

# É

Projets spéciaux

## Études et recherches

RAPPORT R-824



### **Pertinence et conditions d'utilisation des indices thermiques dans le contexte québécois**

*Pierre C. Dessureault  
Pierre Oupin  
Michaël Bourassa*



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

## NOS RECHERCHES

*travaillent pour vous !*

### Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

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

### Pour en savoir plus

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

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine Prévention au travail, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : [www.csst.qc.ca/AbonnementPAT](http://www.csst.qc.ca/AbonnementPAT)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
2014  
ISBN : 978-2-89631-731-8 (PDF)  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
et de la valorisation de la recherche  
505, boul. De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
Télécopieur : 514 288-7636  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
juin 2014



Projets spéciaux

# Études et recherches

■ RAPPORT R-824

## **Pertinence et conditions d'utilisation des indices thermiques dans le contexte québécois**

### **Avis de non-responsabilité**

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Pierre C. Dessureault, Pierre Oupin, Michaël Bourassa*

*Université du Québec à Trois-Rivières*



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

**CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS**

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

## SOMMAIRE

Cette étude s'intéresse à l'ensemble des contraintes thermiques, depuis les grands froids typiques du nord du Québec, jusqu'aux ambiances excessivement chaudes retrouvées dans certaines industries. Six indices thermiques ont été analysés en détail; trois d'entre eux s'appliquent au froid, un au confort thermique et deux visent les conditions excessivement chaudes.

La revue de la documentation scientifique concernant l'exposition au froid révèle que, bien que de moindre importance que l'adaptation comportementale, l'adaptation phénotypique aussi bien que génotypique est observée chez les personnes exposées aux ambiances froides. L'ensemble de tous ces ajustements physiologiques, que l'on nomme acclimatation, influence significativement les réponses physiologiques mesurées en termes de dextérité, de puissance, de capacité d'apprentissage et de mémorisation, de temps de réponse et de mémoire de travail. Les personnes non acclimatées ont une performance et une vigilance moindres et peuvent donc être plus à risque lorsqu'elles sont exposées au grand froid. Il importe donc de considérer et de reconnaître la provenance, de même que l'historique récent de travail au froid des personnes qui ont à affronter ces situations particulières.

Malgré ce qui précède, l'adaptation comportementale, qui s'acquiert en quelques expositions au froid, est plus importante. Il devient ainsi prioritaire d'insister sur la formation des personnes et sur les moyens de protection tels que les abris chauffés et les vêtements dans un programme de gestion de l'exposition au froid. Quoiqu'il en soit, l'ensemble de la documentation révèle qu'un programme de surveillance est pleinement justifié, spécialement pour ces situations où des gens non acclimatés et non accoutumés se trouvent exposés.

Trois indices concernant l'exposition au froid ont été étudiés à savoir : Saskatchewan, Isolement requis ( $I_{req}$ ) et refroidissement éolien. L' $I_{req}$  n'a pas été retenu parce que les valeurs d'isolement des vêtements, strictement nécessaire à son utilisation, ne sont pas disponibles. Aussi, son application exigerait de limiter quelques paramètres à l'intérieur de balises qui ne sont pas définies à ce jour. Malgré qu'il se trouve dans les publications de plusieurs grands organismes depuis trois décennies, la base scientifique de l'indice Saskatchewan n'a pu être retracée et cela inquiète. À l'opposé, le refroidissement éolien est bien connu des milieux intéressés et fort bien documenté. Plutôt vague quant aux mesures de prévention, il faudra considérer enrichir cet indice de recommandations plus précises pour en faire un véritable outil de prévention.

L'indice du Vote moyen prédit et du Pourcentage prédit d'insatisfaits (PMV-PPD) concerne le confort thermique et fait le pont entre les conditions de froid et de chaleur. Son application s'adresse typiquement aux espaces intérieurs et requiert une instrumentation spécialisée, notamment la lecture de la température de globe noir ( $T_g$ ). Ce document définit cependant quelques conditions précises où il est possible de contourner la lecture de  $T_g$  sans perte de précision. Les responsables en climatisation/chauffage des espaces intérieurs aussi bien que les hygiénistes trouveront un intérêt pour cette norme qui permet d'estimer le pourcentage de personnes insatisfaites de l'environnement thermique.

