

Détermination des critères ergonomiques de conception et de performance d'une veste de refroidissement adaptée au travail en mines profondes

par

Valérie Tuyêt Mai NGÔ

MÉMOIRE PAR ARTICLE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DE LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DES RISQUES EN
SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 26 OCTOBRE 2017

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stéphane Hallé, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. James Lapalme, président du jury
Département du génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 SEPTEMBRE 2017

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire n'aurait pu être possible sans le support inconditionnel de certaines personnes.

Je voudrais d'abord remercier ma directrice et mon co-directeur, Madame Sylvie Nadeau et Monsieur Stéphane Hallé, pour leur disponibilité, leur patience ainsi que tous les conseils et encouragements prodigués pendant la durée de ma maîtrise. Grâce à eux, j'ai pu acquérir de nombreuses connaissances qui me seront utiles dans ma carrière professionnelle. Ils ont aussi su me transmettre leur amour de l'enseignement et leur passion pour la recherche.

Je souhaite souligner l'appui financier de plusieurs organismes sous forme de bourses au mérite et de subventions, et remercier le Fonds de recherche du Québec — Nature et technologies (FRQNT), l'Équipe de recherche en sécurité du travail (ÉREST) de l'École de technologie supérieure et la Fondation de l'Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail (AQHSST).

J'adresse de sincères remerciements à la mine d'Abitibi-Témiscamingue et au personnel sans lesquels ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Merci aussi à Servet Günebak et Sébastien Coutu pour leur soutien moral et à Ludwig Vinches, qui m'a fait rire et transmis sa passion pour la recherche. Enfin, merci à ma famille et particulièrement à mon conjoint Jonathan Lavoie pour leurs précieux encouragements.

DÉTERMINATION DES CRITÈRES ERGONOMIQUES DE CONCEPTION ET DE PERFORMANCE D'UNE VESTE DE REFROIDISSEMENT ADAPTÉE AU TRAVAIL EN MINES PROFONDES

Valérie Tuyêt Mai NGÔ

RÉSUMÉ

L'épuisement du minerai précieux en surface fait en sorte que les sociétés minières poursuivent l'exploitation des gisements à plus de 2,5 km sous terre. À cette profondeur, la température peut s'élever à 40 °C et l'humidité dans les 80 % ce qui peut poser un danger pour la santé et la sécurité des travailleurs. La solution actuelle à cette chaleur repose dans la climatisation et la ventilation générale des galeries.

L'option d'une veste refroidissante serait une méthode plus fiable pour abaisser la contrainte thermique directe du mineur. Au meilleur de notre connaissance, présentement, aucune solution présente sur le marché n'est adaptée aux conditions de travail des mineurs.

Dans le but d'élaborer une solution adaptée, une revue de littérature a été réalisée sur les exigences et les contraintes des mines profondes ainsi que sur les critères de conception d'équipements de protection individuelle. Une étude de terrain a été effectuée pour s'enquérir de la réceptivité des mineurs pour un nouvel équipement de protection individuelle et recueillir l'information manquante à la revue de littérature.

Les résultats de la recherche ont permis de générer une matrice des critères de conception ergonomiques pour les vestes refroidissantes destinées aux mines profondes.

Bien que l'élaboration de la matrice ait été limitée à l'environnement minier ultra-profond, la méthode de conception de la matrice pourrait être utilisée dans d'autres environnements de travail. De plus, la mise en application de la matrice pourrait éventuellement être étendue à des milieux de travail similaires.

Mots-clés : veste refroidissante, critères ergonomiques, mines profondes, santé et sécurité du travail, équipement de protection individuelle

ERGONOMIC CRITERIA DETERMINATION TO DESIGN A COOLING VEST ADAPTED TO WORK IN DEEP MINING ENVIRONMENT

Valérie Tuyêt Mai NGÔ

ABSTRACT

The depletion of precious ore on the surface ensures that mining companies continue mining more than 2.5 km underground. At this depth, the temperature can rise to 40 °C and the humidity in the 80 %, which can represent a danger for the health and safety of the workers. The current solution to this heat lies in the air conditioning and general ventilation of the galleries.

The option of a cooling vest would be a more reliable method of lowering the direct thermal stress of the miner, but presently no solution on the market is suitable to the working environment of miners.

In order to develop a suitable solution, a literature review was carried out on the requirements and constraints of deep mines as well as on the design criteria for individual protective equipment. A field study was conducted to inquire about the receptivity of miners for new personal protective equipment and to collect missing information from the literature review.

The results of the research generated a matrix of ergonomic design criteria. This matrix will evaluate the proposed cooling vest for deep mines.

Although the development of the matrix was limited to the ultra-deep mining environment, the design method of the matrix could be applied to other working environments. In addition, implementation of the matrix could potentially be extended to similar workplaces.

Keywords: cold vest, ergonomic criteria, deep mines, occupational health and safety, personal protective equipment

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
 CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	 5
1.1 Contraintes et exigences du travail en mine profonde et ultra-profonde	5
1.1.1 Définitions	6
1.1.2 Lois et règlements au Québec	7
1.1.3 Équipements de protection individuelle	7
1.1.4 Règles des compagnies minières	8
1.1.5 Durée du quart de travail et temps effectif de travail	9
1.1.6 Facteurs environnementaux	10
1.1.7 Chaleur	11
1.1.8 Humidité	14
1.1.9 Pression barométrique	14
1.1.10 Bruit et vibrations	15
1.1.11 Poussières et boue	15
1.1.12 Diesel et autres gaz	15
1.2 Exigences	16
1.2.1 Hommes et femmes	16
1.2.2 Force	16
1.3 Critères de conception d'un équipement de protection individuelle	17
1.4 Question de recherche	19
 CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	 21
2.1 Démarche méthodologique du mémoire	21
2.1.1 Comité d'éthique de la recherche	23
2.2 Étude de terrain	23
2.2.1 Taille et type d'échantillon	24
2.2.2 Durée	24
2.2.3 Lieu (Abitibi-Témiscamingue)	24
2.2.4 Entrevues semi-dirigées	25
2.2.5 Observation directe du travail	26
2.2.6 Mesures des conditions environnementales	26
2.3 Outils utilisés pour traiter les données	27
2.3.1 Entrevues semi-dirigées	27

CHAPITRE 3	ERGONOMIC CRITERIA FOR THE DESIGN OF A COOLING VEST IN DEEP AND ULTRA DEEP MINING ENVIRONMENTS	28
3.1	Introduction	29
3.2	Background	29
3.3	Research problem	31
3.4	Methodology	31
3.5	Results	33
3.5.1	Miners' Receptivity Towards a New PPE	33
3.5.2	Population	33
3.5.3	Occupation	35
3.5.4	Shift and Break Times	36
3.5.5	General Work Environment	36
3.5.6	Personal Protective Equipment	36
3.5.7	Impact on the Worker's Body	37
3.5.8	Concerns About a New PPE	39
3.5.9	Additional Criteria Established by Normal PPE Development Literature	40
3.6	Final Matrix Setup	41
3.7	Discussion	45
3.7.1	Limited Number of Participants and Time Constraints	45
3.7.2	Population	46
3.7.3	Variability of Working Environment Conditions	46
3.7.4	Price of Equipment	48
3.7.5	Impacts on the Worker's Body	48
3.8	Conclusion and Future Research	48
3.9	Acknowledgments	49
CHAPITRE 4	OBSERVATIONS DU MILIEU DE TRAVAIL	51
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		57
ANNEXE I	LISTE DES PUBLICATIONS	59
ANNEXE II	ARTICLE DE CONFÉRENCE AHFE 2016	61
ANNEXE III	AFFICHE AQHSST	77
ANNEXE IV	POWER POINT MIDI-ÉREST	79
ANNEXE V	APPROBATION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE À LA RECHERCHE	99

ANNEXE VI	QUESTIONNAIRE ENTREVUES SEMI-DIRIGÉES	101
ANNEXE VII	GRILLE D'OBSERVATION DES TRAVAILLEURS	107
ANNEXE VIII	GRILLE DE MESURE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES	111
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		113

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Masse approximative des équipements de protection des mineurs.....8
Tableau 1.2	Facteurs environnementaux dans la mine10
Tableau 1.3	Force et position requises pour certaines tâches de mineurs17
Tableau 1.4	Critères de conception proposés par la littérature.....18
Tableau 3.1	Summary of Different Measures of the Participants.....34
Tableau 3.2	List of PPE of a Mine in Quebec, Canada37
Tableau 3.3	Final Design Matrix of a Personal Cooling Vest Suited to Deep Mining Conditions42
Tableau 3.4	Heat and Humidity at Various Depths in a Mine.....47
Tableau 4.1	Activités détaillées54
Tableau-A II-1	Approximate weight of protective equipment based on information found on DBI-Sala website and the MIHRC65
Tableau-A II-2	Environmental factors in the mines66
Tableau-A II-3	Mining tasks strength and positional requirements.71

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Apport des sources de chaleur à 3 km sous terre	12
Figure 1.2 Carte conceptuelle des critères de conception d'un ÉPI selon la littérature	19
Figure 2.1 Démarche méthodologique du mémoire	22
Figure 3.1 Weight Distribution of the Participants	34
Figure 3.2 Height Distribution of the Participants	35
Figure 3.3 Areas at Risk of Getting Hit or Snagged	39
Figure 3.4 Concerns Raised by the Participants	40
Figure 4.1 Type de travail effectué par les mineurs	53
Figure-A II-1 Proportion of heat sources by percentage at 3 km underground.....	67

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Air climatisé (<i>Air Conditioning</i>)
AHFE	<i>Applied Human Factors and Ergonomics</i>
AMC	L'association minière du Canada (<i>The Mining Association of Canada</i>)
ASP Mines	Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier du Québec
CIRC	Agence Internationale pour la Recherche sur le Cancer
CMJ	<i>Canadian Mining Journal</i>
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail du Québec
CNRC	Conseil national de recherches du Canada (<i>National Research Council Canada</i>)
CSA	Association canadienne de normalisation
ÉPI	Équipement de protection individuelle
EPTC2	Énoncé de la politique des trois Conseils : Éthique de la recherche avec des êtres humains
ÉREST	Équipe de recherche en sécurité du travail
ÉTS	École de technologie supérieure
FRQNT	Fonds de recherche du Québec : Nature et technologies
HFESA	<i>Human Factors and Ergonomics Society of Australia</i>
INRS	Institut national de recherche et de sécurité de France
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail
ISO	Organisation internationale de normalisation (<i>International Organization for Standardization</i>)
ISO 7933	Ergonomie des ambiances thermiques

LSST	Loi sur la santé et la sécurité du travail
NIOSH	<i>The National Institute for Occupational Safety and Health</i>
OMS	Organisation mondiale pour la santé
OQLF	Office québécois de la langue française
RHIM	Conseil des ressources humaines de l'industrie minière du Canada
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
RSSM	Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines
SWE	<i>Systematic Workload Estimation</i>
VDV	Valeur de dose vibratoire
WBGT	Température au thermomètre-globe humide (<i>Wet Bulb Globe Temperature</i>)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS GÉOMÉTRIQUE

Longueur

m mètre

pi pied

po pouce

UNITÉS DE MASSE

kg kilogramme

lb livre

UNITÉ CALORIFIQUE

°C degré Celsius

Kcal Kilocalorie

UNITÉS D'INTENSITÉ DU SON

dBA décibel avec pondération A

INTRODUCTION

Lorsqu'un minéral précieux comme l'or est épuisé aux profondeurs d'exploitation usuelles, deux choix s'offrent aux sociétés minières : continuer l'extraction à de plus grandes profondeurs ou établir une mine sur un autre site en espérant trouver d'autres gisements plus accessibles. Le coût et les risques qu'entraînent l'implantation d'une autre mine poussent les minières à explorer et à continuer d'exploiter des gisements à des profondeurs supérieures à 2,5 km (Nadeau et al., 2013; Wagner, 2013).

Ces exploitations, qu'on appelle mines ultra-profondes, obligent les mineurs à faire face à de nouveaux défis en santé et sécurité du travail (SST), principalement en raison des températures extrêmes qui y règnent. La température augmente en fonction de la profondeur et pourrait éventuellement dépasser les 40 °C (Kenny et al., 2012). Combinée à l'humidité excédant 80 %, cette chaleur a pour effet de placer les mineurs en situation de contrainte thermique sévère.

La ventilation et la climatisation peuvent, à elles deux, régler une partie de la problématique, mais les coûts qu'elles entraînent augmentent de façon significative sous les 2 km. Une société minière peut dépenser, uniquement en ventilation et en climatisation, jusqu'à 40 % de sa consommation annuelle d'électricité (Schutte, Kleingeld et Van der Zee, 2014). De plus, les systèmes sont complexes et exigent un suivi rigoureux des débits et températures de soufflage à chaque niveau de la mine. Ce constat incite les minières à chercher d'autres options de refroidissement qui seraient plus économiques et plus simples à mettre en œuvre.

L'option d'une veste de refroidissement est très intéressante, puisqu'elle permettrait de réduire l'astreinte thermique du mineur et d'éviter qu'il se retrouve dans une situation mettant en danger sa santé et sa sécurité. Cependant, il appert qu'il n'est pas possible de transposer directement des technologies existantes dans le milieu spécifique des mines profondes et ultra-profondes. La température et l'humidité rendent inefficace le refroidissement par l'air ou le liquide, l'autonomie de d'autres vestes est trop courte ou la

veste, pouvant peser jusqu'à 4 kg dans le cas d'une veste à changement de phase, est trop lourde (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2016). Par conséquent, il est nécessaire de mettre au point d'une nouvelle technologie ou d'adapter des technologies existantes à l'environnement minier. Cette technologie de refroidissement, qu'elle soit nouvelle ou non, devra répondre aux besoins particuliers des mineurs.

Le présent mémoire est une étude exploratoire, qui vise d'abord à déterminer les contraintes et les exigences auxquelles les mineurs font face dans un environnement de mine profonde et ultra-profonde. Nous voulons aussi découvrir les critères à prendre en compte pour mettre au point un équipement de protection individuelle. Cette information se trouve dans le premier chapitre, la revue de littérature. Le deuxième objectif consiste à déterminer si les mineurs sont réceptifs à l'idée d'une nouvelle technologie, ainsi qu'à recueillir des renseignements complémentaires à la revue de littérature. Pour obtenir cette information, une étude de terrain a été réalisée dans une mine en Abitibi-Témiscamingue, Québec, Canada. En dernier lieu, il s'agit de déterminer les critères de conception à prendre en compte pour évaluer toute veste de refroidissement qui serait proposée pour les mines profondes et ultra-profondes (Ngô et al., 2016).

Les résultats de recherche du mémoire ont été soumis dans un article de revue avec comité de lecture (CHAPITRE 3) et seront présentés à l'ICOH en 2018 à Dublin en Irlande. De plus, l'état de l'art a fait l'objet d'une conférence scientifique sans comité de pair (ANNEXE IV), d'une affiche (ANNEXE III) et d'un article de conférence publié et présenté à la 7^e conférence d'Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE) à Orlando en Floride en 2016 (Ngô et al., 2016).

Le premier chapitre présente la revue de littérature sur les contraintes et les exigences du travail en mines profondes et ultra-profondes. Le deuxième porte sur la méthodologie utilisée pour traiter les données recueillies par la revue de littérature et l'étude de terrain. Le chapitre 3 est composé de l'article soumis à la revue *Occupational Ergonomics*. Les résultats de notre étude et la discussion de ceux-ci y seront présentés. Le chapitre 4 portera sur des

observations préliminaires du travail de mineur fait en simultanée lors de la prise de données dans la mine. Enfin, une conclusion synthétisera les résultats et les recommandations pour la suite du projet global et la mise en application dans d'autres domaines.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature comporte deux sections. La première section porte sur les contraintes et exigences du travail en mine profonde et vise à déterminer les conditions de travail dans lesquelles une veste de refroidissement sera fortement recommandée. La section suivante met l'accent sur les équipements de protection individuelle et a pour objectif d'établir les critères à considérer pour la conception d'un équipement de protection individuelle (ÉPI).

1.1 Contraintes et exigences du travail en mine profonde et ultra-profonde

Cette revue a été effectuée dans plusieurs bases de données interdisciplinaires (Scopus, Compendex/Inspec); dans des librairies canadiennes (Nelligan, BiblioÉTS), sur des sites internet canadiens (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail [IRSST], Commission des normes, de l'équité et de la santé et la sécurité du travail [CNESST], Conseil national de recherche du Canada [CNRC], l'association minière du Canada [AMC], *Canadian Mining Journal* [CMJ] et l'association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier [ASPM]) et des sites internet d'autres pays : Chamber of mines of South Africa, l'Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS) de France et le Human Factors & Ergonomics Society of Australia (HFESA).

Les articles ou rapports de revue et de conférence évalués par les pairs, portant sur les mines métallifères ont été privilégiés, puisque les mines les plus profondes du Québec sont des mines d'or. Les documents pouvaient être en français ou en anglais et la liste de mots clés utilisés a été traduite dans les deux langues. La plage d'années consultée allait de 1995 à 2017 en raison du début de l'exploitation à de plus grandes profondeurs qui a gagné en popularité au Québec dans la dernière décennie (Boudreau-Trudel, 2014). Les mots clés étaient les suivants : « mines », « mines profondes », « mines ultra-profondes », «

contrainte », « environnement de travail », « mineur souterrain », « travail », « exigence », « acclimatation », « sécurité », « vibration » et « mineur ».

1.1.1 Définitions

Afin de mieux cerner notre sujet de recherche, il était essentiel de préciser les définitions des termes « contrainte », « astreinte » et « exigence ».

1.1.1.1 Contrainte et astreinte

Dans son travail, Sperandio (1984) définit la contrainte comme l'« ensemble des exigences de travail relatives à un poste donné, dans des conditions de travail données. Elle ne dépend aucunement des caractéristiques des opérateurs ». L'astreinte, toujours selon Sperandio, est « l'ensemble des conséquences de la contrainte sur l'opérateur ».

Par conséquent, bien que des travailleurs soient en situation de contrainte thermique, cela n'implique pas un effet direct d'astreinte sur le travailleur. De ce fait, un mineur peut travailler dans un milieu chaud et humide sans être inconfortable, s'il est acclimaté. Une contrainte serait donc associée davantage à l'environnement de travail. Une astreinte, quant à elle, serait l'impact physiologique ou psychologique sur le travailleur.

Dans le cadre de la revue de littérature, cette notion est importante, puisqu'une veste de refroidissement jouera un rôle local et ainsi, influencera l'astreinte du mineur, dans des contraintes de travail.

1.1.1.2 Exigences

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) définit ainsi une exigence : « besoin ou attente formulés, habituellement implicites, ou imposés. » (Organisation internationale de normalisation, 2000). Par exemple, lorsque l'on confie une liste de tâches à un travailleur et

que celui-ci doit les accomplir dans un certain délai. Comparativement à une contrainte, qui est obligatoire, une exigence peut être parfois modifiée afin de permettre d'améliorer les conditions de travail.

1.1.2 Lois et règlements au Québec

La réglementation joue un rôle important dans les obligations du travailleur et de l'employeur en matière de santé et de sécurité du travail. Au Québec, les mines métallifères sont assujetties à deux lois : la Loi sur les mines (LSM), qui régit la prospection, les réclamations et d'autres informations, et la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST), qui couvre les aspects plus généraux de la santé et de la sécurité. Le règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) et le règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM) découlent de cette dernière (Gouvernement du Québec, 2015a; 2015b).

Chacune des lois apporte son lot d'obligations légales, mais dans le cadre de cette recherche, nous avons ciblé surtout les sections sur la contrainte thermique ainsi que les équipements de protection individuelle. La section suivante traitera davantage de ce sujet.

1.1.3 Équipements de protection individuelle

Le RSSM répertorie les équipements de protection obligatoires qu'un mineur doit porter au travail.

Ceci comprend :

- un harnais de sécurité;
- un casque de sécurité équipé de différents accessoires (coquilles, lampe frontale, radio);
- des chaussures de protection ou des bottes équipées d'un protecteur métatarsien;
- un appareil de protection respiratoire (si le mineur exploite une machine d'excavation, par exemple);
- des lunettes de protection.

Selon le Conseil des ressources humaines de l'industrie minière du Canada (RHIM), les mineurs doivent aussi porter une combinaison avec des marques réfléchissantes, un protecteur auditif et des gants (Mining Industry Human Resources Council, 2009). Kenny et al. (2012) estiment à 8,5 kg la masse totale de la combinaison et de l'équipement de protection suivant : casque avec coquilles, lumière frontale avec la batterie, ceinture de sécurité, lunettes de protection, gants de travail et bottes de sécurité de protection en PVC. La masse approximative des équipements de protection les plus couramment utilisés est présentée dans le tableau suivant, elles ont été calculées par pesée d'équipements déjà disponibles et en vérifiant les fiches techniques de plusieurs fabricants d'équipement de protection (DBI Sala, Honeywell Safety Products, etc.).

Tableau 1.1 Masse approximative des équipements de protection des mineurs

Équipement	Masse approximative
Harnais de sécurité	3,0 kg
Ceinture de sécurité	3,0 à 8,0 kg
Casque de sécurité avec accessoires	0,5 à 1,5 kg
Chaussures de protection (ou bottes)	2,0 à 4,5 kg
Appareil de protection respiratoire	0,017 (masque N95) à 25 kg (appareil autonome)
Lunettes de protection	0,046 kg
Gants	0,1 kg
Couvre-tout	0,176 kg

1.1.4 Règles des compagnies minières

Les lois et règlements du Québec indiquent le minimum auquel les sociétés minières doivent obligatoirement se conformer. Les règles propres aux différentes sociétés minières ne peuvent pas être moins sévères que la réglementation en vigueur. Hélas, il est impossible de les énumérer toutes, considérant qu'elles diffèrent selon le pays et l'entreprise.

