

Inconvénients supplémentaires dans l'environnement minier

**Transpiration du mineur
atteint facilement
2 litres /heure**

- PCG et LCG: Efficacité de refroidissement diminue énormément.
- Dessiccation: Transfert thermique inefficace (matière absorbante d'humidité saturée rapidement).

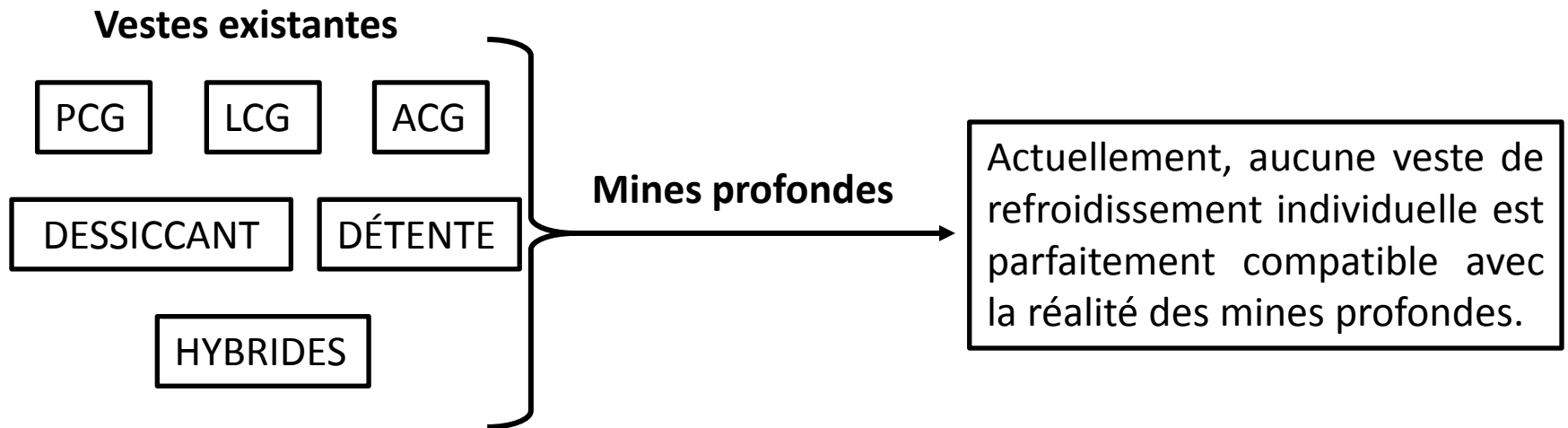
**L'humidité relative dépasse
95% dans les mines
profondes**

- Vestes de refroidissement qui favorisent l'évaporation de la sueur moins efficaces: ACG et détente de CO₂.

**La température ambiante
atteint facilement
34 °C :**

- Gain de la chaleur de l'extérieur, ce qui réduit la capacité de refroidissement : PCG, LCG et dessiccation.
- Dans une ACG, l'air injecté sur le corps sera chaud et perd sa capacité de refroidissement sensible.

Compatibilités des vestes de refroidissement avec le secteur minier



Solutions possibles:

- Investir dans autres technologies de refroidissement

Thermoélectrique
Magnétocalorique
Thermoacoustique
Absorption/adsorption
Compression mécanique

- Etudier de nouvelles combinaisons de technologies

Thermoélectrique + Air
Air + Dessiccation
Liquide + Détente
Etc.

Facteurs à prendre en considération lors du développement d'une veste de refroidissement individuelle compatible aux mines profondes

- La **température ambiante** dépassant celle de la peau humaine.
- L'**humidité relative** trop élevée.
- La **compatibilité** avec les équipements de protection déjà portés par les mineurs.
- L'**acceptation** des mineurs.
- Les **tâches** effectuées par le mineur et son **activité métabolique**.
- Les **lois** et les **règlements** concernant la santé et la sécurité dans les mines.
- L'**autonomie** du système de refroidissement.
- L'**efficacité** du système de refroidissement.
- La **masse** de la veste de refroidissement.
- Le **coût** de la veste de refroidissement.

Retombés du développement d'une veste de refroidissement individuelle adaptée au travail en mines profondes

- Le développement de cette veste de refroidissement individuelle va tout d'abord **améliorer** de façon significative le **confort thermique** des travailleurs en mines profondes.
- Elle permettra aussi de **minimiser les risques** pour la santé et la sécurité des mineurs exposés à des conditions de travail extrêmes.
- D'un point de vue économique, le port de cette veste de refroidissement permettra une **diminution des temps de repos** des mineurs, ce qui **augmentera la productivité** et la **compétitivité** de ce secteur important de l'économie québécoise.
- Le secteur minier n'est pas le seul secteur d'activité qui pourra profiter du développement de cette veste de refroidissement individuelle. En effet, les travailleurs œuvrant dans le secteur métallurgique, la construction, l'horticulture en serre, les services d'urgence, etc. pourront à plus long terme, **bénéficier de cette technologie avancée**.

Remerciements



**Les auteurs tiennent à remercier les Fonds de Recherche du Québec -
Nature et Technologies (FRQNT) pour leur contribution financière
à ce projet.**

Merci pour votre écoute

Questions ?