Finalement, pour les environnements thermiques excessivement chauds (WBGT au-dessus de 32 °C), l'étude retient l'utilisation de la norme PHS : ISO 7933. Le domaine d'application de cette norme, dans sa version actuelle, ne dépasse pas 39,8 °C-WBGT, mais son extension jusqu'à

des valeurs dépassant 45 °C se montre cohérente si deux modifications y sont apportées. L'une concerne la sudation maximale des sujets non acclimatés, l'autre la dissipation de la chaleur accumulée. Ces deux modifications corrigent des erreurs méthodologiques déjà présentes dans son champ d'application actuel. La *Short-Term Exposure Limit* proposée en 2009 n'a pas été retenue parce qu'elle montrait des incohérences manifestes et que la documentation scientifique n'a pas validé cette approche.

Des observations sur le terrain ont permis de définir les instruments et approches nécessaires à l'utilisation de tous les indices retenus, depuis les grands froids jusqu'aux ambiances excessivement chaudes. Les limites d'interprétation et d'application sont également définies pour chacune.

## TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE .....	i
TABLE DES MATIERES .....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES .....	ix
1. INTRODUCTION .....	1
1.1 Problématique .....	1
1.2 Objectifs.....	3
2. MÉTHODES.....	5
2.1 Instrumentation .....	5
3. REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LE TRAVAIL AU FROID .....	7
3.1 Définitions .....	7
3.2 Aspects physiologiques.....	7
3.2.1 Études de populations indigènes.....	7
3.2.2 Acclimatation du corps entier .....	8
3.2.3 Acclimatation locale .....	9
3.3 Aspects génétiques.....	10
3.4 Aspects comportementaux.....	11
3.5 Performance au froid .....	11
3.5.1 Dextérité manuelle .....	12
3.5.2 Performance cognitive .....	13
3.6 Conclusion sur le travail au froid.....	15
4. LES INDICES ET GUIDES DU TRAVAIL AU FROID.....	17
4.1 L'indice Saskatchewan .....	17
4.1.1 Instrumentation nécessaire.....	18
4.1.2 Applicabilité.....	18

4.2	La norme ISO 11079 Ireq ou Isolement Requis .....	19
4.2.1	Instrumentation nécessaire.....	20
4.2.2	Applicabilité.....	21
4.3	L'indice de refroidissement éolien (WCET) .....	22
4.3.1	Instrumentation nécessaire.....	24
4.3.2	Applicabilité.....	25
5.	OBSERVATIONS DE SITUATIONS DE TRAVAIL AU FROID .....	27
5.1	Paramètres.....	27
5.2	Contraintes observées .....	27
5.3	Impact sur la dextérité.....	29
5.4	Conclusion .....	29
6.	L'INDICE DE CONFORT THERMIQUE PREDICTED MEAN VOTE ET PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PMV-PPD) .....	31
6.1	Le Predicted Mean Vote (PMV).....	31
6.2	Le Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) .....	32
6.3	Instrumentation nécessaire.....	33
6.4	Applicabilité.....	33
7.	TRAVAIL SOUS DES AMBIANCES EXCESSIVEMENT CHAUDES.....	35
7.1	Le Short-Term Exposure Limit ( <i>STEL</i> ).....	35
7.1.1	Instrumentation nécessaire.....	36
7.1.2	Applicabilité.....	36
7.2	L'indice de l'astreinte thermique prévisible (PHS) .....	40
7.2.1	Instrumentation nécessaire.....	40
7.2.2	Applicabilité.....	41
7.3	Comparaison STEL versus PHS.....	42
8.	OBSERVATIONS DE SITUATIONS DE TRAVAIL EXCESSIVEMENT CHAUDES ...	43
8.1	Paramètres.....	43
8.2	Contraintes observées .....	43

---

9. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	47
9.1 Conclusion.....	47
9.2 Recommandations.....	47
BIBLIOGRAPHIE.....	49