1.1.5 Durée du quart de travail et temps effectif de travail

L'Office québécois de la langue française (OQLF) donne au quart de travail la définition suivante : « division de la journée de travail dans une organisation dont l'activité est répartie en deux ou en trois périodes successives au cours d'une journée. » Nous définissons le temps effectif de travail comme étant le temps de travail physique consacré aux tâches spécifiques des mineurs. Il ne comprend pas le temps de déplacement (souvent d'un bâtiment principal à la mine, puis de la surface jusqu'au niveau souterrain), le temps de repas, ni les micro-pauses (étirements, hydratation, etc.). Il est important de connaître le temps effectif de travail, car c'est durant ce temps que la veste refroidissante devrait être en fonction. La différence entre le quart de travail et le temps effectif de travail est significative dans le domaine de l'exploitation minière.

Le quart de travail des mineurs s'étend de 8 à 12 heures (Abrahamsson et al., 2014; Brake et Bates, 2001; Kenny et al., 2012; Mining Industry Human Resources Council, 2009; Peetz, Murray et Muurlink, 2012). Cependant, lorsque les mineurs sont exposés à des degrés de chaleur plus élevés, leur temps de travail effectif diminue en conséquence par rapport à leur quart de travail, en raison de la réglementation en vigueur. Cette problématique sera abordée à la section 1.1.7 .

L'autorégulation du rythme de travail influe aussi sur le temps effectif de travail. Elle est utilisée par les mineurs pour minimiser ou éviter la fatigue physique durant leur quart de travail (Miller et al., 2011). Selon Xiang et al. (2013) cette stratégie a permis de réduire la contrainte thermique dans les secteurs de la construction et de l'exploitation minière en Australie, en Allemagne et aux Émirats arabes unis. Au cours de leur étude de cas sur les demandes métaboliques des mineurs, Kenny et al. (2012) posent l'hypothèse que la faible différence dans la température centrale entre différents emplois des mineurs pourrait être imputable à l'autorégulation de leur rythme de travail. Certains auteurs encouragent l'autorégulation du rythme de travail (Donoghue, 2005; Kalkowsky et Kampmann, 2006), mais d'autres jugent qu'elle pourrait mettre le mineur en danger ou nuire à la productivité

lorsqu'elle est pratiquée dans des conditions où la température de globe humide est supérieure à 33,5 °C. Il semble que le travailleur voulant écourter son exposition au stress thermique augmente son rythme de travail de façon telle qu'il en résulte une hyperthermie (Brake et Bates, 2001).

1.1.6 Facteurs environnementaux

De nombreux facteurs peuvent compromettre la sécurité physique et psychologique d'un mineur dans son travail. Le tableau ci-dessous fait la synthèse des facteurs environnementaux mentionnés le plus fréquemment dans la littérature. Les facteurs susceptibles de nuire au bon fonctionnement d'une veste de refroidissement individuelle (et ses composantes) sont la température, les vibrations, l'humidité et la poussière.

Tableau 1.2 Facteurs environnementaux dans la mine

Source	Facteurs environnementaux
Maurya et al. (Tripti et al., 2015)	Contrainte thermique.
MIHRC (Mining Industry Human Resources Council, 2009)	Terrain dangereux, températures extrêmes, poussière, humidité, vapeurs ou fumées, bruit, risques électriques, outils tranchants, travail en hauteur, vibration, objet ou véhicule en mouvement, espace confiné.
You et al. (You et al., 2014)	Températures élevées, pression, humidité, bruit, gaz toxiques et dangereux.
Beaupré, S. (Beaupré, 2011)	Absence de lumière, exposition à la silice et à d'autres contaminants, poussière, changements de température abrupts, air contaminé provenant des machines ou d'explosions, humidité élevée, niveaux de bruit élevé, trous à découvert, danger d'effondrement des murs ou des plafonds.

1.1.7 Chaleur

La température d'une mine souterraine dépend de plusieurs sources de chaleur, qui peuvent être naturelles ou artificielles. La première source naturelle est la température de la roche vierge (roche intacte), également connue sous le nom de gradient géothermique, qui augmente avec la profondeur et se transfère à l'environnement par convection et radiation ou durant le transport de la roche (Wagner, 2013). Hardcastle (2006) précise dans ses travaux que la température de la roche vierge de la mine Falconbridge's Onaping Depth à une profondeur de 2400 à 2500 mètres est d'environ 45 °C. La deuxième source naturelle est l'autocompression de l'air par laquelle la température augmente en raison d'une augmentation de la pression barométrique avec la profondeur. Wagner affirme que le principe de conversion de l'énergie potentielle en enthalpie s'applique également à tout fluide. C'est pourquoi l'eau emprisonnée dans la mine ou l'eau utilisée pour le refroidissement de la mine subit une augmentation de température. Une différence de 1000 m de profondeur conduit à une hausse de température de 9,66 °C pour l'air et de 2,34 °C pour l'eau (Wagner, 2013).

Quant aux sources de chaleur artificielles, Wagner (2013) signale la contribution des moteurs thermiques (diesel, électriques et pneumatiques) ainsi que des explosifs et des travailleurs. Il existe d'autres sources de chaleur, mais elles ne contribuent qu'à 3 % à la température globale. La figure ci-dessous fait la synthèse de l'apport des différentes sources de chaleur.

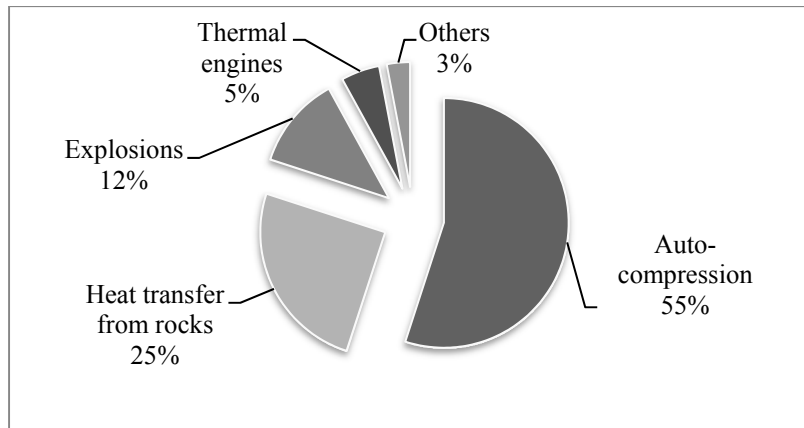


Figure 1.1 Apport des sources de chaleur à 3 km sous terre
Tiré de Ngô et al., 2016

Lorsque la chaleur augmente dans la mine, le mineur risque de se trouver en situation de contrainte thermique, ce qui peut entraîner une maladie liée à la chaleur et des dangers accrus pour sa santé et sa sécurité. Donoghue (2005) en cite quelques-uns, dont le coup de chaleur, l'épuisement par la chaleur, les crampes de chaleur et la dermatose.

Au Québec, le RSST fixe des limites concernant les périodes de travail et de repos, lorsque des travailleurs sont exposés à la chaleur (Gouvernement du Québec, 2015a), à l'aide de l'indice WBGT qui sert à évaluer la possibilité d'un coup de chaleur. Il s'agit de mesurer les conditions thermiques au moyen de trois thermomètres (globe noir, globe humide et sec) et de calculer le ratio travail–repos que le travailleur doit respecter.

1.1.7.1 Indices de contrainte thermique, normes et limites

Tripti et al. (2015) définissent le stress thermique comme l'état dans lequel le corps est incapable de dissiper l'excès de chaleur dans l'environnement.

Le meilleur indice de contrainte thermique à utiliser est sujet à débat en raison des conditions particulières auxquelles les mineurs font face à des profondeurs de plus de 2 km sous terre. Certains indices tiennent compte de paramètres différents des autres et nécessitent un équipement plus spécialisé pour la collecte des données servant à leur calcul. Il en existe au

moins 45 (Tripti et al., 2015) et d'autres continueront d'être établis en fonction des cas particuliers qui l'exigent, mais aucune n'a été développée spécifiquement pour les mines profondes.

Les lois du Québec traitent de la contrainte thermique d'après l'indice WBGT. Ce dernier est reconnu mondialement, du fait que l'ISO et le *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) l'appuient (Gouvernement du Québec, 2015a; Webber et al., 2003). Le calcul de l'indice WBGT prend en compte la température du thermomètre sec, la pression de vapeur d'eau ou de l'humidité relative, la température radiante moyenne et la vitesse de l'air. Cependant, Dessureault et Doucet (2003) soutiennent qu'en milieu minier à partir de 1,7 km de profondeur, le WBGT ne convient plus.

Webber et al. (2003) affirment que différentes conditions environnementales peuvent quand même résulter en un même WBGT à cause de la façon dont celui-ci est calculé. Cela ne résultera pas, par contre, en une même astreinte pour le mineur. Ils suggèrent plutôt la température humide comme outil pour la surveillance de routine puisque celui-ci est en corrélation avec la stress physiologique des travailleurs (Webber et al., 2003).

Dessureault et Doucet (2003) recommandent pour le secteur minier l'utilisation à la fois des indices WBGT et ISO 7933 en respectant certaines conditions comme suit : avoir le contrôle de l'acclimatation des travailleurs, utiliser les facteurs de corrélation en fonction des vêtements portés, utiliser les mesures les plus conservatrices, effectuer des suivis médicaux étroits des travailleurs, former les travailleurs sur le travail en situation de contrainte thermique et enfin, garder de l'eau potable disponible en tout temps. Dans leur dernier ouvrage sur la pertinence et l'utilisation des indices de contrainte thermique au Québec, Dessureault et al. (2014) mentionnent que la plage valide du WBGT se termine à environ 32 °C et ne reste pas cohérente lorsqu'extrapolée. ISO 7933, pour sa part, a une portée plus large qui se termine à 39,8 °C et demeure fiable lorsqu'il est extrapolé. De plus, l'indice ISO a l'avantage d'être mis à jour plus fréquemment et est soutenu scientifiquement par un organisme reconnu.

1.1.8 Humidité

Dans l'exploitation minière souterraine, l'eau peut provenir de deux sources : les eaux souterraines et l'eau de mine (Maurya et al., 2015). L'eau souterraine provient des réservoirs rocheux souterrains et peut être soit à la même température que la roche qui l'entoure, soit plus chaude. L'eau de mine provient du forage et d'autres opérations minières telles que le contrôle de la poussière. Par exemple, l'écaillage consiste à déloger les roches instables des murs avec une barre de métal appelée barre de purgeage (sondage et écaillage). Cependant, avant d'effectuer cette opération, les murs et les plafonds doivent être soigneusement lavés avec de l'eau pour enlever la poussière et mettre à nu toutes les fissures et les fragments de roche instables (Pelletier, 2015). L'évaporation de ces deux types d'eau dans l'air augmente le taux d'humidité de la mine à des niveaux qui peuvent être aussi élevés que 80 %, voire même 100 % (Dessureault et Doucet, 2003; Gouvernement du Québec, 2015a; Xiaojie et al., 2011). Des niveaux élevés d'humidité réduisent considérablement l'évacuation de chaleur excédentaire du corps par évaporation de sueur, ce qui est l'une des méthodes de refroidissement du corps humain (Dessureault et Doucet, 2003).

1.1.9 Pression barométrique

L'augmentation de la profondeur des mines entraîne une hausse de la pression barométrique. Franz et Schutte (2005) ont déterminé qu'à une profondeur de 5 km, la pression serait 66 % plus élevée que la pression normale au sol, équivalant à la pression ressentie à 7 m de profondeur dans l'eau de mer. Cette pression n'a pas d'effet sur un travailleur en bonne santé sans condition médicale préexistante (p. ex. des canaux auditifs obstrués). À plus grande profondeur, il est peu probable que la pression barométrique atteigne un niveau suffisamment élevé pour s'avérer un danger pour l'humain. Cependant, les températures à plus de 6 km seraient d'environ 75 °C, ce qui rendrait la présence humaine hautement improbable. Ces conditions sont cependant encore loin de la réalité d'aujourd'hui, puisque même la plus profonde mine d'or au monde actuellement en service est en activité à 4,1 km de profondeur et la température de la roche vierge atteint 60 °C (mine Mponeng, Afrique du Sud) (Els, 2017).

1.1.10 Bruit et vibrations

Une étude de terrain a été menée par Marcotte et al. en 2011 dans huit mines souterraines au Québec et sur 28 types d'équipements miniers. L'étude était centrée sur l'exposition de l'ensemble du corps au bruit et aux vibrations. Ils ont constaté que 10 des 28 types d'équipements dépassaient la limite d'exposition de 8 h pour la dose de vibrations (VDV), les chargeuses pneumatiques (sur rail et sur pneus) générant les plus hauts niveaux. En ce qui concerne le bruit, certains niveaux de bruit pour les mêmes chargeuses pneumatiques ainsi que le forage sur échafaudages en aluminium dépassaient 110 dBA. Marcotte et al. (2011) notent que ces types d'équipements nécessitent de l'air comprimé pour fonctionner.

1.1.11 Poussières et boue

La plupart des activités minières telles que le dynamitage et l'écaillage produisent une quantité de poussière non négligeable. Cette poussière est ensuite rabattue, généralement avec de l'eau (Pelletier, 2015). Bien que la question de la poussière et de particules dans l'air ait été soulevée, aucune information n'a été trouvée concernant la poussière et la boue dans des environnements miniers profonds et ultra-profonds.

1.1.12 Diesel et autres gaz

Les deux types de gaz généralement mentionnés dans la littérature sont le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote. La matière particulaire provenant de la combustion du diesel est un autre polluant qui retient l'attention depuis 2013, lorsque le CIRC de l'OMS l'a classée comme étant cancérigène pour l'homme (International Agency for Research on Cancer, 2016). Tous ces gaz résultent d'activités minières telles que le forage, le dynamitage et la circulation des véhicules dans les mines souterraines (Lv, Hu et Li, 2011). L'extraction des minéraux repose sur les véhicules à moteur diesel (Grenier, 2005). Le méthane est également un polluant commun et explosif que l'on trouve dans les mines de charbon. Il est présent en faible concentration dans les mines métallifères, car il résulte de la décomposition naturelle de la biomasse. Les autres polluants de l'air mentionnés dans la littérature sont

principalement appelés gaz toxiques ou dangereux, entre autres le dioxyde de soufre et le radon (Debia et al., 2017; Fourie et Sheer, 2005; Lv, Hu et Li, 2011; You et al., 2014).

1.2 Exigences

1.2.1 Hommes et femmes

L'exploitation minière est un champ d'activité surtout dominé par des travailleurs masculins (Women in Mining Canada, 2010). Quelques femmes sont recrutées, mais statistiquement en Suède, les cols bleus sont composés de 90 à 95 % d'hommes. Abrahamsson et al. (2014) affirment que ces chiffres sont similaires dans d'autres pays comme l'Inde et l'Australie. Dans un rapport de 2006 publié par Women in Mining, la représentation des femmes dans les mines et l'exploration au Canada est de 14 % d'après un recensement fait par Statistique Canada. La plupart des emplois que ces femmes occupaient alors étaient des postes culinaires ou administratifs, et seulement 4 % travaillaient comme mineurs de surface ou de fond (Women in Mining Canada, 2010).

1.2.2 Force

Les activités minières varient en fonction de la spécialité de chaque mineur. Des mouvements tels que ceux de soulever et abaisser, de transporter, et de tirer et pousser nécessiteront une certaine force physique (Mining Industry Human Resources Council, 2009). Le Tableau 1.3 fait la synthèse de la force et la position nécessaires à plusieurs activités minières selon le rapport du Conseil des ressources humaines de l'industrie minière du Canada.

Tableau 1.3 Force et position requises pour certaines tâches de mineurs

Tâches	Soulever et abaisser (kgf)	Transporter (kgf)	Pousser et tirer (kgf)
Communiquer	< 0,5 à 8	1,5 à 2	4 à 22
Se préparer au travail souterrain	< 0,5 à 8	1,5 à 2	0 à 22
Effectuer l'inspection générale	2 à 51	2 à 51	Negl. à 10
Exécuter des travaux généraux	1 à 51	1,5 à 47	1 à > 50
Purger la roche instable	< 0,5 à 14	1 à 14	3 à 20+
Installer l'échafaudage	2 à 51	1,5 à 51	Negl. à 50+
Forer la roche	2 à 51	1,5 à 51	6 à 50+
Installer le soutènement	2 à 51	1,5 à 51	3 à 50+
Dynamiter la roche	< 0,5 à 25	1,5 à 25	5 à 10+
Déblayer	2 à 51	2 à 51	5 à 20+
Exécuter les travaux de roulage	2 à 25	2 à 25	5 à 20+

Note : 1 kgf = 9,8 Newtons

1.3 Critères de conception d'un équipement de protection individuelle

Outre les critères de conception qui seront établis d'après la revue de littérature des contraintes et des exigences des mines, il était essentiel de voir les critères pris en compte par d'autres auteurs dans la conception d'ÉPI, qu'ils soient similaires ou non à ceux pour une veste de refroidissement. Ainsi, on tiendra compte, malgré tout, des facteurs qui ne sont pas mentionnés dans les contraintes et les exigences de travail du mineur.

Dans son mémoire, Desjardins-David propose une méthode d'évaluation des équipements de protection individuelle. Elle traite des aspects suivants : l'efficacité, la fiabilité, les coûts, l'entretien, la durabilité et le confort physique, la convivialité, la confiance dans l'ÉPI et l'apparence générale (Desjardins-David, 2010).

La norme NF-EN-340 intitulée « Vêtements de protection – Exigences générales » (Association française de normalisation, 2000) mentionne l’aspect du confort, de la résistance aux différents risques, de la facilité de nettoyage et de la taille (à noter que cette norme a été remplacée par la NF EN ISO 13688 en 2013). Godwin et Eger (2014) ont évalué le confort, l’ajustement et la facilité d’utilisation d’un casque de protection pour les mineurs et les travailleurs forestiers. Yu et al. (2012) ont conçu un prototype de vêtement de protection contre la vapeur et l’eau chaude d’après des critères de mobilité, d’ajustement et de confort pour les travailleurs du secteur pétrolier canadien. Pour un prototype de veste de mineur destinée à supporter l’équipement présent sur la ceinture de mineur Bellanca, Eiter et Steiner (2013) ont évalué le confort, l’utilité et la facilité d’utilisation. Le prix, l’apparence et la robustesse ont été mentionnés par Patton et McIntosh (2016) dans la conception d’un casque de rugby. Sonderegger (2013); Sonderegger et Sauer (2010) affirment que la facilité d’utilisation est souvent influencée par l’apparence du produit, autant pour un téléphone que pour un vêtement de protection. Ces données sont résumées dans le Tableau 1.4.

La figure 1.2 présente une synthèse des éléments à considérer dans l’élaboration des critères définitifs de conception d’une veste de refroidissement adaptée aux mines profondes et ultra-profondes.

Tableau 1.4 Critères de conception proposés par la littérature

Source	Critères de conception
NF-EN-340 (2000)	Confort, facilité de nettoyage, résistance aux risques, taille
Godwin et Eger (2014)	Confort, facilité d'utilisation
Yu et al. (2012)	Ajustement, confort, mobilité
Bellanca et al. (2013)	Confort, utilité, facilité d'utilisation
Patton et McIntosh (2016)	Apparence, prix, robustesse
Sonderegger (2013)	Esthétique, facilité d'utilisation
Sonderegger et Sauer (2010)	

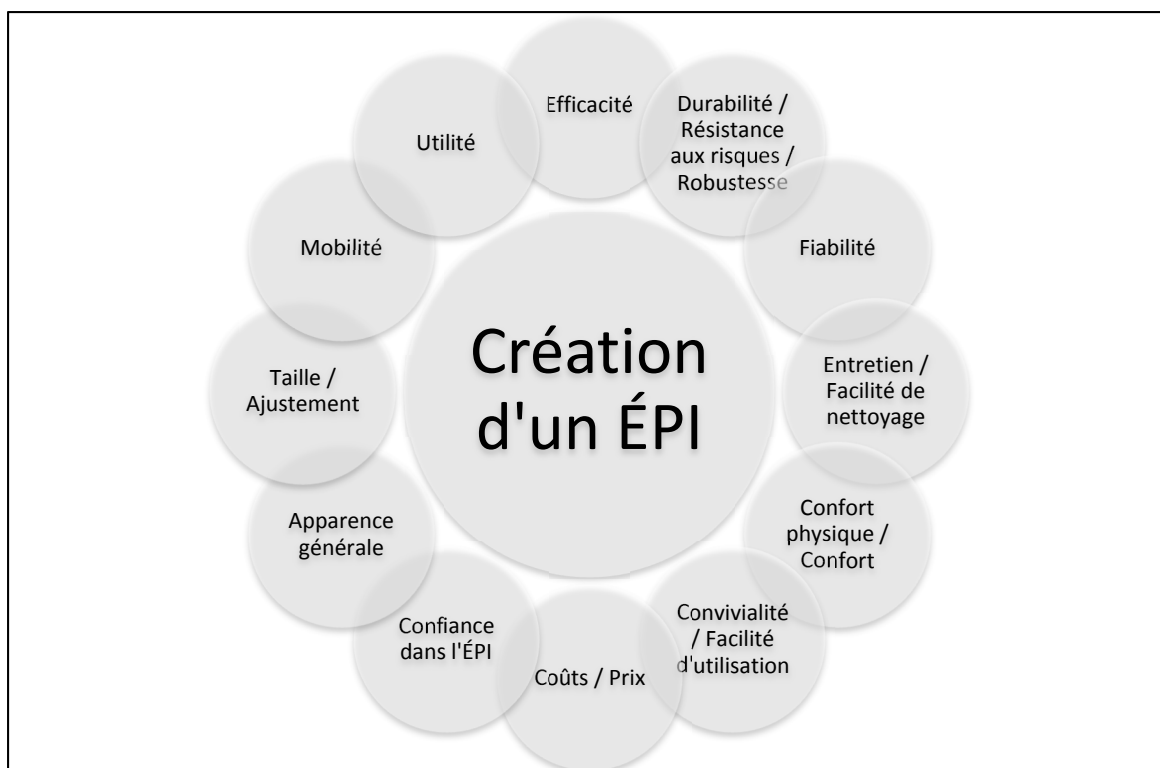


Figure 1.2 Carte conceptuelle des critères de conception d'un ÉPI selon la littérature

1.4 Question de recherche

Pour conclure la revue de littérature, la question qui se posait était la suivante : quels sont les critères ergonomiques à prendre en compte pour concevoir une veste de refroidissement qui soit à la fois adaptée au travail en mines profondes et ultra-profondes et réponde aux besoins ainsi qu'aux exigences des mineurs ?

Outre ce qui a été trouvé dans la littérature, y a-t-il d'autres aspects qui n'ont pas été pris en compte ? Le chapitre 2 détaille la méthodologie utilisée pour répondre à cette question.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre porte sur la méthodologie de recherche. Il vise à montrer les étapes exécutées pour atteindre les objectifs du mémoire. En premier lieu, la démarche méthodologique sera détaillée. En second lieu, les enjeux éthiques et le choix de devis de recherche seront établis. Par la suite, nous justifierons l'échantillonnage et la méthode de collecte des données. Enfin, nous présenterons les outils d'analyse des données et la structure des chapitres subséquents pour clarifier sa pertinence par rapport au sujet.

2.1 Démarche méthodologique du mémoire

La Figure 2.1 Démarche méthodologique du mémoire, détaille les différentes étapes qui ont été réalisées pour atteindre l'objectif du mémoire.

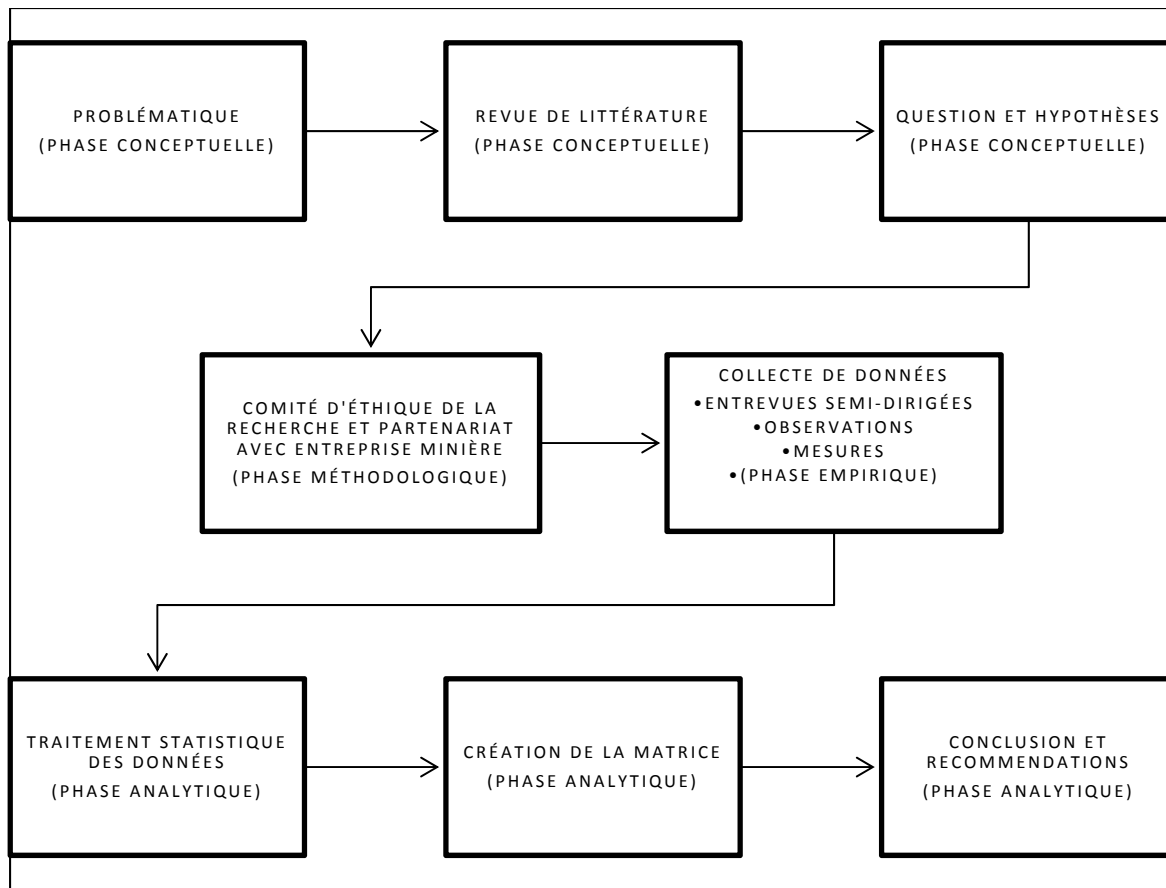


Figure 2.1 Démarche méthodologique du mémoire

Alors que la recherche quantitative cherche à mesurer un phénomène et à l'analyser numériquement, la recherche qualitative cherche plutôt à interpréter des phénomènes d'après ce que fournissent les participants (Fortin, 2010).

Les étapes méthodologiques qui s'ensuivent visent à préciser comment obtenir l'information. Il faut prendre en compte l'éthique, le type de devis de recherche, la façon de faire l'échantillonnage et les méthodes de cueillette des données.

Dans le cas de notre étude, la recherche est de type qualitative et exploratoire (Creswell, 2013). Nous cherchons à explorer un phénomène, soit la contrainte thermique subie par les mineurs en mine profonde et ultra-profonde. La littérature, au meilleur de notre connaissance, comporte peu d'information sur le ressenti des mineurs par rapport à leurs

conditions de travail ainsi que leur opinion sur un équipement de protection individuelle. L'information recueillie auprès des mineurs vise à améliorer les connaissances de la littérature scientifique. Les grilles d'entrevues des mineurs ont été examinées et organisées de façon à en extraire l'information voulue, soit les besoins et les contraintes auxquelles ils sont soumis.

2.1.1 Comité d'éthique de la recherche

Pour respecter les personnes et leur bien-être, en raison de la participation humaine au projet, il était important de faire valider le protocole de recherche par le comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS. L'approbation finale a été obtenue le 12 janvier 2016 (ANNEXE V).

Il a été convenu que le consentement des mineurs serait obtenu par écrit sur un formulaire, et qu'il serait libre et éclairé. Une présentation serait faite au travailleur et il aurait le libre-choix de se retirer à tout moment de l'étude.

2.2 Étude de terrain

L'étude de terrain permet de recueillir de l'information complémentaire à celle que fournit la littérature. Dans le cas de notre étude, elle consistait en trois phases : une phase d'entrevues semi-dirigées auprès des mineurs, une phase d'observation d'une durée de 30 min qui ne requerrait pas une participation active des mineurs et une phase de mesures de température et d'humidité relative concomitantes.

Dans le but de nuire le moins possible aux activités minières, il a été décidé d'un commun accord avec l'entreprise partenaire de faire les prises de données et les entrevues sur place directement au poste de travail des mineurs.

2.2.1 Taille et type d'échantillon

En termes de taille d'échantillon, il est important de réaliser que l'environnement minier est un environnement difficile et en constant changement. Les mineurs sont assignés à des sites et des tâches différents selon les journées de travail. La société minière partenaire a fait savoir, lors de nos échanges, qu'il serait difficile de faire plus de quatre à cinq entrevues individuelles par jour en raison de la répartition des travailleurs dans la mine et du temps de déplacement nécessaire pour les rencontrer. Pour cette raison, les chercheurs ont choisi d'utiliser un échantillon de convenance avec un total de 20 participants de sexe masculin sur 800 travailleurs (excluant les cadres et les sous-traitants). La représentativité de l'échantillon n'est pas essentielle ici puisque notre étude est exploratoire. Cependant, les mineurs interviewés provenaient des niveaux les plus profonds de la mine et occupaient pour la majorité des emplois plus exigeants physiquement (écaillage, forage, boulonnage). Les participants ont donné leur consentement libre et éclairé à la suite d'une présentation du projet par l'analyste. Nous avons pu les rencontrer lorsqu'ils étaient présents au moment de notre accès à certains niveaux de la mine au cours de la visite.

Le type d'échantillonnage fait en sorte que la caractéristique commune des participants était leur emploi comme mineur. Cependant, leur rôle primaire pouvait différer, allant de celui de mécanicien à celui de foreur.

2.2.2 Durée

Sur les cinq jours de cueillette de données prévus pour rencontrer le nombre voulu de participants il en a fallu que quatre. La collecte des données s'est effectuée entre le 14 et le 18 mars 2016.

2.2.3 Lieu (Abitibi-Témiscamingue)

Les mines les plus profondes du Québec étant situées en Abitibi-Témiscamingue, une mine située dans cette région s'avérait un choix logique comme lieu pour la collecte de données.

2.2.4 Entrevues semi-dirigées

Ne voulant pas diriger les réponses des participants, nous avons écarté l'option des entrevues dirigées. Quant à la possibilité d'utiliser des questionnaires auto-administrés, celle-ci a été écartée en raison du taux de réponse (moins de 20%) lors d'une étude menée précédemment par l'ÉTS (Camara, Nadeau et Echchakoui, 2015). Ce taux était encore plus faible que celui estimé entre 40 % et 60 % dans la littérature (Bowling, 2005; Gasquet, Falissard et Ravaud, 2001; Hoonakker et Carayon, 2009). À noter que ce taux de réponse varie également selon le sujet étudié et la méthode utilisée pour poser les questions. L'emploi de mineur est à quota, ce qui signifie qu'ils veulent généralement s'engager le moins possible dans des activités secondaires.

Les entrevues semi-dirigées se sont déroulées de façon individuelle. Elles ont permis de documenter les perceptions qu'avaient les mineurs de l'utilisation d'un nouvel équipement de protection individuelle.

Le questionnaire utilisé se divisait en trois parties : les questions anthropométriques, les questions sur leur emploi et les questions sur les équipements de protection individuelle. Ce questionnaire se retrouve à l'ANNEXE VI. Les questions anthropométriques visaient à déterminer la taille générale que portait les travailleurs dans le cas de l'élaboration d'une veste ainsi qu'à déterminer si les travailleurs d'origine européenne avaient des données anthropométriques comparables à celle nord-américaines et donc que dans la conception future de la veste les données de base anthropométriques nord-américaines pourraient être utilisées. Les questions sur l'emploi visaient à déterminer si celui-ci était exigeant physiquement et à voir quel était la durée de travail, ceci pour déterminer l'autonomie potentielle nécessaire de la veste. Enfin, les questions sur les ÉPI ont été élaborées en vue d'obtenir les opinions des travailleurs sur leur acceptation d'un ÉPI ainsi que leur expérience antécédente de port d'équipement refroidissant. Les entrevues n'ont pas été enregistrées, ni filmées, ni photographiées. Seuls des questionnaires ont été remplis uniquement par l'analyste présent lors des entrevues, et les renseignements ont été anonymisés. L'information

était transcrite par l'analyste et le participant pouvait vérifier à tout moment si ce qui était écrit correspondait bien à sa pensée.

2.2.5 Observation directe du travail

L'observation directe du travail était non participante. Elle a visée à estimer l'énergie dépensée sur une période de 30 minutes dans le but de l'extrapoler par la suite sur une période de travail de 10 h. La méthode qui a été utilisée est le Systematic Workload Estimation (SWE) (Burford et al., 1984) mise au point en 1984 pour évaluer le coût métabolique du travail effectué dans les mines souterraines (ANNEXE VII). Cette méthode est basée sur les données pour un homme de stature et de poids moyen (âgé de 30 ans, pesant 70 kg et mesurant 1,75 m), et elle donne des valeurs en kilocalories par minute. Le schéma de l'ANNEXE VII permet 45 combinaisons en fonction de l'activité exercée, de l'utilisation des membres et de l'intensité du travail. Comme pour les entrevues, les participants n'ont pas été enregistrés, ni filmés, ni photographiés durant l'observation. Seules les grilles d'observations ont été remplies. Le poids accordé à chaque tâche effectuée par le mineur dépend de l'effort et des membres utilisés durant le travail en suivant les lignes directrices de la méthode. Le Chapitre 4 fournit plus de précisions à ce sujet.

Les documents d'entrevue et les grilles d'observations ont été associés ensemble à l'aide d'un code alphanumérique qui ne permet pas l'identification du participant.

2.2.6 Mesures des conditions environnementales

L'utilisation d'un instrument portatif Kestrel 3000 au cours des quatre jours a permis de recueillir des données sur la vitesse de l'air, la température sèche ($\pm 1,4$ °C) et l'humidité relative (± 3 %) sur quatre niveaux de la mine.

2.3 Outils utilisés pour traiter les données

2.3.1 Entrevues semi-dirigées

Le choix des questions a été expliqué au point 2.2.4. Les données sur l'âge, la taille, le poids et la grandeur de chandail à manches courtes ont été reportées dans un fichier Excel en vue de les compiler mathématiquement. Cette méthode a facilité la comparaison avec les données d'Henry Dreyfuss Associates et Tilley (2002) pour permettre de tirer des conclusions quant à la distribution des participants.

Les autres données ont été compilées à la main. En associant les mots similaires, il a été possible de traiter les réponses des participants et d'observer des tendances. L'information a également été corrélée avec ce qui avait été obtenu dans la revue de littérature lorsque c'était possible.

Le chapitre suivant présente l'article scientifique soumis à la revue *Occupational Ergonomics* en août 2017. Par la suite, l'observation du travail des mineurs fera l'objet du chapitre 4.

CHAPITRE 3

ERGONOMIC CRITERIA FOR THE DESIGN OF A COOLING VEST IN DEEP AND ULTRA DEEP MINING ENVIRONMENTS

Valérie Tuyêt Mai Ngô^a, Sylvie Nadeau^a, Stéphane Hallé^a

^aDépartement de Génie mécanique, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication, août 2017

Abstract

BACKGROUND: Ever deeper mining is exposing workers to increasing heat and humidity, which can threaten their health and safety.

OBJECTIVE: The objective of this research is to create a matrix of criteria that will eventually be used to design a personal cooling vest that will meet the needs and wants of miners.

METHODS: A literature review was done to identify the constraints and requirements of miners in ultra-deep mining conditions; a field study was conducted in which information was acquired by measurement (temperature, humidity), observation (work rate) and semi-directed interviews of a convenience sample, 20 volunteer participants (age, weight, height, shirt size, personal protective equipment currently worn and opinion about a cooling vest). The data was then structured, compiled and interpreted to create a matrix.

RESULTS: Participants were found to be in the >50% percentile of the population regarding weight and height. All reacted positively to the idea of a cooling vest to help in their work. A matrix containing nine users and seven design-related criteria was created.

CONCLUSIONS: The matrix must still be tested as to its validity. Its usage could then be extended to other fields of work in which heat is a health and safety concern for workers.

Keywords: Ultra-deep mining, cooling equipment, ergonomic criteria

3.1 Introduction

The depletion of mineral resources, particularly of precious metals such as gold, in the earth's higher strata has led mining companies to follow current mineral deposits further into the earth (Nadeau et al., 2013) at a distance that qualifies the mining as deep and ultra-deep (2 km and more) (Ultra Deep Mining Network, 2016; Webber et al., 2003). At these depths, miners are confronted to environmental conditions, which at the present time are a risk to their health and safety. The increase in depth means a rise in ambient temperature and this subjects the miners to heat stress, which is known to have a negative impact on physical work performance and to make people more prone to work-related accidents (Wagner, 2013).

Part II of Canada's Labour Code entitled *Occupational Health and Safety* concerns "the elimination of hazards, then the reduction of hazards and finally, the provision of personal protective equipment, clothing, devices or materials, all with the goal of ensuring the health and safety of employees." (Gouvernement du Canada, 2017) This implies that personal protective equipment (PPE) should always be used as a last resort in case of an occupational hazard that cannot be eliminated or controlled by other means. However, it is often necessary to ensure that the work can continue despite less than optimal working conditions.

The objective of our research was to create a matrix of ergonomic criteria for the design of a cooling vest for deep and ultra-deep mining workers. The method used to achieve this involved three activities: two literature reviews, one on the miners' constraints and requirements in deep and ultra-deep mining, and a second on PPE development and measures, semi-directed interviews and finally a field observation of miners.

3.2 Background

In deep and ultra-deep mining, heat and humidity may reach levels in excess of 35°C and 100% relative humidity (Ngô et al., 2016). These extreme thermal constraints will continue

to rise as extraction continues at greater depths (Wagner, 2013), which presents a real challenge as well as a threat to the health and safety of miners (Hardcastle, 2006).

While air conditioning can and has been used to control temperature and humidity, it becomes a costly solution at great depths not only in terms of energy consumption, but also as to investment and maintenance costs (Hardcastle, 2006; Trapani, Romero et Millar, 2016). In the literature reviewed, annual costs for ventilation and cooling systems start from 20% of the annual energy usage (Uys, Kleingeld et Cilliers, 2015), 23% of the operating costs (Goosen, Pelzer et du Plessis, 2015), and 25% of the mine's electricity costs (van Jaarsveld, du Plessis et Pelzer, 2015). It is thus a significant expense for any mine operation. Ventilation on demand has been looked at as a possible solution, since not every sector of a mine has either machinery or workers in it at all times (Hardcastle, Kocsis et O'Connor, 2006). However, this can only postpone the need for mechanical refrigeration.

In the near future, full automation of mining vehicles in Canada might not yet be deployed extensively and humans should and will continue to be at the forefront of operations (Nadeau et al., 2013). Moreover, some mining equipment such as shuttle-cars are not always equipped with air conditioned cabins.

It is thought that a personal cooling vest might be a solution that could protect the workers as well as reduce the costs of the cooling of the mine. Several types of cooling vests exist on the market (Bendkowska et al., 2008; Branson et al., 2005; Chan et al., 2013; Delkumburewatte et Dias, 2012), such as, air cooling garments, liquid cooling garments, cooling garments based on gas expansion, phase changing garments and thermoelectric cooling. In their work, Al Sayed et al. (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2016) list the many issues that may arise when using an ordinary cooling vest in deep underground mines, such as reduced cooling efficiency, risk of condensation on the interior of the vest, bulkiness of the apparel and low autonomy (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2016). They conclude that no cooling technology is

perfectly compatible with deep mining environments. A matrix of ergonomic criteria is thus a welcomed aid that could help in the design of such an equipment.

3.3 Research problem

Developing a PPE to help cool down the body of miners in extreme environmental conditions might be a less costly solution than the ones currently in use. While ventilation will always remain an essential part of a mine, a vest would bring the cooling directly to the miners who most need it.

Two key problems must be addressed: the working environment and conditions that it will be used in, as well as the workers wants and needs towards a new protective garment. The answers to these two problems will help create a matrix of ergonomic criteria, which will be used to develop an appropriate cooling vest.

3.4 Methodology

A sequential approach was used to answer the key problems. The first step consisted in a literature review on the constraints and requirements miners faced with deep and ultra-deep mining. This included an analysis of the PPE currently worn by the miners and the energy expenditure associated with the work in an underground environment (Kenny et al., 2012).

Following the approval of the experimental protocol by the Ethics Committee of the École de technologie supérieure, the field study was conducted over four days in Abitibi-Témiscamingue. The economy of this region relies heavily on natural resources extraction industries and there are several deep and ultra-deep gold mines.

The field study allowed us to observe the working environment, as well as interview miners and retired miners. All the participants were informed of the aims of the research project and their right to voluntarily participate and withdraw at any time. The participants also gave

their written informed consent. Semi-directed interviews and observations of the miners as well as temperature and humidity readings were then conducted.

The literature review conducted on constraints and requirements of miners in deep and ultra-deep mines was published by Ngô et al. (Ngô et al., 2016). It revealed the lack of data on deep and ultra-deep mining conditions and it was determined that a field study was necessary to collect missing key information. Little is known about the conditions workers face at those depths and, to the best of our knowledge, no case studies were found on the worker's metabolic rate under thermal stress in ultra-deep mines.

In total, 20 voluntary subjects, all male, were questioned during semi-directed interviews. The prevalence of men in the industry guided this choice, since only 4% of underground miners in Canada are women (Women in Mining Canada, 2010). It was essential to determine how well miners would accept a new protective equipment. Basic data was collected, including each miner's weight, age and stature as well as their most commonly worn t-shirt size. This was then compared to data in the Human Scale (Henry Dreyfuss Associates et Tilley, 2002) to determine if the miners had their own anthropometric category. To our knowledge, there is no existing anthropometric database specifically for Canadian miners. The miners were also asked if they had any concerns about the use of a cooling vest. The data was compiled and regrouped into themes, which became the criteria for the matrix, which was then defined.

PPE development literature was also examined to validate the criteria used in the matrix, as well as add those which had not been raised by the field study or the initial literature review, such as equipment maintenance.

3.5 Results

3.5.1 Miners' Receptivity Towards a New PPE

In the semi-directed interviews, participants were asked three questions: whether they thought a cooling vest would be a good PPE to be implemented, the reason why they thought so and if they would be willing to try out a future prototype.

All participants agreed that the environment was hot and humid and that a cooling vest would be beneficial to their work. Two miners spoke openly of their awareness of the consequences of heat exposure. They thought a cooling vest would help alleviate the risk of a heat stroke, as well as improve the worker's well-being during work. All 20 miners were in favor of trying out a prototype if it was made available to them. Three miners expressed some concerns regarding the weight and fit of the equipment.