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Indice Saskatchewan.....	18
Tableau 2. Analyse selon l' $I_{req}$ .....	21
Tableau 3. Refroidissement éolien.....	23
Tableau 4. Données enregistrées en ambiance froide et valeur des indices .....	28
Tableau 5. Résultats au test de Purdue.....	29
Tableau 6. Exemple de valeurs de PMV (d'après la norme ISO 7730) .....	32
Tableau 7. Valeurs de CAF [Bernard, 2004] .....	38
Tableau 8. Valeurs limites et enregistrées de fréquence cardiaque (FC).....	44
Tableau 9. Paramètres de l'analyse selon ISO 7933.....	44



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Les indices offerts selon l'ambiance thermique et le niveau d'analyse.....	3
Figure 2.	Programme informatique pour l'application de l'indice $I_{req}$ .....	22
Figure 3.	Pourcentage prédit d'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV)...	33
Figure 4.	Durée d'exposition sécuritaire (SET) selon le <i>Short-Term Exposure Limit</i> .....	36
Figure 5.	Concept de température rectale à équilibre (gauche) et relation $T_{rec,eq}$ vs environnement thermique à $M = 348$ watts (droite) (Tiré de Lind, 1963).....	37
Figure 6.	Concept de condition critique [Bernard, 2009].....	37
Figure 7.	Analyse des corrections de deux ensembles selon le WBGT .....	39
Figure 8.	Évolution des températures rectales prédites selon la norme ISO 7933 actuelle et avec les modifications proposées aux algorithmes .....	41
Figure 9.	Durée limite d'exposition (selon PHS) vs <i>Safe Exposure Time</i> (selon STEL).....	42
Figure 10.	Résultats de l'analyse selon ISO 7933 .....	45



# 1. INTRODUCTION

Depuis les froids extrêmes trouvés dans le Grand Nord du Québec jusqu'aux chaleurs étouffantes rencontrées dans les papeteries et aciéries, des indices et guides de contrainte thermique sont proposés pour analyser ces situations. La réglementation québécoise en cette matière se retrouve essentiellement dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail et ne fait appel qu'à un petit nombre de ces indices et guides.

Le présent document fait état d'une activité de recherche visant à vérifier la pertinence d'appliquer les différents indices et guides dans le contexte québécois. S'ils s'avèrent pertinents, les conditions d'utilisation de ces outils doivent être définies autant en termes d'instrumentation que de limites d'interprétation. L'arrangement de l'information dans ce document suit un gradient de température depuis les froids extrêmes jusqu'aux chaleurs extrêmes, en passant par le confort thermique.

Dans le cas du froid, l'étude a débuté par une revue exhaustive de la documentation scientifique. Ce chapitre décrit les adaptations physiologiques phénotypiques et génotypiques de même que l'habituement comportementale observées chez des populations exposées. Ensuite, le lecteur y trouve une analyse détaillée des modes d'application de chacun des indices Saskatchewan, Isolement requis ( $I_{req}$ ) et refroidissement éolien. Cette section présente ensuite l'analyse des conditions d'application et de l'interprétation des indices retenus au regard des observations recueillies sur le terrain dans le Nunavik.

Le chapitre suivant porte sur le confort thermique et reprend les indices *Predicted Mean Vote* (PMV) et *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD) tels que définis dans la norme ISO 7730. Cette démarche concernant surtout les espaces de travail intérieur, sa pertinence ne fait pas de doute. Cependant, ses conditions d'application sont exigeantes en termes d'instruments et le chapitre définit des situations où l'analyse peut être menée avec des mesures simples et ce, sans perte de précision.

Enfin, les conditions de chaleur représentent un chapitre imposant puisque on y trouve les indices de contrainte thermique les plus connus et les mieux documentés. Si l'indice *Wet Bulb and Globe Temperature* (WBGT) est un incontournable, l'étude inclut l'analyse rationnelle dite "astreinte thermique prévisible" proposée par l'ISO 7933 de même qu'un tout nouvel indice spécifique aux ambiances thermiques extrêmement chaudes; le *Short-Term Exposure Limit* (STEL).

La conclusion et les recommandations précisent les conditions qui devraient baliser le déploiement d'un éventuel outil informatique couvrant le spectre thermique depuis le confort des espaces intérieurs de travail jusqu'aux ambiances extrêmement chaudes tout en facilitant l'analyse précise et la prise de décisions pertinentes et compétentes face à des environnements thermiques hostiles.