3.5.2 Population

As mentioned, most Canadian mining workers are male. In the first half of the 20th century, Polish immigrants came to settle in the region of northern Quebec (Lambert-Racine et St-Pierre, 2010). They integrated the local communities to form the population that exists to this day. The data concerning the participants' weight, height and shirt size was collected during the field study. Due to time constraints, it was not possible to precisely measure each participant. Since the exactness of the data was unnecessary at this stage, their verbal descriptions were sufficient.

Tableau 3.1 summarizes the results, while Figure 3.1 and Figure 3.2 compare weight and height with the Human Scale (1, 50 and 99 percentiles which are yellow, orange and red respectively) for each participant.

Tableau 3.1 Summary of Different Measures of the Participants

	AGE (YEARS)	WEIGHT (KG)	HEIGHT (M)	BODY MASS INDEX	T-SHIRT SIZE
MIN	23	65.8	1.70	20.2	M
MAX	55	117.9	1.88	37.3	2XL
AVERAGE ± STANDARD DEVIATION*	37.2 ± 10.7	91.1 ± 15.3	1.78 ± 0.05	28.7 ± 4.2	75% L to XL

*N=20

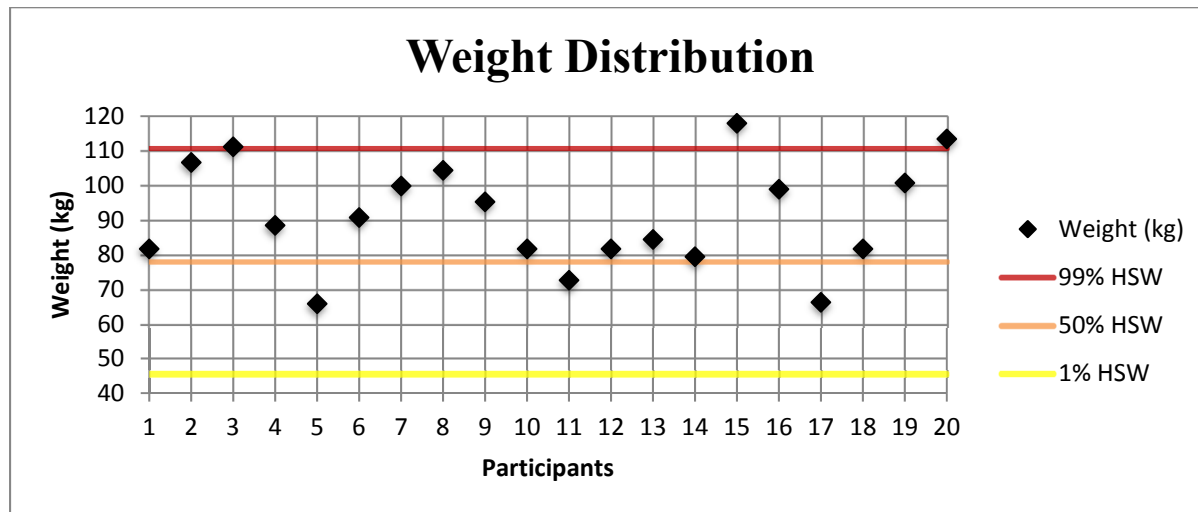


Figure 3.1 Weight Distribution of the Participants

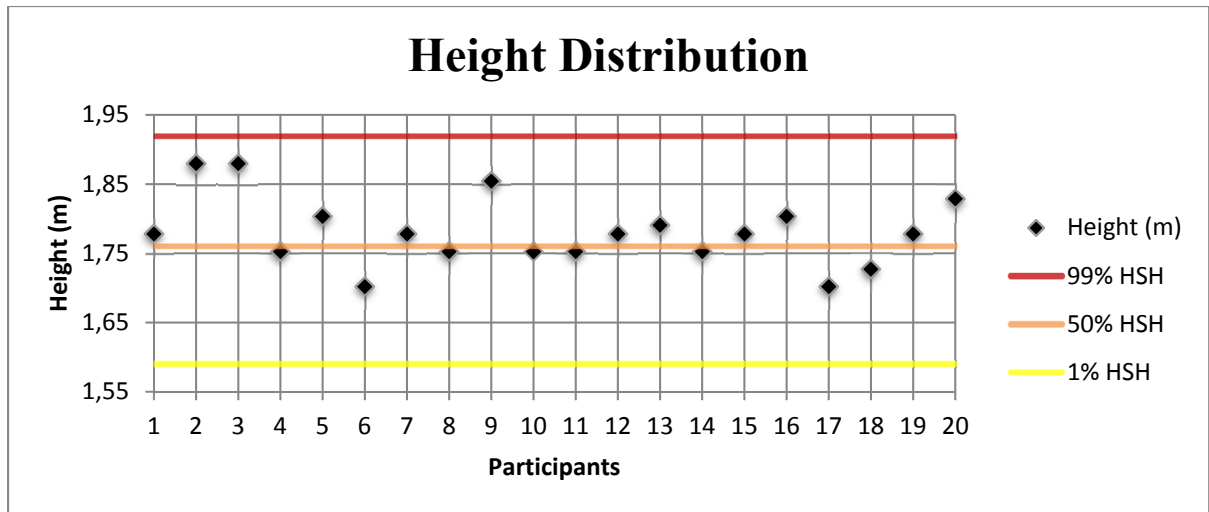


Figure 3.2 Height Distribution of the Participants

3.5.3 Occupation

The word *miner* refers to all classes and laborers who work in a mine. However, the tasks are different depending on the miners, for example the work of a manual drill operator will involve the whole body, compared to shuttle-car operators who are sitting while driving which requires less use of the upper or lower body. During the field study, a variety of miners were interviewed to ensure a larger scope of answers. Their class distribution is detailed below:

- 13 drill operators;
- 3 motormen;
- 2 construction workers;
- 1 shuttle-car operator;
- 1 supervisor.

3.5.4 Shift and Break Times

The participants mostly worked on a 10-hour set shift; two of these worked 11 and 12 hours, respectively. Fourteen workers mentioned never taking a break except for lunch, or not at all. Observations showed that the workers do take “micro-breaks” when having a drink for example, or resting against a wall. They also stop working at times when they speak with their colleagues or supervisor. Having many short breaks is more beneficial, because of the steepness of recovery at the beginning of a work break (Kroemer, 2008). Although the work objective is determined at the beginning of the day, 18 of the workers mentioned they self-pace while ensuring they complete the work in the allotted time. Seven mentioned taking a break because of the heat or based on their perception of their physical capacity.

3.5.5 General Work Environment

Temperature and humidity levels were recorded on four levels of the mine using a portable wind, humidity and temperature meter (Kestrel 3000 Wind Meter, uncertainty 1.4°C and 3% RH). The findings are shown in Tableau 3.4, where we can observe that high amounts of heat and humidity can be found at all levels, regardless of the depth.

All shelters in the mine were equipped with an air conditioning unit, which would ordinarily help the miners during their cooldown period (such as a lunch break). However, to meet and possibly exceed their quota on time, some miners do not return to the cooling shelter at all during their work hours.

3.5.6 Personal Protective Equipment

Any additional PPE will have an impact on the existing PPE worn by miners or may even interfere or be incompatible with it. Thus, the type of PPE currently worn by miners needed to be determined. Tableau 3.2 establishes the mandatory and optional equipment used in the

mine. The data was obtained both by questioning miners during semi-directed interviews and by obtaining the list of equipment from the health and safety team of the mine. When designing a cooling vest, this equipment will need to be considered.

Tableau 3.2 List of PPE of a Mine in Quebec, Canada

EQUIPMENT	MANDATORY / OPTIONAL	DETAILS
Safety harness	Optional	When working at heights
Safety belt	Mandatory	Mandatory at all times
Hard hat and accessories	Mandatory	Earplugs mostly, no earmuffs
Safety shoes (or boots)	Mandatory	Boots generally
Respiratory protective equipment	SO ₂ mask is mandatory N95 particulate filtering optional	
Safety glasses	Mandatory	Sometimes welding mask worn over the safety goggles
Gloves	Mandatory	Some miners had gloves that reduced vibration (not provided by the employer)
Coverall	Mandatory	They can also add on the overall which protects against grease and other similar products

3.5.7 Impact on the Worker's Body

The miners were asked if their garment snagged on wires or other mine hazards in the mine or if they used any vibrating tool or if they had been struck during their work. They were asked to use an outline of a human to annotate where various events happened on their body, and this diagram helped us generate a heat map. The heat map was used to visualise, using

colors, the areas where the workers considered themselves more at risk of getting hit or snagged on wires or other mine hazards. Heat maps can also be used to show a thermal environment similar to what an infrared camera would show (Morgado, Talaia et Teixeira, 2015).

Figure 3.3 illustrates the areas which are considered more or less at risk of impact, vibration or snagging on wires or other mine hazards. The numbers on the figure indicate the frequency at which it was mentioned by a participant and the colour value is as follows: 1-3 Yellow, 4-6 Orange, 7-10 Red. The choice of colors was intended to make it easy to distinguish them on a scale of importance and facilitate visual interpretation when printing in grayscale, by respecting that a darker color means a higher value (Borland et Li, 2007; Harrower et Brewer, 2003). The area that was mentioned the most was the arms, because the sleeves tend to get caught on the protective wiring on the mining shaft walls. The head was mentioned, because of the type of light used in the participating mine, which requires a wire that connects to a battery at the waist. Some mining hats are now equipped with an integrated battery in the hardhat which eliminates that risk. The feet were mentioned because of the absorption of vibrations during the use of manual drills when the worker supports the equipment with his body. The objective of this map is to prevent damage to the future PPE during the time it is worn and minimizing any potential risks to the user.

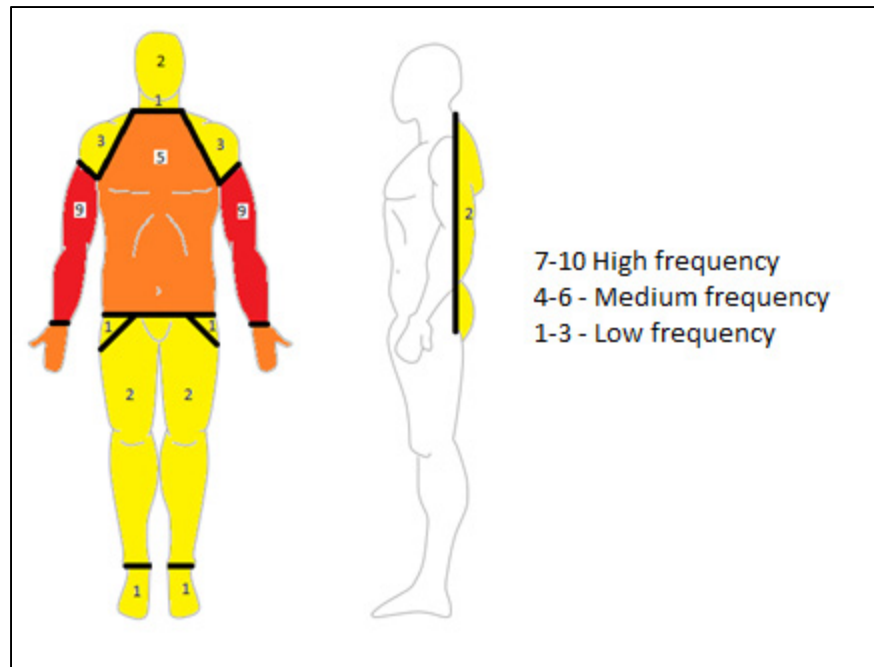


Figure 3.3 Areas at Risk of Getting Hit or Snagged

3.5.8 Concerns About a New PPE

An open question was asked to the participants as to their concerns regarding a cooling vest. The data was compiled and is shown in Figure 3.4. We can observe that comfort and ease of movement are primary concerns, while efficiency and fitting did not cross their minds or seem to matter as much. With directed questions, it is possible that the results would have differed.

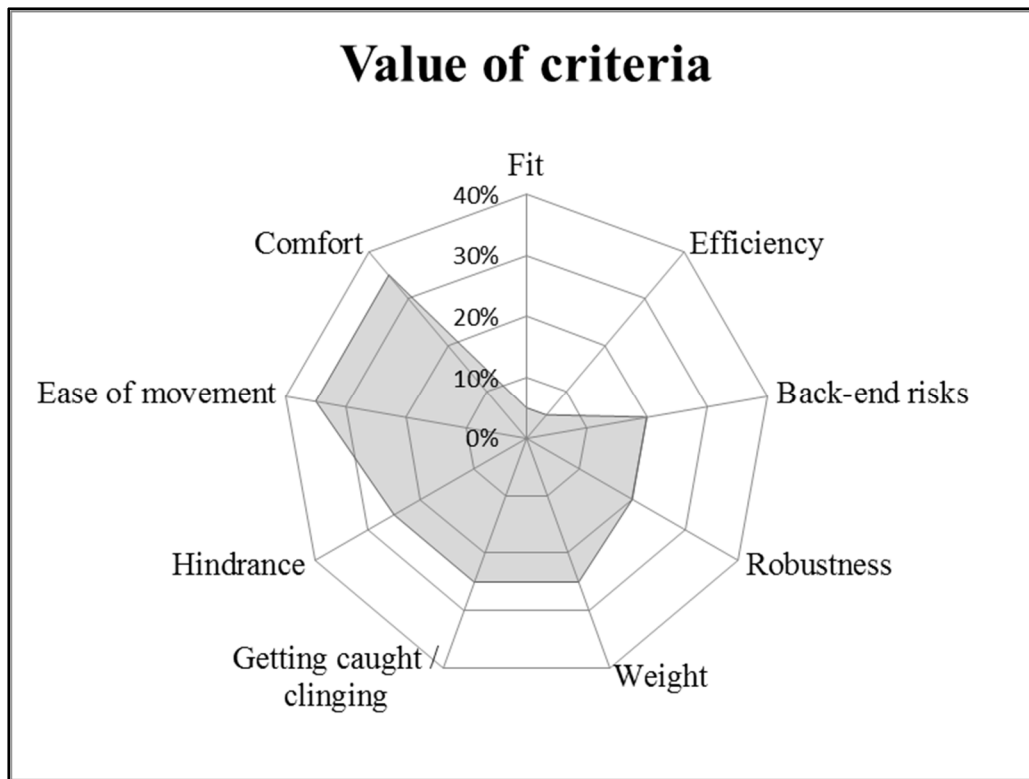


Figure 3.4 Concerns Raised by the Participants

3.5.9 Additional Criteria Established by Normal PPE Development Literature

3.5.9.1 Design Aesthetics and Usability

An article by Sonderegger et Sauer (2010) identifies two criteria from the perspective of design aesthetics, the outward look and attractiveness, which refers to the individual's reaction to a product. Multiple studies have proven that aesthetics and attractiveness have had an influence on the perceived usability of a product (Lamb et Kallal, 1992; Lombardi et al., 2009). Moreover, sometimes a performant equipment can be discarded in favor of an aesthetically pleasing equipment for the sake of the perceived image.

3.5.9.2 Maintenance

Koo et al. (Koo, Teel et Han, 2016) mention two factors in their design of protective gardening gloves: durability and ease of care, which we merged into one category, maintenance of the equipment. Durability can be both mechanical resistance and the ability to keep its properties over time. Ease of care includes the time, costs, space and resources necessary to maintain an equipment in its proper state (Desjardins-David, 2010).

3.5.9.3 Conformity to Laws, Regulations and Standards

Different countries will have different laws, regulations and standards. Any new PPE must conform to those and should be designed using the latest and most stringent standards, according to the best practices.

3.6 Final Matrix Setup

The final matrix setup is show in Tableau 3.3. The criteria are separated into two categories: one is centered on the user, while the other is centered on the general design of the equipment. The definition of each criterion is based on existing literature. The columns weight of criteria and selected method of evaluation should be completed in further studies using expert elicitation.

Tableau 3.3 Final Design Matrix of a Personal Cooling Vest Suited to Deep Mining Conditions

CATEGORY	CRITERIA	INFORMATION SOURCE	DEFINITION
User	Fit	Weight, Height, Shirt size, Concerns	“Quality, state or manner towards the length and closeness of clothing worn by the human body” (ASTM, 2013)
User	Robustness	Impact on the worker’s body, Concerns	The resistance to all types of factors including impact, heat, humidity, vibration, dust, etc.
User	Weight	Concerns	The weight of the cooling vest
User	Snagging	Heat Map, Concerns	Fabric or vest should not get caught on rock surface or other protuberance; (of a garment) fitting closely to the body and showing its shape
User	Hindrance	PPE, Heat Map, Concerns	“A thing that provides resistance, delay, or obstruction to something or someone” (Oxford Dictionary)
User	Ease of Movement / Mobility	PPE, Concerns	“The ability to move or be moved freely and easily” (Oxford Dictionary)

Tableau 3.3 Final Design Matrix of a Personal Cooling Vest Suited to Deep Mining Conditions (suite)

CATEGORY	CRITERIA	INFORMATION SOURCE	DEFINITION
User	Comfort	Concerns	Thermal and tactile comfort – “Thermal: clammy-dry, airtight-breathable, damp-dry, sticky-nonadhesive, hot-cool; Tactile: Prickly - non-prickly, Itchy - non-itchy, scratchy – non-scratchy”(Chan et al., 2013)
User	Design Aesthetics	Literature review	Objective features of a stimulus or subjective reaction to the specific product feature(Sonderegger et Sauer, 2010)
User	Usability	Literature review	The ease at which the user can understand how to wear and use the protective equipment.
Design	Efficiency	General work environment, Concerns	“The effectiveness with which a task or operation is done; usually measured in energy spent, cost, or time required. For muscular work, efficiency is a measure of how much of the energy is translated into useful mechanical work compared to the total amount: mechanical plus that dissipated as heat. Most muscle work is less than 25 percent efficient.” (Eastman Kodak Company, 2004)
Design	Back-End Risks	Concerns	Remaining risks after design is complete

Tableau 3.3 Final Design Matrix of a Personal Cooling Vest Suited to Deep Mining Conditions (suite)

CATEGORY	CRITERIA	INFORMATION SOURCE	DEFINITION
Design	Working Environment	Literature review	The setting or conditions in which activity is carried on (Oxford Dictionary)
Design	Energy Expenditure	Literature review	“The power used during activity or rest. It is usually expressed in Watts, in kilocalories per minute or hour, or in milliliters of oxygen per kilogram of body weight per minute (ml O ₂ / kg bw/min)” (Eastman Kodak Company, 2004)
Design	Maintenance	Literature review	“Maintenance should include inspection, care, cleaning, repair, and proper storage” (Desjardins-David, 2010)
Design	Cost	Price range of a cooling vest	“(of an object or action) requires the payment of (a specified sum of money) before it can be acquired or done” (Oxford Dictionary)
Design	Conformity to existing laws, regulations and standards	Literature review	

3.7 Discussion

The main objective of this research was to establish a matrix of ergonomic criteria that a cooling vest would have to meet to satisfy the needs and expectations of miners. Currently existing cooling vests are not appropriate for use in deep mining conditions (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2016). While the safety, efficiency and autonomy of the apparel will be more centric to the designers, comfort and ease of movement will be a top priority to convince miners to try out the cooling vest. This finding is similar to the results of Chang et al. (Chan et al., 2016), which state that the worker's preference for a cooling vest is related to the wearer's comfort and its impact on job performance although the perceived feeling of safety and the fit of the cooling vest were also mentioned.

3.7.1 Limited Number of Participants and Time Constraints

In a mine, the environment and situation is constantly changing. Miners are always on the move. Each day, even multiple times in a single day, changes in work schedule and assignment can occur. For these reasons, we could not effectively plan where and when we would meet the miners and if they would have time to answer our questions. This is the main reason why this study was limited to 20 participants, a convenience sample, even though a larger sampling would have been preferable.

The time constraints on our side and that of the miners and the mining company, meant the numbers related to weight, height and t-shirt size were obtained from the miner and were not directly measured. While it might have added a level of error, we considered that it would be negligible in terms of the answer to the question: what size should a vest be for a miner? Obviously, in the case of a fitted vest, more measures should be considered such as the ones for the coverall, harness and other items fitted on the body depending on whether the vest is inside or outside the coverall.

3.7.2 Population

During our search on miner's anthropometry, we were unable to find any specific database pertinent to our mining population in Quebec, and even in Canada. In his thesis, Boudreau-Trudel (2014), states that our mining population in Abitibi-Témiscamingue comprises both French Canadians, English Canadians and two waves of Polish, Ukrainian and Italian immigrants. This is also confirmed by Lambert-Racine et St-Pierre (2010).

Due to the previously mentioned absence of a specific database on Canadian miners, the data that was used for comparisons came from *The Measure of Man and Woman* (Henry Dreyfuss Associates et Tilley, 2002), also known as the Human Scale. It is based on civilian anthropometric data from the 90s (Pheasant 1996, Roebuck 1995) and *The Military Handbook: anthropometry of U.S. Military Personnel* (DoD, 1991), which means the data is already two decades old.

According to Figure 3.1 and Figure 3.2, miners are within the normal range defined by 98% of the U.S. population from 2002. This is shown clearly by the boundary lines for the 1, 50 and 99 percentiles which are yellow, orange and red respectively.

3.7.3 Variability of Working Environment Conditions

We needed to meet the miners in four different levels of the mine, since their working environment (heat, humidity, type of work) and availability differed depending on the mine level and also, we wanted to have the largest possible representation of the population. This also influenced the rate at which they were seen to take “micro-breaks” and we can make the general hypothesis that self-pacing is also affected in the same way.

We believe the heat and humidity measures that were taken during the four days of field study represent what a miner endures in general. However, we can hypothesize that the

temperature might rise even more during the summer season. Also, even though we could have consulted the records on the mines' temperatures as recorded by static thermometers throughout the year, these readings are not always relevant since they might not be from an area of the mine where the workers will be exposed to those conditions.

The main reason miners were found to be receptive to the idea of a cooling vest was because their working environment was already hot and humid as seen in Tableau 3.4. Miners in a working environment where cooling systems are in use might not be as receptive to the idea since their work conditions differ.

Tableau 3.4 Heat and Humidity at Various Depths in a Mine

DEPTH (m)	LOCATION	DRY TEMPERATURE (°C)	%RH
1300	Mechanical workshop	21.8	64
	On a mine roadway	27.0	> 99
	On a mine roadway with active shuttle-car operating	28.8	> 99
1600	On a mine roadway	28.2	83
	In a shelter with air conditioning (AC) on	26.6	57
1800	At the end of a mine roadway (while the AC system is off)	35.1	98
	Just outside the shelter (while the AC system is off)	30.0	> 99
	In a mine roadway (while the AC is off)	35.0	76

Tableau 3.4 Heat and Humidity at Various Depths in a Mine (suite)

DEPTH (m)	LOCATION	DRY TEMPERATURE (°C)	%RH
1900	Close to the small AC system	28.8	69
	On a mine roadway (while the AC system is off)	30.0	> 99
AVERAGE ± STANDARD DEVIATION		29.1 ± 3.1	84 ± 15

3.7.4 Price of Equipment

In Québec, Canada, legislation states that the employer must supply the necessary protective equipment to their workers at no cost. Thus, workers who already are experiencing heat in their current working conditions, but are still able to deliver and meet their objectives, might not be willing to invest in PPE if the employer does not provide it.

3.7.5 Impacts on the Worker's Body

Any new cooling vest should be resistant to impacts and vibrations in the critical areas of the heat map shown in Figure 3. Critical components should not cover the sections in red, and should be evaluated for the sections in orange and yellow, unless proper precautions are taken.

3.8 Conclusion and Future Research

Deep and ultra-deep mining is an unavoidable development for the future. Miners will be confronted with heat and humidity beyond acceptable levels. A PPE, although usually used as a last resort, could help ensure that the work continues while protecting the workers until a more effective means of heat stress reduction can be achieved.

To the best of our knowledge, there exists no known matrix of ergonomic criteria to help achieve a proper design of a PPE that would help the miners in their struggle.

The literature review and field study enabled us to develop a matrix of ergonomic criteria. This matrix, once validated, can be used for the design of a new PPE that will help miners faced with heat stress in deep and ultra-deep mining conditions.

In future work, it might be possible to apply this matrix to other work environments where heat and humidity are problematic and it is hoped that it will eventually be widely implemented to improve all types of cooling vests.”

3.9 Acknowledgments

We would like to thank *Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FQRNT)*, *École de technologie supérieure* and the *Association Québécoise pour l’hygiène, la santé et la sécurité du travail* for providing financial support for this research.

CHAPITRE 4

OBSERVATIONS DU MILIEU DE TRAVAIL

Tel qu'il est mentionné dans la partie 2.2.5, des observations ont été effectuées au cours de l'étude de terrain réalisée en Abitibi-Témiscamingue. La méthode SWE (Burford et al., 1984) utilisée a permis de faire une évaluation préliminaire du travail accompli par les travailleurs observés. Tel que mentionné en méthodologie, cette méthode permet d'associer 45 combinaisons de travail dépendamment de l'activité exercée (*Stationary, Walking, Extra*), de l'utilisation des membres (1 bras, 2 bras, tout le corps) et de l'intensité du travail.

La Figure 4.1 comporte les différentes activités observées regroupées en fonction de l'effort analysé par l'analyste. L'information présente le nombre total de kcal qui ont été dépensées, le temps d'observation et finalement la moyenne pour un homme de stature et de poids moyen (âgé de 30 ans, pesant 70 kg et mesurant 1,75 m).

Dans la Figure 4.1, il est possible de constater que sur les 20 participants volontaires à cette étude, seules 10 personnes ont pu être observées. La durée des observations n'a pas non plus toujours été constante sur une durée de 30 minutes. Plusieurs raisons expliquent ceci :

- Les anciens mineurs occupaient un poste dans l'entreprise qui ne les amenait pas à travailler dans la mine elle-même.
- L'ascenseur de puits ne peut être pris qu'à certains moments de la journée. Pour parvenir à passer des entrevues auprès des 20 participants, il fallait changer fréquemment d'étage, ce qui limitait le temps consacré à l'observation.
- Certains travailleurs étaient en attente d'un mécanicien pour une réparation de machine, ce qui les empêchait d'effectuer leur travail.

Le Tableau 4-1 détaille une liste non-exhaustive des activités observées par l'analyste et la catégorie de travail dans laquelle elles ont été classées.

La limite par minute reconnu par Bokranz et Landau (2012) est de 16,5 à 17,5 kJ/min (3,8 à 4,1 kcal/min) pour les hommes et 12-13 kJ/min (2,9 à 3,1 kcal/min) pour les femmes. Nous pouvons constater que certaines valeurs moyennes de la Figure 4 dépassent ces limites. Cependant, vu les contraintes de temps d'observations ainsi que la quantité limitée d'observations obtenues, il n'est pas possible de tirer de conclusion au sujet de la dépense énergétique totale des travailleurs.

L'observation du travail n'a pas eu d'impact direct sur l'élaboration de la matrice de critères ergonomiques de conception de la veste de refroidissement. Il s'agit surtout d'une cueillette de données visant à confirmer l'intensité du travail physique des mineurs en mine profonde et d'approfondir nos connaissances des tâches effectuées par ceux-ci. Cette expérience sera utile pour permettre à d'autres chercheurs d'obtenir des données plus représentatives de la dépense énergétique des travailleurs et d'être mieux préparés à de futures cueillettes de données.

Le chapitre suivant présentera les conclusions de notre recherche.

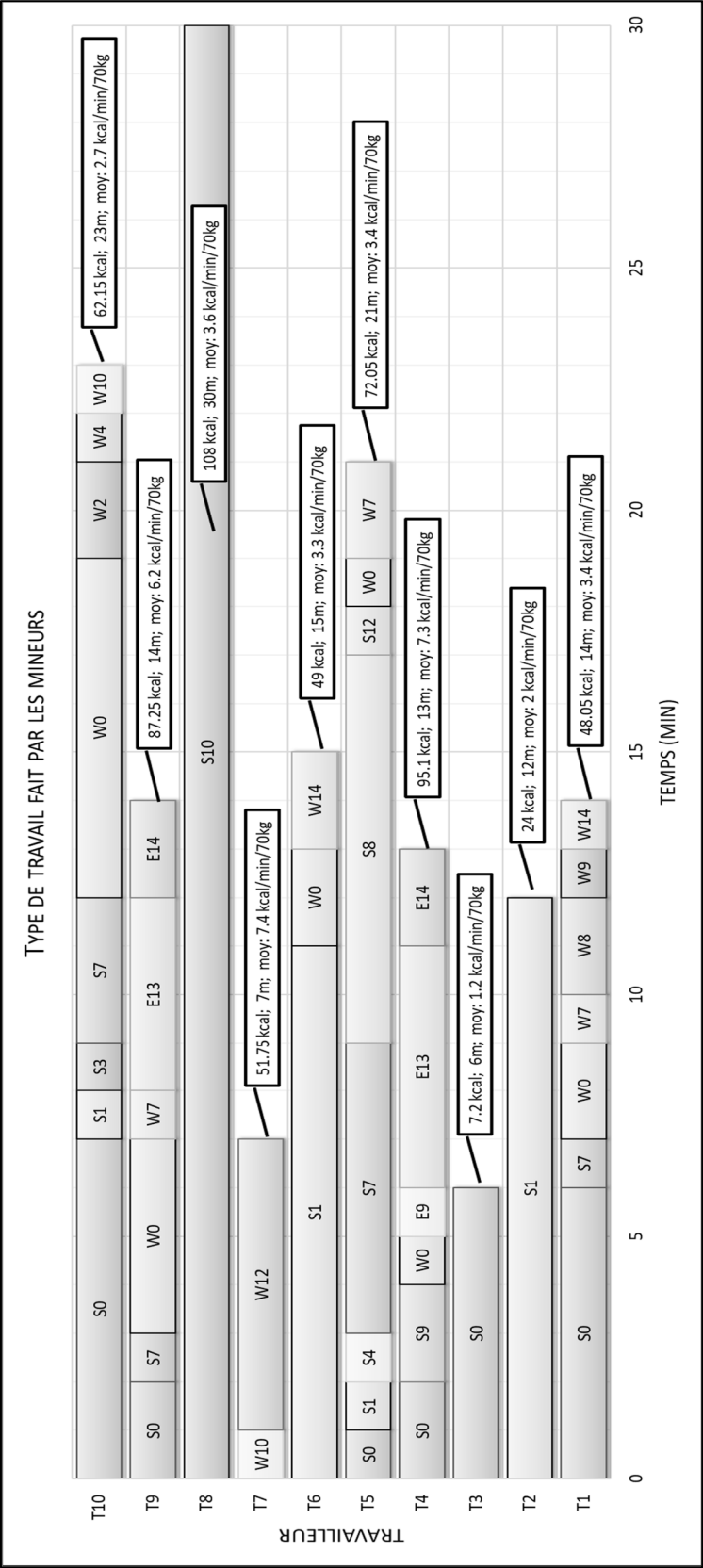


Figure 4.1 Type de travail effectué par les mineurs

Tableau 4.1 Activités détaillées

TYPE	DÉTAIL	TYPE	DÉTAIL	TYPE	DÉTAIL
S0	Discussion avec collègue	W0	Déplacement marche	E9	Coupe bout de bras avec des pinces le grillage
S0	Attente que les autres travailleurs écaillent ou installent la foreuse manuelle	W0	Marche au tracteur pour autre équipement / outils		
S0	Commande manuelle de foreuse à diamant, devant panneau de contrôle utilisation des petits leviers à la main	W0	Prise de mesures le long structure d'acier		
S0	Bois de l'eau			E13	Écaillage paroi
S0	Enlève deux morceaux d'une jumbo et vérifie l'intégrité	W2	Marche tenant casque 1 main	E13	Soulève la foreuse et vérifie les tuyaux
S0	Attend sur le côté			E13	Maintien de la foreuse
S0	Écriture dans carnet	W4	Marche avec boîte de fil soudure		
				E14	Tiens à bout de bras un grillage
S1	Installation masque soudure	W7	Marche et remet les boulons (manuellement 2 bras)	E14	Bras de levier contre le chariot de mine
S1	Utilisation du tuyau dans le trou (pour distribuer l'amorce)	W7	Marche avec plusieurs outils		
S1	Enfile la mèche dans le tuyau	W7	Transporte équipement à la main		
S1	Test sur jumbo (assis dans siège)	W7	Tuyau de résine à sortir		

Tableau 4.1 Activités détaillées (suite)

TYPE	DÉTAIL	TYPE	DÉTAIL	TYPE	DÉTAIL
S1	Agenouillé au niveau du sol en train de mettre les amorces et la poudre à l'aide d'une barre	W8	Soulever de la remorque des treillis métalliques		
S3	Ajustement du harnais	W9	Soulever caisse		
S4	Vissage du boulon	W10	Déplacement échelle 2 mains		
S4	Démontage d'une pièce mécanique				
		W12	Utilisation de la foreuse manuelle (versadrill model heli 1500)		
S7	Démontage pièce mécanique à deux bras mais stationnaire				
S7	Soudure à genoux	W14	Transport de foreuse à béquille		
S7	Conduite d'un tracteur	W14	Marche avec sac et équipement (2x20kg)		
S7	Relie des maillons de jonction d'air comprimé à la foreuse				
S8	Desserre des boulons sur jumbo				
S9	Coupe le grillage (pas à bout de bras)				
S10	Conduite d'une chargeuse				
S12	Visse boulon clé anglaise en utilisant tout son corps				

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les travaux de ce mémoire devaient répondre à plusieurs objectifs. Premièrement, déterminer les contraintes et les exigences de l'environnement en mine profonde et ultra-profonde. Deuxièmement, trouver les critères à prendre en compte pour mettre au point un équipement de protection individuelle. Troisièmement, la réceptivité des mineurs à l'égard d'une nouvelle technologie et la cueillette d'information complémentaire à la revue de littérature. Finalement, il fallait créer une matrice contenant les critères de conception ergonomique à utiliser pour évaluer toute veste de refroidissement proposée pour les mines profondes et ultra-profondes.

Pour répondre à ces objectifs, une revue de littérature a été effectuée. Cette revue a permis de relever que l'esthétique, la convivialité, l'environnement de travail, la dépense énergétique et l'entretien sont tous des critères importants à considérer dans la création de la matrice.

Une étude de terrain a ensuite été réalisée en Abitibi-Témiscamingue, ce qui nous a permis de cerner que bien que la sécurité, l'efficacité et l'autonomie de la veste soient importants pour les concepteurs, le confort et la facilité de mouvement sont une priorité pour les mineurs et seront un facteur marquant dans leur acceptation du produit.

Suite à ces deux étapes, une matrice de critères ergonomiques a été conçue. L'exploitation minière profonde et ultra-profonde est déjà un fait accompli. Les mineurs sont confrontés à de la chaleur et de l'humidité au-delà des niveaux acceptables. La gestion du risque privilégie la protection intrinsèque, le changement des méthodes de travail, l'installation de dispositifs de protection collective et seulement en dernier recours, les ÉPI pour la réduction du risque. Un ÉPI sera donc utile pour assurer que le travail continue tout en protégeant les travailleurs jusqu'à ce qu'un moyen plus efficace de réduction du stress thermique soit atteint.

De l'observation de travail a également été effectuée et bien que non nécessaire à notre étude, permettra aux chercheurs de déterminer des stratégies plus efficaces de cueillette de données dans la mine et a aussi contribué à améliorer notre connaissance des différentes tâches accomplies par les mineurs.

À notre connaissance, il n'existe aucune matrice connue de critères ergonomiques pour aider à réaliser une conception appropriée d'une veste de refroidissement destinée à cet usage. Cette matrice devra évidemment être validée.

ANNEXE I

LISTE DES PUBLICATIONS

Article de revue avec comité de lecture (Chapitre 3)

Ngô, V. T. M. and Nadeau, S. and Hallé, S. 2017. « Ergonomic criteria for the design of a cooling vest in deep and ultra deep mining environments ». Soumis à la revue Occupational Ergonomics le 15 août 2017.

Conférences avec comité de lecture (Annexe II)

Hallé, S. and Ngô, V. T. M. and Nadeau, S. 2018. « Usability testing for ergonomic criteria matrix: case study of a deep mining cooling vest » Communication lors de la conférence: ICOH 2018 (Dublin, Ireland) – accepté le 31 août 2017.

Ngô, V. T. M. and Nadeau, S. and Mackowiak, J. and Hallé, S. 2016. « Ergonomic challenges in designing personal cooling equipment for ultra-deep mining ». In Advances in Ergonomics in Design: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Ergonomics in Design, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA (Florida, FL, USA, July 27-31, 2016) Coll. « Advances in Intelligent Systems and Computing », vol. 485. , pp. 757-767. Springer International Publishing.

Conférencière invitée (Annexe IV)

Ngô, V. T. M. and Nadeau, S. and Hallé, S. 2016. « Facteurs humains appliqués au développement d'une veste refroidissante ». Communication lors de la conférence : Conférence mensuelles en sécurité du travail et contrôle des risques industriels, ÉREST, ÉTS, AQHSST (Montréal, QC, Canada, 16 juin 2016).

Conférence sans comité de lecture

Hallé, S., Nadeau, S., Vinches, L., Al-Sayed, C. et Ngo, V. « Développement d'un vêtement de refroidissement individuel adapté au travail en mines profondes : évaluation des technologies existantes », Conférence Québec Mines, Centre des Congrès de Québec, Québec, Canada, 23 novembre 2016.

Communication par affiche avec comité de lecture (Annexe III)

Ngô, V. T. M. and Nadeau, S. and Hallé, S. 2016. « Veste de refroidissement adaptée au travail en mines ultra-profondes, critères ergonomiques ». Affiche présentée lors de la conférence : 38e congrès de l'AQHSST : comportements sécuritaires, les tiens, les miens, les nôtres (Shawinigan, QC, Canada, 18-20 mai 2016).

ANNEXE II

ARTICLE DE CONFÉRENCE AHFE 2016

ERGONOMIC CHALLENGES IN DESIGNING PERSONAL COOLING EQUIPMENT FOR ULTRA-DEEP MINING

Valérie Tuyêt Mai Ngô¹, Sylvie Nadeau¹, Justine Mackowiak², Stéphane Hallé¹

¹ École de technologie supérieure, Montréal, Canada

² École d'ingénieur du CESI, France

valerie.ngo.1@ens.etsmtl.ca, sylvie.nadeau@etsmtl.ca, mackowiakjustine@hotmail.fr,
stephane.halle@etsmtl.ca

Publié dans *Advances in Ergonomics in Design. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 485. Springer, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-41983-1_68

Abstract. In ultra-deep mining, given the difficulties of the environmental conditions of heat and humidity and technical difficulties of ventilation and refrigeration miners must face, the idea of personal cooling equipment is becoming an interesting avenue. To the best of our knowledge, no such equipment is currently available on the market. To design this type of equipment, specific requirements must be met to ensure a miner's safety and productivity. To define these requirements, the authors undertook a literature review on the topic of constraints and requirements miners are faced with in deep and ultra-deep mining conditions. The results show that scientific and grey literature is scarce. A field study will be necessary to complete our knowledge and understanding of working conditions in Canadian ultra-deep mines. A matrix of requirements can then be established to design appropriate personal

cooling equipment for ultra-deep mining workers and eventually, other hot and humid work environments.

Keywords: Ultra-deep Mining · Personal Cooling Equipment · Work Conditions · Ergonomic Constraints and Requirements · Miner

1. Introduction

Easily accessible lodes of mineral are slowly becoming depleted, but the need for new minerals has not diminished. Mining companies are thus following the veins deeper into the rock as far as 2,5 km, a depth that is considered to be ultra-deep mining. While some countries like Sweden and Australia have not reached these depths, some South African gold mines have already reached depths beyond 3 km [1]. In Sweden, the world's largest iron mine, Kiruna, is at a depth of 2 km, while in Australia, Mount Isa's Glencore mine (copper) reaches 1,8 km [2]. In Canada, for instance in the province of Quebec, one gold mine currently operates at a depth of 3,1 km and is evaluating the possibility of increasing to a depth of 3,7 km (Mines Agnico Eagle Limited, 2015).

One of the main challenges associated to greater depths is the increased and ever present levels of heat and humidity that can sometimes exceed 40°C and 75% respectively [3]. The resulting heat stress can affect a miner both physically and psychologically [4]. With the added difficulty of providing adequate cooling and ventilation, which can represent around 18% of a mine's production costs [5], the idea of a personal cooling system could be an interesting alternative. After all, a mining company relies to a certain extent on its workforce to be productive as well as cost effective.

However, to be able to design this type of equipment, it is necessary to understand the current conditions miners deal with in their everyday work. This is why this literature review focuses on miners, the constraints and requirements they are faced with in deep mining and

ultra-deep mining with an emphasis on Canadian workers. This review includes both the working conditions and environmental conditions.

2. Method

To make sure that the most recent data was consulted, a systematic search of the available literature was limited to 1995 and beyond, in both French and English and using the following keywords: “mining”, “deep mining”, “ultra-deep mining”, “heat stress”, “working conditions”, “workload”, “underground miner”, “environment”, “constraints”, “acclimatization”, “safety”, “vibration” and “miner”.

Scientific resources and grey literature were consulted: Interdisciplinary databases (Inspec/Compendex and Scopus); Canadian libraries (Nelligan, BiblioÉTS); Canadian websites: *Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)*, the *Commission des normes, de l'équité, de la santé et la sécurité du travail (CNESST)*, Natural Resource Canada (NRC), the Mining Association of Canada (MAC), Canadian Mining Journal (CMJ) and the Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur minier (ASPMines)); websites from other countries: Chamber of mines of South Africa (CM, South Africa), the *Institut national de recherche et de sécurité (INRS, France)*, and the Human Factors and Ergonomics Society of Australia Inc. (HFESA, Australia).

Metalliferous mine documentation was preferred to coal or other types of mines because Quebec's deepest mines are gold mines. If the literature found was an article from peer-reviewed journals or conferences, the abstract was read and if the description matched the focus of this review, the entire article was read. For books, the table of contents was perused for relevant information. Finally, the “snowball” technique was used on the initial documentation selection.

3. Results

3.1. Definitions

Contrainte in French can be interpreted in our situation as both a constraint and a restraint. In his 1984 work, Sperandio defines constraint as the work requirements for a given workstation under given working conditions independently from the operators' characteristics [6]. *Strain* according to Sperandio is the consequences of the constraint on the operator. It can be either physiological or psychological. *Exigence* in French or requirement is "A need or expectation that is stated, generally implied or obligatory." [7]

3.2. Laws and Regulations in Quebec

In Quebec, metalliferous mines are subjected to two laws. The Mining Act (chapter M-13.1) regulates prospecting, claims and other such information. The *Loi sur la santé et sécurité du travail (LSST)* covers health and safety aspects and includes the special regulation called *Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (RSSM)*.

Protective Equipment. The RSSM lists mandatory equipment that a miner must wear during his work [8]. This includes:

- A safety harness
- A hard hat with variable accessories (earmuffs, headlamp, radio)
- Safety shoes or boots equipped with a metatarsal protector
- A scaling bar (if the miner has tasks involving scaling)
- Respiratory protective equipment (if the miner operates an excavating machine)
- Safety glasses

According to the Mining Industry Human Resources Council (MIHRC) miners will also wear a coverall with reflective markings, hearing protection and gloves [9]. Kenny et al. estimate that the overall weight of the coverall and the following protective equipment: hard hat with earmuffs, mining light and battery pack, safety belt, protective eyewear, work gloves, and

PVC protective safety boots, is 8,5 kg [3]. The approximate weight of the most commonly used protective equipment can be found in the following table.