## 1.1 Problématique

La démonstration de l'impact de la contrainte thermique chaude sur la santé, la sécurité et la performance des travailleurs québécois n'est plus à faire. Aussi, les experts s'entendent pour

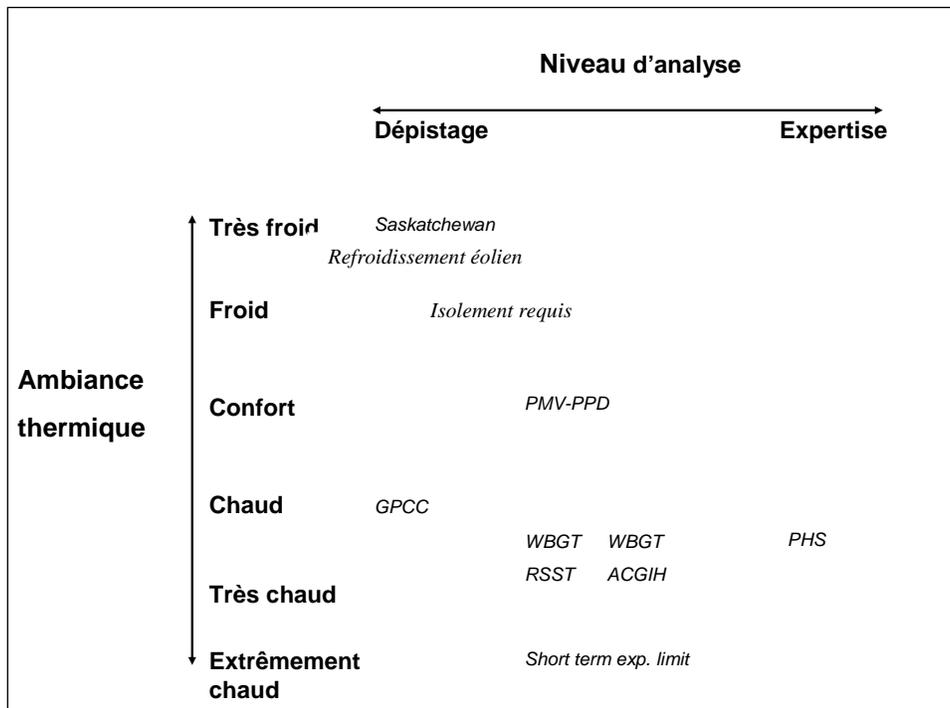
affirmer que les changements climatiques vont augmenter significativement le niveau de contrainte thermique et ce, probablement autant par des vagues de chaleur que par des périodes de grands froids plus fréquentes et intenses (Gouvernement du Québec, 2006).

Il est reconnu que les cas de décès par coup de chaleur répertoriés au Québec surviennent surtout en début de saison chaude, durant les premières canicules. Deux facteurs expliquent cette situation : d'abord les travailleurs sont alors peu acclimatés à la chaleur, puis il semble que la canicule prend de court les responsables de la santé et la sécurité du travail qui n'ont pas encore implanté leur programme de surveillance. Dans le but d'offrir un outil rapide et accessible de surveillance des travailleurs œuvrant à l'extérieur et ce, sans avoir recours à un lecteur WBGT, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) a élaboré le *Guide de prévention des coups de chaleur* (GPCC) en 2003. Le tirage record de cette publication confirmait alors qu'elle répondait à un besoin ressenti. Une deuxième édition, revue et corrigée, était offerte dès 2006 puis une version informatique a été rendue disponible sur le site de l'IRSST. Une seconde activité a permis d'offrir également deux utilitaires s'adressant à ceux qui disposent de l'instrumentation nécessaire à la lecture de la température WBGT. Ces trois programmes sur la contrainte thermique attirent beaucoup d'attention. Les utilisateurs apprécient leur utilité sur le terrain, mais également à des fins pédagogiques. Ces outils ont permis aux responsables d'agir plus rapidement et la documentation qui les accompagne les a aidés à le faire avec compétence.