Tableau-A II-1 Approximate weight of protective equipment based on information found on DBI-Sala website and the MIHRC

Equipment	Approximate weight
Safety Harness	3,0 kg
Safety belt	3,0 to 8,0 kg
Hard hat and accessories	0,5 to 1,5 kg
Safety shoes (or boots)	2,0 to 4,5 kg
Scaling bar	2,0 to 14 kg
Respiratory protective equipment	0.017 (N95 mask) to 25 kg (self-contained breathing apparatus)
Safety glasses	N/A
Gloves	N/A
Coverall	N/A

Mine Regulations. It is important to mention that each particular underground mine has its own regulations. Alas, it is impossible to list them all as they differ by country and company.

3.3. Shift Length and Effective Work Time

The shift length duration agreed by most authors is between 8 to 12 hours [3, 9-12]. As heat rises, the miner can undergo heat stress, which can then lead to heat-related illness in which Donoghue includes heat stroke, heat exhaustion, heat cramps and miliaria rubra (a skin rash that can develop after abundant sweating) [13]. In Quebec, the *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* sets limits concerning the work/rest periods when under thermal strain [14] using the Wet Bulb Globe Temperature method (WBGT). This means that miners, when exposed to higher levels of heat, will have an effective work time that is less than their work shift duration.

Another strategy implemented by workers is self-pacing, which is when workers adjust their work rate to minimize or avoid physiological strain [15]. Xiang et al. state that self-pacing “has been found to reduce heat strain in construction and mining industries in Australia,

Germany and the United Arab Emirates” [16]. During their case study on physiological demands of miners, Kenny et al. speculated that the small difference in average core temperature between significantly different mining jobs might be due to self-pacing. While some authors encourage self-pacing [13, 17], others such as Xiang et al. and Brakes and Bates state that it might put the miner or productivity at risk [12, 16].

3.4. Environmental Factors

Many factors can jeopardize a miner’s physical as well as psychological safety in a mine. Table 2 summarizes the environmental factors most prevalent in the literature, however for the sake of brevity not all literature was cited in the table. The factors most likely to cause difficulties with personal cooling equipment are temperature, vibrations, humidity and dust.

Tableau-A II-2 Environmental factors in the mines

Source	Environmental factors which the miner faces
Maurya et al.[4]	Heat stress
MIHRC[9]	Unsafe ground or terrain, extreme temperatures, dust, humidity, vapors/fumes, noise, electrical hazards, sharp tools, working in heights, vibration, moving objects or vehicles, confined work site
Walton et al. [18]	Rock stress
You at al. [19]	High temperatures, pressure, humidity, noise, toxic and harmful gases.
Beaupré, S. [20]	Absence of light, exposure to silica and other contaminants, dust, abrupt temperature changes, contaminated air (from machines and dynamite explosions), high humidity, high volumes of sound, open holes, dust, noise, danger of wall or ceiling collapsing

Heat. In his article, Wagner lists natural and artificial sources of heat. The first natural source is the *temperature of virgin rock* (i.e. undisturbed rock) or geothermal gradient, which increases with depth and will subsequently transfer itself by conduction or during transport. The second is *auto-compression* by which the temperature increases due to a conversion of energy. Wagner declares “the principle of conversion of potential energy into enthalpy

applies to any fluid and as such is also of importance when water flows into a mine.” A difference of 1000 m in vertical depth amounts to a rise of 9,66°C for air and 2,34°C for water. This is significant if water is used for cooling in the mine.

As to artificial sources, Wagner mentions the *thermal engines* (diesel, electrical and compressed air operated equipment) as well as *explosives* and *people* [21]. There are other sources of heat but they contribute only 3% to the overall temperature. The figure below summarizes the heat source contribution by type.

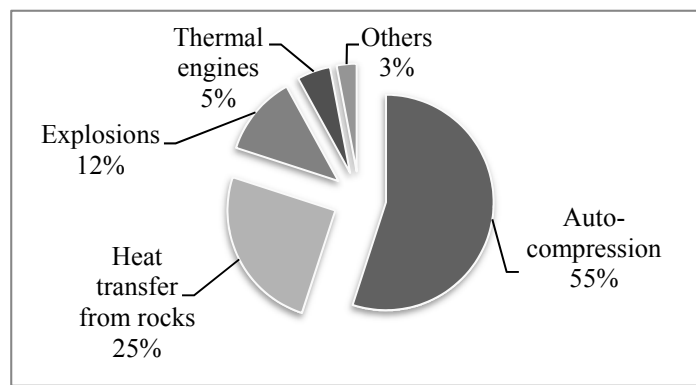


Figure-A II-1 Proportion of heat sources by percentage at 3 km underground

Heat Stress Indices, Standards and Limits. Tripti et al. define heat stress as “a state of the body where it is unable to dissipate the extra heat from the body to the environment.” This can be measured using heat stress indices of which 45 are listed in the article [4]. There has been debate over which type of heat stress indices are best suited to evaluate the heat strain of miners and justify the enacting of preventative measures. Quebec laws ascertain heat strain using the WBGT index which is also widely used and recognized worldwide given that ISO and the National Institute of Occupational Safety and Health endorse it [1, 14]. WBGT factors in dry bulb temperature, vapour pressure or relative humidity, mean radiant temperature and air velocity. However, Dessureault and Doucet stated that as of 1,7 km deep, the WBGT is no longer appropriate [22]. In his review Webber et al. state that different environmental conditions can result in the same WBGT and that the wet-bulb

temperature is a good tool for routine monitoring. Webber et al. stress that while the wet-bulb index correlates decently with the physiological strain of workers, it evaluates only a single environmental component of heat stress. Dessureault and Doucet recommend the use of both the WBGT and ISO 7933 indices under certain conditions as follows: control of worker acclimatization, application of correlation factors for clothes worn, application of the more conservative measures, close medical follow-ups of the workers, training on thermal strain conditions and finally keeping water available at all times [23]. In his most recent work about the relevance and use of heat stress indices in Quebec, Dessureault mentions that the WBGT's valid range ends at around 32°C and does not remain consistent when extrapolated while the ISO 7933 index has a larger range that ends at 39,8°C and which tends to remain valid if extrapolated [24].

Humidity. In underground mining, water can come from two sources: groundwater and mine water [25]. Groundwater comes from rock reservoirs and can either be the same temperature as the surrounding rock or warmer. Mine water comes from drilling and other mining operations. For example, scaling involves dislodging unstable rocks from the walls with a metal bar. However before scaling can be done, walls and ceilings must be thoroughly washed down with water to remove dust and uncover any possible defects [26]. The evaporation of both these types of water releases more heat into the air and also raises the mine's humidity to levels that can be as high as 80% to saturation [15, 22, 27]. High levels of humidity can make it difficult for workers to cool off since sweat cannot evaporate as easily, and sweating is one way the body cools itself [22].

Barometric Pressure. As mining companies mine to lower depths, the deeper the depth, the more the atmospheric pressure or barometric pressure increases. Franz and Schutte state that at a depth of 5 km, the difference in pressure would be an increase of 66% or equivalent to 7 m deep in seawater, which is not enough to cause any effects to a healthy worker performing normal operations [28]. With temperatures that would rise to around 75°C,

mining that deep underground would make human presence highly unlikely. These conditions however are still far from today's reality since even the deepest gold mine currently in operation is at 3,64 km (Tautona mine, South Africa).

Vibrations and Noise. A field study was conducted by Marcotte et al. in 2011 in eight different underground mines in Quebec and on 28 types of mining equipment. The study focused on whole-body vibration exposure and noise. They found that ten of the 28 types of equipment exceeded the 8 h exposure limit for the vibration dose value (VDV) with pneumatic loaders (on rail and on tires) having the highest levels. As for noise, some noise levels for the same pneumatic loaders as well as drilling on aluminum scaffolding exceeded 110 dBA. Marcotte et al. noted that these types of equipment use compressed air to operate [29].

Dust and Mud. Most mine activities such as blasting and scaling generate a fair amount of dust. This dust is then removed, usually with water [26]. Although the issue of dust and particles in the air was raised, no information was found pertaining to dust and mud in deep and ultra-deep mining environments.

Diesel and Other Gases. The two types of gases usually mentioned in the literature are carbon monoxide and nitrogen oxides. Diesel particle matter is another pollutant that has been gaining attention since 2013 when the International Agency for Research on Cancer (IARC) of the World Health Organization (WHO) classified it as carcinogenic to humans [30, 31]. All of these gases result from operations such as drilling and explosions and vehicle circulation in the underground mines [32]. The extraction of minerals relies on diesel powered vehicles [33]. Methane which is a common pollutant and explosive gas in coal mines is not usually found in metalliferous mines since the gas results from the natural decomposition of biomass, which is less present in metalliferous bedrock. Most other references to air pollutants found in the literature are referred to as toxic or hazardous gases without a specific name [19].

3.5. Requirements

Men and Women. Although mining is a line of work mostly occupied by males, miners are not exclusively male. Females are recruited, however in Sweden blue collar workers are 90 to 95% men, numbers that Abrahamsson et al. say are similar in other countries such as India and Australia [10]. In a 2006 report published by the Women in Mining Canada organization, based on a census by Statistics Canada, women representation in Mining and Exploration in Canada is 14%. Most of these women occupied jobs in culinary or administrative positions and only 4% worked as underground/surface miners [34].

Strength. Mining activities will vary according to each miner's specialty. Movements such as lifting/lowering, carrying and pulling/pushing will necessitate a certain amount of strength [9]. Table 3 shows a summary of each mining task's strength and positional requirements according to the MIHRC report. Lifting/lowering includes floor to waist, waist to shoulder, floor to shoulder and above the shoulder. Carrying is unilateral and bilateral. Pushing and pulling includes vertical, unilateral and bilateral movement.

Tableau-A II-1 Mining tasks strength and positional requirements.

Task	Lifting/lowering (kg)	Carrying (kg)	Pushing/pulling (kg of force)
Communicate	< 0,5 to 8	1,5 to 2	4 to 22
Prepare to go underground	< 0,5 to 8	1,5 to 2	0 to 22
Perform general inspection	2 to 51	2 to 51	Negl. to 10
Perform general services	1 to 51	1,5 to 47	1 to > 50
Scale loose rocks	< 0,5 to 14	1 to 14	3 to 20+
Install staging	2 to 51	1,5 to 51	Negl. to 50+
Drill rock	2 to 51	1,5 to 51	6 to 50+
Install ground support	2 to 51	1,5 to 51	3 to 50+
Blast rock	< 0,5 to 25	1,5 to 25	5 to 10+
Muck	2 to 51	2 to 51	5 to 20+
Perform haulage duties	2 to 25	2 to 25	5 to 20+

Metabolic Rate. Metabolic rates of miners may vary depending on the tasks. The maximum metabolic rate corresponds to the maximum speed at which heat can be dissipated from a body. Kenny et al. evaluated six different mining jobs with 36 participants in non-heat stress conditions to assess the physiological demands of their work. It was found that from between 3% to 16% of the work shift duration, miners exceeded what ISO 7243 classifies as very heavy work (metabolic rate superior to 468 W). Their core temperature also rose above the 38°C threshold recommended by the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Kenny et al. expressed concern on the fact that if miners exceeded recommended values in non-heat stress conditions, what would happen to these same miners in the actual heat stress conditions they would face at lower depths [3].

4. Discussion

Ultra-deep Mining Literature. Ultra-deep mining literature is scarce with less than 30 results in the Compendex/Inspec database and less than 100 in Scopus. However, the authors

concede that mining tasks are similar at any level, thus expanding the research to underground mining and deep mining expanded their knowledge of the mining environment.

The information collected, such as the current weight of the protective equipment, the effective work time and the best heat stress indices will certainly assist in determining the maximum weight of personal protective equipment (PCE), the autonomy of this equipment and the best way to validate its effectiveness. The fact that there is no data in the literature on certain topics relevant to the design matrix of the PCE will be challenging. For example, data on dust and mud is inexistent yet important for certain aspects such as the upkeep of the equipment. To check the accumulation of dust and mud on the equipment, measurements will have to be taken in the short, mid and long term. Other topics while well documented will still pose a problem. For example, cooling the miner will almost certainly lead to condensation on the equipment or the miner. As for humidity, more energy is needed to remove moisture from air than to cool it down and as for vibrations, they will also have to be taken into account as they could damage small electronics embedded in the PCE.

The literature review brought to the authors' attention an known variable called self-pacing, which will have to be assessed and most likely regulated in the field tests, otherwise some participants wearing the protective cooling equipment might self-pace while others do not and this could affect test results.

To design personal cooling equipment that fits miners in Quebec, access to data related to their anthropometrics is necessary. Unfortunately, to the best of our knowledge, no such specific database exists as of the time of this article. Also, **although** miners are in majority males, personal cooling equipment design has to take into account female characteristics as well.

5. Conclusion

When researching for ultra-deep mining documentation, the authors were forced to recognize that there is very little literature available on the subject, with a combined total of only 130 results from the Scopus and Compendex/Inspec databases. This reveals to what extent ultra-deep mining is a recent trend and how little is known about the conditions workers face at those depths. No case studies on worker metabolic rate under thermal stress in ultra-deep mines were found, although there were many resources on heat stress, heat tolerance and acclimatization of workers based on traditional thermal stress indices, such as the WBGT. And, while there was no consensus on which thermal stress indices were most efficient in a mine, it would appear that the use of the WBGT index concurrently with ISO7933 would be best to determine whether a worker is under physiological strain.

As scientific and grey literature is scarce, a field study would be necessary to complete our knowledge and understanding of working conditions in Canadian ultra-deep mines to establish the constraints and requirements for personal cooling equipment for ultra-deep mining workers.

Acknowledgments We would like to thank Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FQRNT) for providing financial support for this research as well as the Équipe de recherche en sécurité du travail (ÉREST) of École de technologie supérieure.

References

1. Webber, R.C.W., Franz, R.M., Marx, W.M., Schutte, P.C.: A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 103, 313-323 (2003)
2. Limited, G.G.: *Security solutions : Mining : Mount Isa Mines Queensland*. Gallagher Group (2012)
3. Kenny, G.P., Vierula, M., Mate, J., Beaulieu, F., Hardcastle, S.G., Reardon, F.: A field evaluation of the physiological demands of miners in Canada's deep mechanized mines. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 9, 491-501 (2012)

4. Tripti, M., Kailash, K., Harsha, V., Aruna, M., M. Govinda, R.: Effect of Heat on Underground Mine Workers. *Procedia Earth and Planetary Science* 11, 491-498 (2015)
5. Network, U.D.M.: The business of mining deep: Below 2,5 kms. UDMN (2016)
6. Sperandio, J.-C.: *L'ergonomie du travail mental*. Masson, Paris (1984)
7. normalisation, O.i.d.: *Systèmes de management de la qualité : principes essentiels et vocabulaire (ISO 9000-2000)*. Organisation internationale de normalisation, Genève (2000)
8. Gouvernement du Québec: *Loi sur la santé et la sécurité du travail: Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines*. vol. Chapitre S-2.1, r.14, pp. 127. Éditeur officiel du Québec, Québec (2015)
9. Council, M.I.H.R.: *Underground Miner : The Assessment Report*. MIHR (2009)
10. Abrahamsson, L., Segerstedt, E., Nygran, M., Johansson, J., Johansson, B., Edman, I., Akerlund, A.: *Gender, Diversity and Work Conditions in Mining*. Mining and sustainable development, Lulea University of Technology (2014)
11. Peetz, D., Murray, G., Muurlink, O.: *Work and hours amongst mining and energy workers, first phase report*. Griffith University (2012)
12. Brake, D.J., Bates, G.P.: *Fatigue in Industrial Workers Under Thermal Stress on Extended Shift Lengths*. *Journal of Occupational Medicine* 51, 456-463 (2001)
13. Donoghue, A.M.: *Heat illness in mining*. In: 8th International Mine Ventilation Congress, July 6, 2005 - July 8, 2005, pp. 95-102. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, (Year)
14. Gouvernement du Québec: *Loi sur la santé et la sécurité du travail: Règlement sur la santé et la sécurité du travail*. vol. Chapitre S-2.1, r.13, pp. 109. Éditeur officiel du Québec, Québec (2015)
15. Miller, V., Bates, G., Schneider, J.D., Thomsen, J.: *Self-pacing as a protective mechanism against the effects of heat stress*. *Annals of Occupational Hygiene* 55, 548-555 (2011)
16. Xiang, J., Bi, P., Pisaniello, D., Hansen, A.: *Health Impacts of Workplace Heat Exposure: An Epidemiological Review*. *Industrial Health* 52, 91-101 (2013)

17. Kalkowsky, B., Kampmann, B.: Physiological Strain of Miners at Hot Working Places in German Coal Mines. *Industrial Health* 44, 465-473 (2006)
18. Walton, G., Diederichs, M., Punkkinen, A.: The influence of constitutive model selection on predicted stresses and yield in deep mine pillars - A case study at the Creighton mine, Sudbury, Canada. *Geomechanik und Tunnelbau* 8, 441-449 (2015)
19. You, B., Wu, C., Li, J., Liao, H.: Physiological responses of people in working faces of deep underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology* 24, 683-688 (2014)
20. Beaupre, S.: La perception du risque sous terre: L'exemple des mineurs de fond de l'Abitibi-Temiscamingue. vol. NR83622, pp. 223-n/a. Université de Montreal (Canada), Ann Arbor (2011)
21. Wagner, H.: The management of heat flow in deep mines. *Mining Report* 149, 88-100 (2013)
22. Dessureault, P.C., Doucet, M.: R-350 Évaluation des indices de contraintes thermiques en mines profondes. IRSST (2003)
23. International Standards Organisation: Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain. pp. 34. International Standards Organisation, Geneva, Switzerland (2004)
24. Dessureault, P.C., Oupin, P., Bourassa, M.: R-824 Pertinence et conditions d'utilisation des indices thermiques dans le contexte québécois. (2014)
25. Maurya, T., Karena, K., Vardhan, H., Aruna, M., Raj, M.G.: Potential Sources of Heat in Underground Mines – A Review. *Procedia Earth and Planetary Science* 11, 463-468 (2015)
26. Pelletier, L.: Apprendre l'écaillage aux nouveaux travailleurs. *Belmine*, vol. 42, pp. 24. Commission de la santé et de la sécurité du travail, Québec, Canada (2015)
27. Xiaojie, Y., Qiaoyun, H., Jiewen, P., Xiaowei, S., Dinggui, H., Chao, L.: Progress of heat-hazard treatment in deep mines. *Mining Science and Technology* 21, 295-299 (2011)
28. Franz, R.M., Schutte, P.C.: Barometric hazards within the context of deep-level mining. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* 105, 387-389 (2005)

29. Marcotte, P., Ouelette, S., Boutin, J., Leblanc, G.: R-682 Évaluation des vibrations et du bruit des équipements miniers. IRSST (2011)
30. http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php
31. van Jaarsveld, S., du Plessis, J.N., Pelzer, R.: A control system for the efficient operation of Bulk Air Coolers on a mine. In: 2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 18-19 Aug. 2015, pp. 133-137. IEEE, (Year)
32. Lv, Z., Hu, N., Li, G.: Analysis of factors affecting the human behavior safety in metal underground mines. In: International Conference on Management and Service Science, MASS 2011, August 12, 2011 - August 14, 2011, pp. IEEE Wuhan Section; Wuhan University; Nankai University; Fuzhou University; University of Science and Technology Beijing. IEEE Computer Society, (Year)
33. Grenier, M.: R-436 Measurement of Carbon Monoxide in Diesel Engine Exhaust. IRSST (2005)
34. Women in Mining Canada: Ramp-UP: A Study on the Status of Women in Canada's Mining and Exploration Sector. Mining Industry Human Resources Council (2010)

Veste de refroidissement adaptée au travail des mines ultra-profondes, critères ergonomiques

Valérie Tuyét Mai Ngô, Sylvie Nadeau, Stéphane Hallé

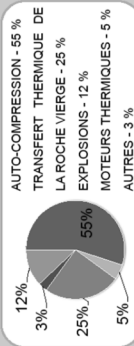
École de technologie supérieure (ÉTS); (valerie.ngo.1@etsmtl.ca, sylvie.nadeau@etsmtl.ca, stephane.halle@etsmtl.ca)



1 – MISE EN CONTEXTE

Épuisement des ressources minières en faible profondeur ce qui oblige l'exploitation de mines ultra-profonde > 2,5 km

A 2,5 km la contrainte thermique peut atteindre 40 °C et 75% d'humidité¹



Sources d'humidité² : l'eau souterraine et l'eau de la mine (pour l'abattage de la poussière principalement)

Conséquences sur le mineur¹:

- Effet sur la santé: épuisement par la chaleur
- Effet sur la sécurité: perte de concentration et de vigilance

Il n'existe pas de veste refroidissement spécifiquement pour les mines profondes sur le marché actuellement

2 - OBJECTIF

Créer une **MATRICE DES CRITÈRES ERGONOMIQUES** de conception et performance d'une veste de refroidissement qui répond aux besoins et aux attentes des mineurs.

3 - MÉTHODOLOGIE

Revue de littérature sur les contraintes et les exigences du travail en mines profondes

Étude de terrain (14 au 17 mars 2016) Abitibi-Témiscamingue
Entrevues semi-dirigées et observations

4 - ANALYSE – Revue de littérature

Poids des ÉPI: 8,5¹ à ~31 kg (casque, bottes, lunette, ceinture, lumière, gants, etc.)

Temps effectif de travail ~5 h sur quart de 8 à 12 h

Mesure de la contrainte thermique:

- WBGT (Réglementation du Québec)
- ISO 7933



Autres critères considérés⁴

Poussière	Anthropométrie
Vibration	Métabolisme,
Mouvements des travailleurs	Etc.



6 – À VENIR

- Revues de la littérature complémentaires en fonction des éléments recueillis par l'étude de terrain
- Recherche des méthodes d'évaluation des différents critères de la matrice
- Création de la matrice

7 – RÉFÉRENCES

1. Kenny, G.P. et al., Journal of Occupational and Environmental Hygiene 9, 491-501 (2012)
2. Maurya, T. et al. Procedia Earth and Planetary Science 11, 463-468 (2015)
3. Gouvernement du Québec, Chapitre S-2.1, r.13, pp. 109. Editeur officiel du Québec, Québec (2015)
4. Council, M.I.H.R.: Underground Miner: The Assessment Report. MIHR (2009)

8 – REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies (FQRNT) pour leur support financier dans cette recherche

ANNEXE IV

POWER POINT MIDI-ÉREST

CONFÉRENCES SCIENTIFIQUES
Sécurité des travailleurs et contrôle des risques industriels



Facteurs humains appliqués au développement d'une veste refroidissante

Valérie Tuyêt Mai Ngô, ing jr.
Étudiante au M. Sc. A. Génie des risques en santé et sécurité du travail
Directrice: Sylvie Nadeau, co-directeur: Stéphane Hallé
16 juin 2016



Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

2



Mise en contexte

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

Photo: Valérie Tuyêt Mai Ngô, Mars 2016

3

Exploitation minière

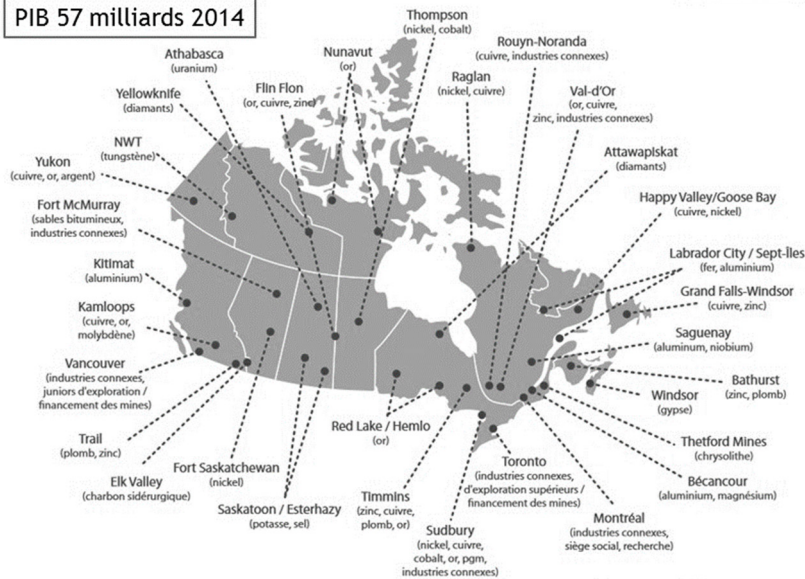


Référence: Nadeau et al., 2013.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

4

PIB 57 milliards 2014



Source: Association minière du Canada, 2015.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

5

Industrie minière au Canada

- ▶ Mines souterraines les plus profondes
 - ▶ Onaping (Ontario) : 1.9 km - Nickel et cuivre
 - ▶ Westwood (Québec) : 1,9 km - Or
 - ▶ Creighton (Ontario) : 2.5 km - Nickel
 - ▶ Kidd Creek (Ontario) : 2.9 km - Cuivre et Zinc
 - ▶ LaRonde (Québec - Abitibi-Témiscamingue) : 3.1 km - Or

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

6

Industrie minière au Québec

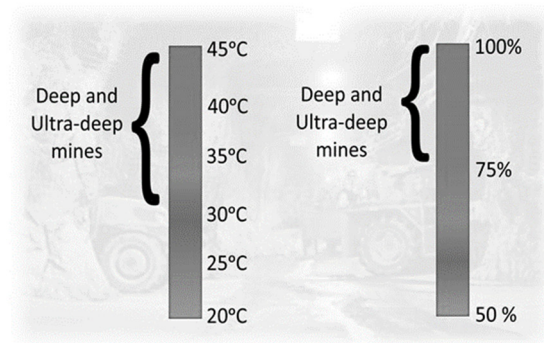
- ▶ En date du 31 décembre 2014
 - ▶ 20 mines en exploitation, 2 mines en construction
 - ▶ 23 projets miniers
 - ▶ 12 907 emplois miniers (86% en exploitation)
- ▶ Prédiction
 - ▶ 19 861 emplois miniers en 2025
- ▶ Surtout concentrées dans les régions de la Côte Nord, de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord du Québec

Référence: Comité sectoriel de l'industrie des mines, 2015.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

7

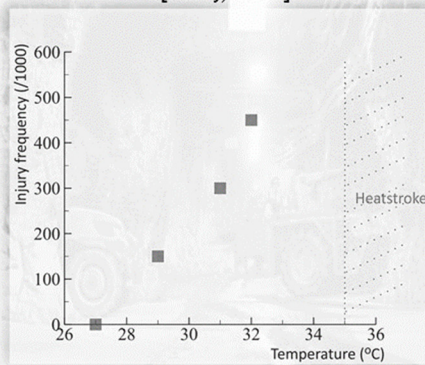
Conditions de travail extrêmes



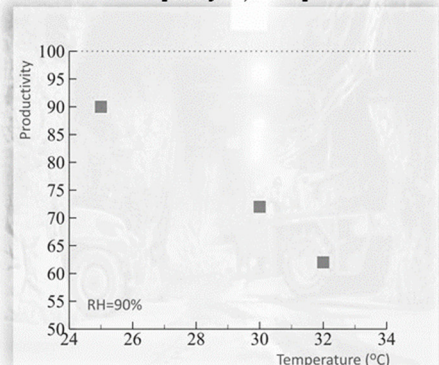
Copyright © 2015 Stéphane Hallé

Conséquences SST

Augmentation de la fréquence des blessures
[Kenny, 2012]



Diminution de la productivité
[Xiaojie, 2010]



Copyright © 2015 Stéphane Hallé

8

9

Conséquences SST

- ▶ Crampe de chaleur
- ▶ Syncope
- ▶ Épuisement dû à la chaleur
 - ▶ Fatigue
 - ▶ Perte de dextérité et de coordination
 - ▶ Difficulté à rester alerte
 - ▶ Nausée et maux de tête
- ▶ Coup de chaleur
 - ▶ Mort



Danger pour le travailleur
Baisse de productivité

Référence: Tripti, Maurya et al. 2015.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

10

Projet

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

11

Mon projet

- Déterminer les contraintes et les exigences du travail en mines profondes
- Déterminer la liste de critères ergonomiques de conception et de performance qu'une veste de refroidissement doit rencontrer.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

12

Une journée dans la mine

- Vidéo d'Agnico Eagle Mining (youtube)

Source: AgnicoEagleVideos, 2015. https://www.youtube.com/watch?v=5DMf-ly_rM4

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

13

Méthodologie

- ▶ Revue critique de littérature sur les contraintes et les exigences du travail en mines profondes
- ▶ Étude de terrain (Abitibi-Témiscamingue)
- ▶ Analyse des résultats
- ▶ Détermination des critères ergonomiques de conception et de performance
- ▶ Détermination des moyens d'évaluation de chacun des critères ergonomiques retenus
- ▶ Création de la matrice de critères

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

14

Facteurs à considérer pour la veste

- ▶ La température ambiante dépasse 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.

Copyright © 2016 Chady Al Sayed

15

Critères d'évaluation d'un équipement de protection

Critères généraux
Dépense énergétique
Conditions climatiques
Entretien
Durabilité
Confort physique
Confort psychosocial
Facilité d'utilisation

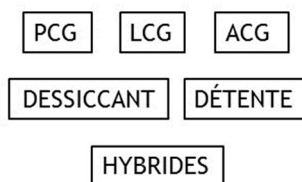
Référence: Desjardins-David, Isabelle. 2010.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

16

Compatibilités des vestes de refroidissement avec le secteur minier

Vestes existantes



Mines profondes

Actuellement, aucune veste de refroidissement individuelle est parfaitement compatible avec la réalité des mines profondes.

Solutions possibles:

- Investir dans autres technologies de refroidissement
- Étudier de nouvelles combinaisons de technologies

Thermoélectrique
Magnétocalorique
Thermoacoustique
Absorption/adsorption
Compression mécanique

Thermoélectrique + Air
Air + Dessiccation
Liquide + Détente
Etc.

Copyright © 2016 Chady Al Sayed

17

Revue de littérature

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

18

Contraintes et exigences

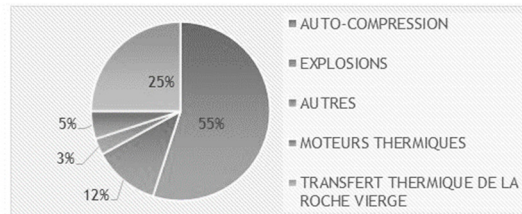
Source	Facteurs environnementaux
Maurya et al., 2015	Contrainte thermique
MIHRC, 2009	Terrain dangereux, températures extrêmes, poussière, humidité, vapeurs/fumées, bruit, risques électriques, outils tranchants, travail en hauteur, vibrations, objet ou véhicule en mouvement, lieu de travail confiné.
You at al., 2014	Températures élevées, pression, humidité, bruit, gaz toxiques et dangereux.
Beaupré, S., 2011	Absence de lumière, exposition à la silice et à d'autres contaminants, poussière, changements abrupts de température, air contaminé provenant des machines ou d'explosions, humidité élevée, niveaux de bruit élevé, trous à découvert, danger d'effondrement des murs ou des plafonds.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

19

Contraintes et exigences

► Sources de chaleur à 3 km sous terre



► Auto-compression

↑ 9,66 °C pour l'air / 1000 m

Copyright © 2015 Stéphane Hallé

20

Contraintes et exigences

► Sources d'humidité sous terre

- Eau souterraine
- Eau de mine (abattage de la poussière)

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

21

Contraintes et exigences

► Port d'équipements de protection



Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

22

Contraintes et exigences

► Équipements de protection (8,5 à ~31 kg^{1,2})

Équipement	Poids approximatif
Harnais de sécurité	3,0 kg
Ceinture de sécurité	3,0 à 8,0 kg
Casque de sécurité avec accessoires	0,5 à 1,5 kg
Chaussures de protection (ou bottes)	2,0 à 4,5 kg
Barre de purgeage / écaillage / sondage	2,0 à 14 kg
Appareil de protection respiratoire	0.017 (masque N95) à 25 kg (appareil autonome)
Lunettes de protections	n. d.
Gants	n. d.
Couvre-tout	n. d.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

23

Contraintes et exigences

- ▶ Temps de travail
 - ▶ Quart de 8 à 12h
- ▶ Temps effectif de travail
 - ▶ ~5h
- ▶ Autorégulation du rythme de travail (*Self pacing*)

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

24

Contraintes et exigences

- ▶ Indices de contrainte thermique
 - ▶ Au moins 45 indices développés depuis 1905
- ▶ Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) - obligatoire
 - ▶ Règlement sur la santé et la sécurité du travail
- ▶ ISO 7933
 - ▶ Ergonomie des ambiances thermiques -- Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible

Référence: Tripti et al. 2015; Dessureault et Doucet, 2003

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

25

Activité métabolique des mineurs

- Insérer vidéo d'un mineur qui apprend à utiliser un jackleg / foreuse à béquille

Source: Maxim Trepanier, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=5FjRJMGQTco>

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

26

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 = $22,0^{\circ}\text{C}$

Copyright © 2012 Kenny et al.

27

Contraintes et exigences

- ▶ Mouvements requis
 - ▶ Soulever / abaisser
 - ▶ Plancher à la taille, la taille à l'épaule, le plancher à l'épaule et au-dessus de l'épaule
 - ▶ Transporter
 - ▶ Unilatéral et bilatéral
 - ▶ Tirer / pousser
 - ▶ Mouvement vertical, unilatéral et bilatéral
- ▶ Ex. Foreuse à béquille, foreuse montante, pose de grillage

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

28

Conclusions de la revue de littérature

- ▶ < 130 résultats pour mines ultra-profondes
 - ▶ Mais situation de travail similaire à moindre profondeur
- ▶ Absence d'information sur le métabolisme des mineurs en situation de contrainte thermique à ces profondeurs
 - ▶ Mais on est capable de voir que c'est déjà problématique même sans contrainte thermique
- ▶ Nécessité de recueillir de l'information terrain
 - ▶ Perceptions

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô



30

Étude de terrain (mars 2016)

- ▶ Comité d'éthique à la recherche de l'ÉTS
 - ▶ Certificat obtenu en janvier 2016
- ▶ Dans la mine en Abitibi-Témiscamingue
 - ▶ Mesures de température et d'humidité
 - ▶ Entrevues semi-dirigées avec des mineurs
 - ▶ Anthropométrie
 - ▶ Perceptions
 - ▶ Observation du travail de mineurs

Résultats préliminaires

- Les données de température confirme la problématique de chaleur

Niveau	T° sèche	%RH
1300 m	28,8° C	100 %
1500m	28,2° C	83%
1900 m	30,0° C	100%
1800 m	35,1° C	98%

↓ Évaporation de la sueur

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

32



Analyse et suite

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

33

En cours

- ▶ Analyse des résultats
 - ▶ Statistique
 - ▶ Anthropométrie
 - ▶ Qualitative
 - ▶ Perceptions des mineurs
- ▶ Détermination des critères de la matrice et les moyens pour les évaluer

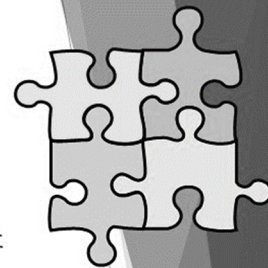


Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

34

À venir

- ▶ 2016 - Rédaction d'un article dans la revue Travail et Santé
- ▶ 2016 Juillet - 7th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (Orlando / É.-U.)
 - ▶ 4th International Conference on Ergonomics In Design
- ▶ 2016 Août - Soumission d'un article scientifique dans un journal scientifique avec résultats
- ▶ 2016 Automne - Soutenance de maîtrise
- ▶ 2018 - 32nd International Congress on Occupational Health (Dublin / Irlande)



Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

Remerciements

- ▶ Mes directeurs Sylvie Nadeau et Stéphane Hallé pour leur encadrement, leur support et leur critique constructive tout au long de ma maîtrise.
- ▶ Le Fonds de recherche du Québec - Nature et technologies pour le support financier de ce projet de recherché.
- ▶ Chady Al Sayed - Pour m'avoir généreusement prêté quelques diapositives de sa présentation à l'AQHSST.
- ▶ L'AQHSST et l'ÉREST pour les bourses qui m'ont été octroyées et m'ont aidé lors de la poursuite de mes études supérieures.

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

36

Questions ?

valerie.ngo.1@ens.etsmtl.ca

Copyright © 2016 Valérie Tuyêt Mai Ngô

Références

- ▶ Comité sectoriel de main d'œuvre de l'industrie des mines. 2015. « Estimation des besoins de main-d'œuvre du secteur minier au Québec 2015-2025 ». Bibliothèque et Archives nationales du Québec. ISBN 978-2-9815352-1-4, 56p.
- ▶ Council, Mining Industry Human Resources. 2009. *Underground Miner : The Assessment Report*. MIHR, 154 p.
- ▶ Desjardins-David, Isabelle. 2010. « L'évaluation des équipements de protection individuelle utilisés en milieu de travail: Considérations et méthodologie proposée ». M.Sc.A., Ecole de Technologie Supérieure (Canada), 202 p.
- ▶ Dessureault, Pierre C., et Mathieu Doucet. 2003. *R-350 Évaluation des indices de contraintes thermiques en mines profondes*. Coll. « Études et recherches »: IRSST, 36 p.
- ▶ Kenny, G. P., M. Vierula, J. Mate, F. Beaulieu, S. G. Hardcastle et F. Reardon. 2012. « A field evaluation of the physiological demands of miners in Canada's deep mechanized mines ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 9, n° 8, p. 491-501.
- ▶ Nadeau, Sylvie, Adel Badri, Richard Wells, Patrick Neumann, Glen Kenny et Douglas Morrison. 2013. « Sustainable canadian mining: Occupational health and safety challenges ». In *57th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting - 2013, HFES 2013, September 30, 2013 - October 4, 2013*. (San Diego, CA, United states), p. 1071-1074. Coll. « Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society »: Human Factors and Ergonomics Society Inc.
- ▶ Tripti, Maurya, Karena Kailash, Vardhan Harsha, M. Aruna et Raj M. Govinda. 2015. « Effect of Heat on Underground Mine Workers ». *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, p. 491-498.

ANNEXE V

APPROBATION DU COMITÉ D'ÉTHIQUE À LA RECHERCHE



Comité d'éthique de la recherche
École de technologie supérieure

Date : 12 janvier 2016

H20151102

Nouvelle

OBJET : **Titre du projet :** Détermination des critères ergonomiques de conception et de performance, phase 1 du projet Développement d'une veste de refroidissement adaptée au travail en mines profondes

Responsable du projet : Sylvie Nadeau

Décision : APPROBATION FINALE

Madame,

Les modifications et précisions demandées par le CÉR dans sa lettre du 22 décembre 2015 ayant été apportées adéquatement, votre projet peut aller de l'avant.

Veillez toutefois noter que cette approbation n'est valable que pour une année, soit jusqu'au 12 janvier 2017. Vous devrez donc annuellement demander le renouvellement de l'approbation au Comité, sans quoi le projet sera considéré comme terminé. Dans la perspective où il devait être terminé, vous devrez fournir un rapport final suivant le modèle disponible sur la page Internet de l'ÉTS. Ce rapport est attendu pour le 31 décembre 2017.

Veillez agréer, Madame, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Caroline Chartrand, M.Sc.
Coordonnatrice
Comité d'éthique de la recherche

DATE DE FIN DE L'APPROBATION
12 janvier 2017

c.c. : Sylvain G. Cloutier, doyen de la recherche
 Paul Gervais, président du CÉR de l'ÉTS

ANNEXE VI

QUESTIONNAIRE ENTREVUES SEMI-DIRIGÉES

Entrevue semi-dirigée auprès de mineurs en Abitibi-Témiscamingue

Questions anthropométriques

1. Poids: _____
2. Âge: _____
3. Stature (taille): _____
4. Grandeur de chandail à manches courtes que vous portez habituellement :

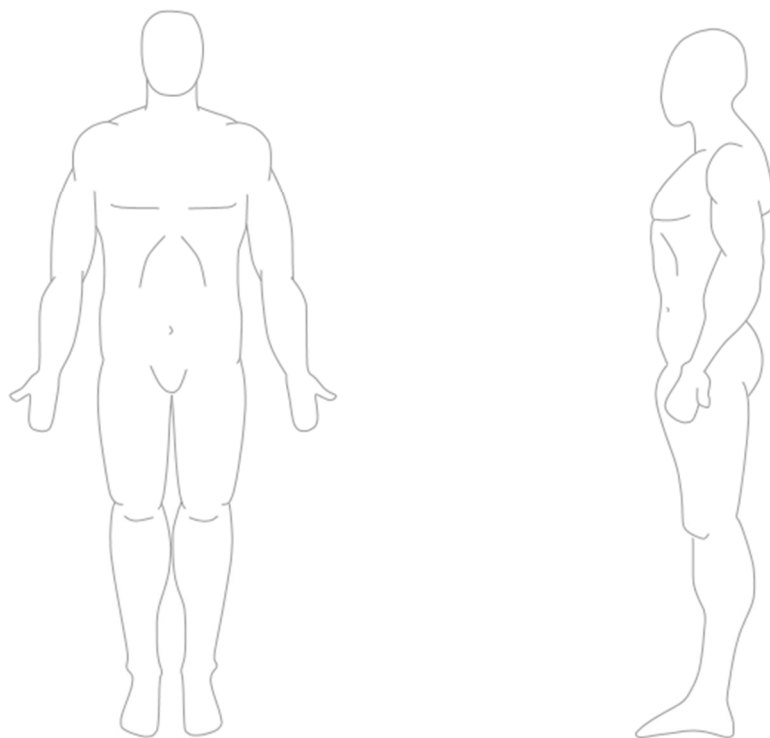
4.1. Marque de chandail à manches courtes (facultatif) : _____

Questions d'emploi

5. Quel est l'emploi que vous occupez dans l'entreprise ?
 - Sondeur;
 - Écailleur;
 - Foreur;
 - Boulonneur;
 - Autre: _____
6. Quelle est la durée totale de votre quart de travail ?
 - 8h
 - 10h
 - Autre : _____

[illegible]

1. Pouvez-vous me dire, à l'aide de l'image suivante, quels sont les endroits où vous avez déjà reçu un choc ou vous vous êtes accroché à quelque chose ?



Crédit: Nanoxyde

Questions sur les ÉPI

1. Quels sont les équipements de protection que vous portez dans le cadre de votre travail et quel est leur type/modèle ?