Si ces trois outils informatiques sont très utiles, ils ne représentent cependant qu'une partie des indices et guides bien documentés et ne couvrent que la portion chaude des conditions de stress thermique rencontrées en milieu de travail. En effet, l'indice WBGT, souvent utilisé hors balise, devrait se limiter aux ambiances se situant entre 25 et 32 °C-WBGT. Il en va de même pour le GPCC. Pourtant, d'autres indices bien documentés permettent à ce jour d'analyser une plage plus grande d'expositions, parfois avec plus de détails et de précision. Malheureusement, ils sont très peu, sinon pas du tout utilisés au Québec, faute de connaissances et d'accessibilité.

La présente étude vérifie la pertinence d'ajouter aux trois outils déjà disponibles six indices reconnus internationalement, puis d'en déterminer la portée, les conditions et limites d'utilisation dans le contexte québécois. Ce sont trois indices de froid (Saskatchewan, Isolement requis et refroidissement éolien), un de confort thermique (*Predicted Mean Vote, Predicted Percentage of Dissatisfied*), un indice d'analyse détaillée du bilan thermique (PHS) et enfin le STEL qui s'adresse aux ambiances extrêmement chaudes. Ce dernier indice en est à sa phase de validation scientifique.

Ajouté aux outils existants, cet ensemble d'indices couvre les ambiances thermiques extrêmement froides jusqu'aux plus hauts niveaux de chaleur tolérable par l'humain (seuil de la douleur). De plus, leur niveau d'analyse va du simple dépistage jusqu'à l'expertise. La Figure 1 situe chacun de ces indices au regard de l'ambiance thermique et du niveau d'analyse.



**Figure 1. Les indices offerts selon l’ambiance thermique et le niveau d’analyse**

Ces normes et indices ont été développés ailleurs qu’au Québec. Par conséquent, certains doivent être vérifiés et éventuellement corrigés pour s’arrimer à notre climat. Une revue exhaustive de la documentation scientifique s’impose donc pour chacun. Aussi, des mesures sur le terrain permettront de préciser le mode opératoire et l’instrumentation nécessaire pour une application compétente des normes Saskatchewan, Isolement requis, refroidissement éolien, *PMV-PPD*, et *STEL*. Les autres indices ont été mis à l’épreuve par le chercheur principal lors de projets récents.

## 1.2 Objectifs

L’objectif principal de ce projet est d’offrir une documentation sur la pertinence, la portée, les conditions d’application et l’instrumentation nécessaire à l’utilisation d’un ensemble d’indices reconnus scientifiquement et qui couvre les besoins variés à la fois quant au niveau d’analyse, depuis le simple dépistage jusqu’à l’expertise, ainsi que d’ambiance thermique depuis les grands froids jusqu’aux chaleurs les plus extrêmes.

Les observations recueillies sur le terrain dans le cadre de cette activité n’ont pas pour objet de valider ces indices, une telle entreprise nécessiterait une étude d’envergure beaucoup plus imposante pour chacun des indices. Elles visent plutôt à expérimenter l’application en situation réelle et ainsi définir l’instrumentation nécessaire à la lecture des paramètres requis, les programmes et outils permettant d’en faire l’analyse puis à vérifier leurs limites et conditions d’interprétation.

Deux normes font l’objet d’objectifs plus ambitieux. Dans les cas précis de la norme ISO 7933 : *Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de l’astreinte thermique prévisible (PHS)*, un problème

entourant l'évolution des températures rectales prédites durant une période de récupération avait été identifié et doit être abordé sur la base des algorithmes aussi bien que d'un processus itératif d'analyse.

Enfin, le *Short-Term Exposure Limit* n'est pas encore validée et une étude détaillée doit être réalisée sur ses bases théoriques autant que sur sa performance.

## 2. MÉTHODES

La recherche documentaire a suivi le parcours habituel via les bases de données du Centre canadien d'hygiène et de sécurité du travail (CCHST), de NIOSHTIC (version en ligne) et Scopus. À cela se sont ajoutés des recherches sur le web et des documents de travail provenant de collègues internationaux.