- Casque; _____
- Bottes; _____
- Lunettes; _____
- Gants; _____
- Couvre-tout; _____
- Bouchons; _____
- Coquilles; _____
- Masques respiratoires; _____

1.1. Est-ce que vous portez des équipements de protection supplémentaires dans le cadre de votre travail? Lesquels ?

2. Trouvez-vous que la création d'une veste refroidissante est une bonne idée ? Pourquoi ?

1. Seriez-vous prêts à essayer une veste refroidissante ?

2. Avez-vous déjà essayé une veste refroidissante dans le passé ?

2.1. Quel était le type de veste que vous avez essayé ?

1-Refroidissement par air

2-Refroidissement par circulation d'un liquide

3-Matériaux à changement de phase (incluant la glace)

4-Thermoélectrique

Autre : _____

ANNEXE VII

GRILLE D'OBSERVATION DES TRAVAILLEURS

		<u>Observation</u>											
Heure : _____		Profondeur : _____											
Date : _____		Température : _____											
Observateur : Valérie Tuyêt-Mai Ngô													
	(Kcal/min)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stationary	Hand	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	0 1 2 3	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Sitting	1 arm	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	4 5 6	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Standing	2 arms	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	7 8 9	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Stooping	Whole Body	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	10 11 12 13 14	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Walking	Hand	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	0 1 2 3	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Slow	1 arm	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	4 5 6	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
&	2 arms	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	7 8 9	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Medium	Whole Body	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	10 11 12 13 14	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Extra	Hand	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	0 1 2 3	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Fast	1 arm	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	4 5 6	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Grade	2 arms	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	7 8 9	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
Soft	Whole Body	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
		----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	10 11 12 13 14	----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- ----- -----											
	(Watts)	70	140	209	279	349	418	490	560	630	700	770	840
Starting Time Hour _____ : 00/30 Min													

Figure 1 : Schéma permettant de coder les activités des travailleurs pour l'estimation de leur charge de travail métabolique (Tayyari, Burford et Ramsey, 1989)

Début (min)	Description de la tâche	SWE	Kcal/min	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				

La méthode SWE(Burford et al., 1984) a été développée en 1984 pour évaluer le coût métabolique du travail effectué dans les mines souterraines. Il est basé sur les données pour un homme standard (âgé de 30 ans, pesant 70kg et mesurant 1,75 m) et donne des valeurs en kilocalories par minute. Une kilocalorie correspond à l'énergie nécessaire pour élever d'un degré Celsius 1 kg d'eau. Le schéma permet 45 combinaisons en fonction de l'activité exercée, l'utilisation des membres et l'intensité du travail.

Explication du code

Attribuer une lettre désignant la catégorie d'activité pertinente (première composante du code) soit, selon le cas :

S : position stationnaire (assise, debout ou courbée, par exemple),

W : marche (lente ou normale), ou

E : effort plus soutenu (ou marche rapide, ascension, marche sur un matériau meuble, montée sur une échelle, marche avec une charge lourde, ou travail exigeant un effort intense).

Attribuer un chiffre désignant la sous-catégorie d'activité pertinente (deuxième composante du code) et son intensité, soit, selon le cas :

0 : mains ou bras immobiles (p. ex., le repos est codé S-0, et la marche lente, M-0).

1 à 3 : l'activité fait appel à une main (1 : léger, 2 : modéré et 3 : intense).

4 à 6 : l'activité fait appel à un bras (4 : légère, 5 : modérée et 6 : intense).

7 à 9 : l'activité fait appel aux deux bras (7 : légère, 8 : modérée et 9 : intense).

10 à 14 : l'activité fait appel à tout le corps (10 : légère, 11 : un peu légère, 12 : modérée, 13 : intense et 14 : très intense).

ANNEXE VIII

GRILLE DE MESURE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

<u>Mesures qui seront prises lors de la visite de la mine en Abitibi-Témiscamingue</u>						
Date : _____						
Heure : _____						
Lieu : _____						
Niveau dans la mine	Température sèche	Température humide	Température radiante	CO ₂	CO	
Chercheur : _____						

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrahamsson, L., Eugenia Segerstedt, Magnus Nygran, J. Johansson, B. Johansson, Ida Edman et Amanda Akerlund. 2014. *Gender, Diversity and Work Conditions in Mining*. Mining and sustainable development. Lulea University of Technology, 52 p.
- Al Sayed, Chady, Ludwig Vinches et Stéphane Hallé. 2016. « Towards optimizing a personal cooling garment for hot and humid deep mining conditions ». *Open Journal of Optimization*, vol. 5, n° 01, p. 35.
- Association française de normalisation. 2000. *Équipements de protection individuelle : sélection, utilisation et entretien* (2000). Paris: Association française de normalisation, xv, 577 p. p.
- ASTM. 2013. *Standard Practice for Body Measurements and Sizing of Fire and Rescue Services Uniforms and Other Thermal Hazard Protective Clothing*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 10 p.
- Beaupré, Sylvain. 2011. « La perception du risque sous terre: L'exemple des mineurs de fond de l'Abitibi-Temiscamingue ». Ph.D. Ann Arbor, Université de Montréal (Canada), 223-n/a p. In ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Bellanca, Jennica, Brianna Eiter et Lisa Steiner. 2013. « Perceptions and usability of a mining vest: High and low seam heights ». In *57th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting - 2013, HFES 2013, September 30, 2013 - October 4, 2013*. (San Diego, CA, United states), p. 1313-1317. Coll. « Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society »: Human Factors an Ergonomics Society Inc.
- Bendkowska, Wiestawa, Anna Bogdan, Kazimierz Kopias et Magdalena Klonowska. 2008. « Thermal manikin evaluation of microclimate cooling vests containing PCMs ». In *4th International Textile, Clothing and Design Conference - Magic World of Textiles, ITC and DC, October 5, 2008 - October 8, 2008*. (Dubrovnik, Croatia), p. 713-718. Coll. « ITC and DC: Book of Proceedings of the 4th International Textile, Clothing and Design Conference - Magic World of Textiles »: Faculty of Textile Technology.
- Bokranz, R., et K. Landau. 2012. *Handbuch Industrial Engineering*, 2, 2. Stuttgart.
- Borland, D., et R. M. Taylor II. 2007. « Rainbow Color Map (Still) Considered Harmful ». *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 27, n° 2, p. 14-17.
- Boudreau-Trudel, Bryan. 2014. « Impact et facteurs clés de l'introduction d'équipements miniers innovants: Le cas d'une mine souterraine ». D.Eng. Ann Arbor, École de Technologie Supérieure (Canada), 254 p. In ProQuest Dissertations & Theses Global.

- Bowling, Ann. 2005. « Mode of questionnaire administration can have serious effects on data quality ». *Journal of Public Health*, vol. 27, n° 3, p. 281-291.
- Brake, D. J., et G. P. Bates. 2001. « Fatigue in Industrial Workers Under Thermal Stress on Extended Shift Lengths ». *Journal of Occupational Medicine*, vol. 51, n° 7, p. 456-463.
- Branson, Donna H., Cheryl A. Farr, Semra Peksoz, Jinhee Nam et Huantian Cao. 2005. « Development of a prototype personal cooling system for first responders: User feedback ». *Journal of ASTM International*, vol. 2, n° 2, p. 274-284.
- Burford, Charles L., Jerry D. Ramsey, Fariborz Tayyari, Chin Hyong Lee et Robert G. Stepp. 1984. « METHOD FOR SYSTEMATIC WORKLOAD ESTIMATION (SWE) ». In *Proceedings of the Human Factors Society 28th Annual Meeting: New Frontiers for Science and Technology*. (San Antonio, TX, USA) Vol. 2, p. 997-999. Coll. « Proceedings of the Human Factors Society »: Human Factors Soc.
- Camara, D., S. Nadeau et S. Echchakoui. 2015. « Perceptions des mineurs de mines ultraprofondes ». In *37e Congrès AQHSST*. (Saint-Sauveur, QC, Canada, 20-22 mai 2015).
- Chan, A. P. C., Y. Yang, D. P. Wong, E. W. M. Lam et Y. Li. 2013. « Factors affecting horticultural and cleaning workers' preference on cooling vests ». *Building and Environment*, vol. 66, p. 181-189.
- Chan, Albert P. C., Y. Yang, Michael C. H. Yam, Edmond W. M. Lam et J. Y. Hu. 2016. « Factors affecting airport apron workers' preference on cooling vests ». *Performance Enhancement & Health*, vol. 5, n° 1, p. 17-23.
- Creswell, John W. 2013. *Qualitative inquiry & research design : choosing among five approaches* (2013), Third edition. Coll. « Qualitative inquiry and research design ». Los Angeles: SAGE, xxi, 448 pages p.
- Debia, Maximilien, Caroline Couture, Pierre-Eric Njanga, Eve Neesham-Grenon, Guillaume Lachapelle, Hugo Coulombe, Stephane Halle et Simon Aubin. 2017. « Diesel engine exhaust exposures in two underground mines ». *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 27, n° 4, p. 641-645.
- Delkumburewatte, Gunathilake Banda, et Tilak Dias. 2012. « Wearable cooling system to manage heat in protective clothing ». *Journal of the Textile Institute*, vol. 103, n° 5, p. 483-489.

- Desjardins-David, Isabelle. 2010. « L'évaluation des équipements de protection individuelle utilisés en milieu de travail: Considérations et méthodologie proposée ». M.Ing. Ann Arbor, Ecole de Technologie Supérieure (Canada), 202 p. In ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Dessureault, Pierre C., et Mathieu Doucet. 2003. *R-350 Évaluation des indices de contraintes thermiques en mines profondes*. Coll. « Études et recherches »: IRSST, 36 p.
- Donoghue, A. Michael. 2005. « Heat illness in mining ». In *8th International Mine Ventilation Congress, July 6, 2005 - July 8, 2005*. (Brisbane, QLD, Australia), p. 95-102. Coll. « Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series »: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Eastman Kodak Company. 2004. *Kodak's Ergonomic Design for People at Work*. Wiley.
- Els, Frik. 2017. « World's deepest gold mine get \$1 billion injection ». < <http://www.mining.com/worlds-deepest-mine-gets-1-billion-injection/> >. Consulté le 2017 05 30.
- Fortin, MF. 2010. « Fondements et étapes du processus de recherche: méthodes quantitatives et qualitatives (collaboration J. Gagnon)(2e éd.) ». *Montréal: Chenelière Éducation (1re éd. 2006)*.
- Fourie, H. J., et T. J. Sheer. 2005. « Investigations into the removal of airborne pollutants from underground ventilating air in a deep hot mine ». In *8th International Mine Ventilation Congress, July 6, 2005 - July 8, 2005*. (Brisbane, QLD, Australia), p. 289-296. Coll. « Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series »: Australasian Institute of Mining and Metallurgy.
- Franz, R. M., et P. C. Schutte. 2005. « Barometric hazards within the context of deep-level mining ». *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 105, n° 6, p. 387-389.
- Gasquet, I., B. Falissard et P. Ravaud. 2001. « Impact of reminders and method of questionnaire distribution on patient response to mail-back satisfaction survey ». *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 54, n° 11, p. 1174-1180.
- Godwin, A. A., et T. R. Eger. 2014. « Ergonomic and usability ratings of helmets and head-mounted personal protective equipment in industry ». *WORK: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, vol. 47, n° 1, p. 23-31.
- Goosen, P., R. Pelzer et H. J. du Plessis. 2015. « A method for accurate electricity budget cost calculations for a deep mine ». In *2015 International Conference on the*

Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 18-19 Aug. 2015. (Piscataway, NJ, USA), p. 155-60. Coll. « 2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). Proceedings »: IEEE.

Gouvernement du Canada. 2017. *Canada Labour Code Law*. Canada. < <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/L-2/index.html> >. Consulté le 2017-05-25.

Gouvernement du Québec. 2015a. *Loi sur la santé et la sécurité du travail: Règlement sur la santé et la sécurité du travail*. Chapitre S-2.1, r.13. Québec: Éditeur officiel du Québec, 109 p. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM >. Consulté le 2016-02-18.

Gouvernement du Québec. 2015b. *Loi sur la santé et la sécurité du travail: Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines*. Chapitre S-2.1, r.14. Québec: Éditeur officiel du Québec, 127 p. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_2_1/S2_1R14.htm >. Consulté le 2015-07-01.

Grenier, Michel. 2005. *R-436 Measurement of Carbon Monoxide in Diesel Engine Exhaust*. Coll. « Études et recherche ». Québec, Canada: IRSST, 29 p.

Hardcastle, S. 2006. « Controlling personnel heat exposure in Canada's deep and highly mechanized mines ». In *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium - 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006, June 5, 2006 - June 7, 2006*. (University Park, PA, United states), p. 259-269. Coll. « Proceedings of the 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium - 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006 »: Taylor and Francis/Balkema.

Hardcastle, S., C. Kocsis et D. O'Connor. 2006. « Justifying ventilation-on-demand in a Canadian mine and the need for process based simulations ». In *11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium - 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006, June 5, 2006 - June 7, 2006*. (University Park, PA, United states), p. 15-27. Coll. « Proceedings of the 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium - 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006 »: Taylor and Francis/Balkema.

Harrower, Mark, et Cynthia A. Brewer. 2003. « ColorBrewer.org: An Online Tool for Selecting Colour Schemes for Maps ». *The Cartographic Journal*, vol. 40, n° 1, p. 27-37.

Henry Dreyfuss Associates, et Alvin R. Tilley. 2002. *The measure of man and woman : human factors in design* (2002), Rev. ed. New York: Wiley, 98 p. p.

- Hoonakker, Peter, et Pascale Carayon. 2009. « Questionnaire Survey Nonresponse: A Comparison of Postal Mail and Internet Surveys ». *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 25, n° 5, p. 348-373.
- International Agency for Research on Cancer. 2016. « IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans ». In *List of classifications, Volumes 1–114*. < http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php >. Consulté le 01/03/2016.
- Kalkowsky, Bernhard, et Bernhard Kampmann. 2006. « Physiological Strain of Miners at Hot Working Places in German Coal Mines ». *Industrial Health*, vol. 44, p. 465-473.
- Kenny, G. P., M. Vierula, J. Mate, F. Beaulieu, S. G. Hardcastle et F. Reardon. 2012. « A field evaluation of the physiological demands of miners in Canada's deep mechanized mines ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 9, n° 8, p. 491-501.
- Koo, H. S., K. P. Teel et S. Han. 2016. « Explorations of Design Factors for Developments of Protective Gardening Gloves ». *Clothing and Textiles Research Journal*, vol. 34, n° 4, p. 257-271.
- Kroemer, K.H.E. 2008. *Fitting the Human: Introduction to Ergonomics, Sixth Edition*. CRC Press.
- Lamb, Jane M., et M. Jo Kallal. 1992. « A Conceptual Framework for Apparel Design ». *Clothing and Textiles Research Journal*, vol. 10, n° 2, p. 42-47.
- Lambert-Racine, Sophy, et Mario St-Pierre. 2010. « Les mines de l'Abitibi-Témiscamingue : un héritage culturel ». *Commission de la santé et la sécurité du travail*, vol. Le Belmine, n° 29, p. 4-5.
- Lombardi, David A., Santosh K. Verma, Melanye J. Brennan et Melissa J. Perry. 2009. « Factors influencing worker use of personal protective eyewear ». *Accident Analysis and Prevention*, vol. 41, n° 4, p. 755-762.
- Lv, Zhenhua, Nailian Hu et Guoqing Li. 2011. « Analysis of Factors Affecting the Human Behavior Safety in Metal Underground Mines ». In *2011 International Conference on Management and Service Science (MASS 2011), 12-14 Aug. 2011*. (Piscataway, NJ, USA), p. 3 pp. Coll. « 2011 International Conference on Management and Service Science (MASS 2011) »: IEEE.

- Marcotte, Pierre, Sylvain Ouelette, Jérôme Boutin et Gilles Leblanc. 2011. *R-682 Évaluation des vibrations et du bruit des équipements miniers*. Coll. « Études et recherche »: IRSST, 197 p.
- Maurya, Tripti, Kailash Karena, Harsha Vardhan, M. Aruna et M. Govinda Raj. 2015. « Potential Sources of Heat in Underground Mines – A Review ». *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, p. 463-468.
- Miller, Veronica, Graham Bates, John D. Schneider et Jens Thomsen. 2011. « Self-pacing as a protective mechanism against the effects of heat stress ». *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 55, n° 5, p. 548-555.
- Mining Industry Human Resources Council. 2009. *Underground Miner : The Assessment Report*. MIHR, 154 p.
- Morgado, Mariana, Mario Talaia et Leonor Teixeira. 2015. « A new simplified model for evaluating thermal environment and thermal sensation: An approach to avoid occupational disorders ».
- Nadeau, Sylvie, Adel Badri, Richard Wells, Patrick Neumann, Glen Kenny et Douglas Morrison. 2013. « Sustainable canadian mining: Occupational health and safety challenges ». In *57th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting - 2013, HFES 2013, September 30, 2013 - October 4, 2013*. (San Diego, CA, United states), p. 1071-1074. Coll. « Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society »: Human Factors and Ergonomics Society Inc.
- Ngô, Valérie Tuyêt Mai, Sylvie Nadeau, Justine Mackowiak et Stéphane Hallé. 2016. « Ergonomic Challenges in Designing Personal Cooling Equipment for Ultra-Deep Mining ». In *Advances in Ergonomics in Design: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Ergonomics in Design, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA*, sous la dir. de Rebelo, Francisco, et Marcelo Soares. Ngô2016. p. 757-767. Cham: Springer International Publishing.
- Organisation internationale de normalisation. 2000. *Systèmes de management de la qualité : principes essentiels et vocabulaire (ISO 9000-2000)*, 2e éd. Coll. « Norme internationale », 9000-2000 (F). Genève: Organisation internationale de normalisation, 30 p.
- Patton, D. A., et A. S. McIntosh. 2016. « Considerations for the performance requirements and technical specifications of soft-shell padded headgear ». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P (Journal of Sports Engineering and Technology)*, vol. 230, n° 1, p. 29-42.

Peetz, David, Georgina Murray et Olav Muurlink. 2012. *Work and hours amongst mining and energy workers, first phase report*. Coll. « Australian Coal and Energy Survey »: Griffith University, 70 p.

Veuillez sélectionner un type de document autre que « Generic » afin de faire afficher la référence bibliographique.

Schutte, A. J., M. Kleingeld et L. Van der Zee. 2014. « An integrated energy efficiency strategy for deep mine ventilation and refrigeration ». In *2014 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 19-20 Aug. 2014*. (Piscataway, NJ, USA), p. 9 pp. Coll. « 2014 International Conference on the Eleventh industrial and Commercial Use of Energy (ICUE) »: IEEE.

Sonderegger, Andreas. 2013. « Smart garments - The issue of usability and aesthetics ». In *2013 ACM Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp 2013, September 8, 2013 - September 12, 2013*. (Zurich, Switzerland), p. 385-392. Coll. « UbiComp 2013 Adjunct - Adjunct Publication of the 2013 ACM Conference on Ubiquitous Computing »: Association for Computing Machinery.

Sonderegger, Andreas, et Juergen Sauer. 2010. « The influence of design aesthetics in usability testing: Effects on user performance and perceived usability ». *Applied Ergonomics*, vol. 41, n° 3, p. 403-410.

Sperandio, Jean-Claude. 1984. *L'ergonomie du travail mental*. Coll. « Collection de psychologie appliquée ». Paris: Masson, 130 p.

Trapani, K., A. Romero et D. Millar. 2016. « Deep mine cooling, a case for Northern Ontario: Part II ». *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 26, n° 6, p. 1033-42.

Tripti, Maurya, Karena Kailash, Vardhan Harsha, M. Aruna et Raj M. Govinda. 2015. « Effect of Heat on Underground Mine Workers ». *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, p. 491-498.

Ultra Deep Mining Network. 2016. *The business of mining deep: Below 2,5 kms*. UDMN.

Uys, D. C., M. Kleingeld et C. Cilliers. 2015. « Converting an ice storage facility to a chilled water system for energy efficiency on a deep level gold mine ». In *2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 18-19 Aug. 2015*. (Piscataway, NJ, USA), p. 76-83. Coll. « 2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). Proceedings »: IEEE.

- van Jaarsveld, S., J. N. du Plessis et R. Pelzer. 2015. « A control system for the efficient operation of Bulk Air Coolers on a mine ». In *2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE), 18-19 Aug. 2015*. (Piscataway, NJ, USA), p. 133-7. Coll. « 2015 International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE). Proceedings »: IEEE.
- Wagner, Horst. 2013. « The management of heat flow in deep mines ». *Mining Report*, vol. 149, n° 2, p. 88-100.
- Webber, R. C. W., R. M. Franz, W. M. Marx et P. C. Schutte. 2003. « A review of local and international heat stress indices, standards and limits with reference to ultra-deep mining ». *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103, n° 5, p. 313-323.
- Women in Mining Canada. 2010. *Ramp-UP: A Study on the Status of Women in Canada's Mining and Exploration Sector*. Canada: Mining Industry Human Resources Council, 37 p.
- Xiang, Jianjun, Peng Bi, Dino Pisaniello et Alana Hansen. 2013. « Health Impacts of Workplace Heat Exposure: An Epidemiological Review ». *Industrial Health*, vol. 52, p. 91-101.
- Xiaojie, Yang, Han Qiaoyun, Pang Jiewen, Shi Xiaowei, Hou Dinggui et Liu Chao. 2011. « Progress of heat-hazard treatment in deep mines ». *Mining Science and Technology*, vol. 21, n° 2, p. 295-299.
- You, Bo, Chao Wu, Ji Li et Huimin Liao. 2014. « Physiological responses of people in working faces of deep underground mines ». *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, n° 5, p. 683-688.
- Yu, Sihong, Megan Strickfaden, Elizabeth Crown et Sara Olsen. 2012. « Garment specifications and mock-ups for protection from steam and hot water ». In *9th Performance of Protective Clothing and Equipment: Emerging Issues and Technologies, June 16, 2011 - June 17, 2011*. (Anaheim, CA, United states) Vol. 1544 STP, p. 290-307. Coll. « ASTM Special Technical Publication »: ASTM International. < <http://dx.doi.org/10.1520/STP104081> >.