L'épreuve de l'application sur le terrain des indices de froid et de chaleur extrêmes a eu lieu en 2011 et 2012. En ce qui concerne le froid, deux séjours d'une semaine dans le Nunavik ont permis d'observer des froids allant jusqu'à la limite d'application proposée par les normes (refroidissement éolien de  $-57^{\circ}\text{C}$ ). À l'opposé, les observations à la chaleur nous ont permis de mesurer dans une aluminerie des ambiances thermiques tout près de  $40^{\circ}\text{C}$ -WBGT. Dans l'ensemble, les situations couvrent donc un vaste éventail de conditions thermiques.

### 2.1 Instrumentation

Les paramètres nécessaires à l'application des indices étudiés sont en nombre relativement limité. En ce qui concerne le froid, la température et la vitesse de l'air sont utilisées par les indices Saskatchewan et refroidissement éolien. Nous y avons ajouté l'ensoleillement et l'humidité relative pour nous permettre d'approfondir notre analyse. L'astreinte au froid se fait sentir d'abord aux extrémités et se mesure par un test de dextérité fine qui est mis en relation avec la température de la face dorsale de la main. La température buccale complète les paramètres lus au froid.

À la chaleur, les valeurs de températures de l'air, humide naturelle et globe noir en plus de la vitesse de l'air définissent l'ambiance thermique. L'astreinte thermique découlant d'une activité industrielle sous des ambiances extrêmement chaudes se répercute rapidement sur la fréquence cardiaque. Les températures buccales doivent également être enregistrées.

L'instrumentation permettant de lire les paramètres environnementaux au froid ne peut comporter d'affichage à cristaux liquides puisque ce dispositif gèle entre  $-10$  et  $-20^{\circ}\text{C}$ . Nous avons donc opté pour une station météorologique portable Davis Vantage Vue sans fil dont les senseurs sont placés sur un trépied à l'extérieur, à 1,5 mètre du sol, alors que l'affichage se trouve à l'intérieur. Cette station permettait de lire la température et l'humidité de l'air et d'obtenir la vitesse du vent en temps réel ainsi que sa moyenne sur 2 et sur 10 minutes.

La mesure de la température de la peau des participants était prise avec un thermomètre infrarouge (Omega OS 562) avec émissivité ajustée à 0,97. La température buccale était mesurée avec un thermomètre Welch Allyn Sure Temp plus 690. La fréquence cardiaque a été enregistrée avec un moniteur Polar 610S.

À la chaleur, les valeurs de températures de l'air, humide naturelle et globe noir ont été enregistrées avec un Wibget Rss-214 étalonné récemment. La vitesse de l'air était lue avec le Kestrel Pocket Weather Meter 4500. Les températures buccales étaient lues avec le même thermomètre que celui utilisé au froid. L'enregistrement de la fréquence cardiaque a pu être fait, en présence de champs magnétiques importants, avec les moniteurs Metrosonic : Personal Heat Stress Monitor.

La charge de travail a été estimée en utilisant la méthode de décomposition de la tâche du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST).

Le Purdue Peg Board est le test retenu pour mesurer la dextérité des participants au froid.

### 3. REVUE DE LA DOCUMENTATION SUR LE TRAVAIL AU FROID

La documentation scientifique concernant les réactions physiologiques conséquentes à l'exposition au froid est beaucoup moins abondante que celle abordant l'astreinte à la chaleur. Au Québec comme ailleurs, plusieurs hygiénistes associent la contrainte thermique aux seules ambiances chaudes. La réglementation reflète également cette inégalité tant par l'abondance des textes que par la précision des limites proposées. Plusieurs entreprises, minières notamment, se sont intéressées au travail au froid et ont élaboré des programmes d'information mais leur contenu se limite souvent aux recommandations d'usage sur la tenue vestimentaire et les premiers secours en cas d'engelure, de gelure ou d'hypothermie. Finalement, les recommandations et guides de pratique, tel l'indice Saskatchewan, sont peu ou pas connus des intéressés.

#### 3.1 Définitions

Le terme "astreinte" est utilisé pour décrire la réaction physiologique conséquente à la pression environnementale sur le corps humain. La pression exercée par l'environnement entraîne irrémédiablement des modifications tant génétiques, physiologiques, morphologiques que comportementales. Il y a deux types d'adaptation : soit l'adaptation phénotypique lorsque les changements sont observables directement chez un individu qui subit l'astreinte physiologique, soit l'adaptation génotypique lorsque ces changements apparaissent et perdurent chez les générations futures par l'intermédiaire d'un mécanisme de sélection naturelle. Le terme accoutumance fait référence à une diminution de la réponse physiologique en réaction au stress environnemental (tremblement, vasoconstriction périphérique, sensation de froid, inconfort, douleur).

Les lésions induites par l'exposition au froid sont de trois types : la chute de la température centrale du corps (hypothermie), le gel de parties du corps (engelures et gelures) et les lésions aux extrémités n'impliquant pas le gel (pied des tranchées).

L'hypothermie se divise en trois niveaux. Elle est légère si la température centrale se situe entre 35 et 37 °C; modérée pour une température entre 32 et 34 °C et enfin, grave lorsque la température centrale chute sous 32 °C.

Le terme "engelure" décrit les cas où le gel d'une partie du corps, généralement les extrémités, ne touche que la peau. Si la situation n'est pas corrigée, le gel atteint les cellules des tissus sous-cutanés. À -2 °C, il y a formation de cristaux de glace. La lésion est alors nommée gelure. Le pied des tranchées survient à des températures entre 4 et 7 °C et n'est donc pas pertinent dans le présent rapport.

#### 3.2 Aspects physiologiques

##### 3.2.1 Études de populations indigènes

Andersen et coll. (1963) rapportent que pour un même changement de température (de 25 °C à 5 °C) les Inuits présentent une augmentation du taux métabolique de repos (TMR) de 27 % contre 60 % pour des individus non acclimatés.

Cette plus faible augmentation provient du fait que les Inuits ont déjà un TMR plus élevé et peuvent donc supporter une plus importante perte de chaleur corporelle et maintenir une température de la peau élevée alors que leur thermogénèse en réponse à l'exposition au froid est moindre [Young, 1996]. Il semble s'agir ici d'une acclimatation de type métabolique, car il y a augmentation de la production de chaleur au repos. Ce type d'adaptation a aussi été observé chez les Indiens Alacalufes, vivant sur des îles au large de l'extrémité sud de l'Amérique du sud, chez qui il a été observé un TMR de 50 % supérieur à un groupe d'individus non-acclimatés [Hammel, 1960].

Hammel et coll. (1959) rapportent que les aborigènes du nord de l'Australie présentent une acclimatation de type isolant. Dans ce type d'acclimatation, la température cutanée diminue alors que la température du noyau reste constante. Il n'y a pas de changement dans la production métabolique de chaleur.

L'acclimatation de type isolant hypothermique est quant à elle caractérisée par une chute de la température du noyau et de la peau et pas de changement de la thermogénèse. Par exemple, lorsqu'exposés au froid, les Lapons de Norvège ne semblent pas présenter d'augmentation significative de la thermogénèse comme en témoigne la faible augmentation de la consommation d'oxygène [Andersen, 1960]. Le même auteur rapporte également que la température rectale diminue plus fortement chez les Lapons par rapport à un groupe contrôle. Il y a donc une diminution de la réponse thermorégulatrice induite par l'exposition au froid (moins de tremblements). Les aborigènes d'Australie centrale possèdent un type d'acclimatation similaire à celui des Lapons (diminution des tremblements et chute de la température rectale). Leur température cutanée présente une diminution due à une vasoconstriction cutanée induite par l'exposition au froid [Hicks, 1964].

Une diminution de la température du noyau sans réponses physiologiques apparentes est parfois observée. Cela est caractéristique d'une acclimatation de type hypothermique qui permet une certaine perte de chaleur avant qu'entrent en jeu les mécanismes de survie. Cela permet à un individu de ressentir moins d'inconfort et de conserver une mobilité plus grande [Carlson, 1953]. Des études portant sur les « Bushmen » du désert de Kalahari montrent que ces derniers présentent une acclimatation au froid de ce type [Windham, 1958; Hildes, 1963; Ward, 1960].

### **3.2.2 Acclimatation du corps entier**

Launay et Savourey (2009) décrivent en détail les ajustements physiologiques chez un individu acclimaté par rapport à un non acclimaté au froid :

- métabolique : production de chaleur corporelle et température cutanée plus élevées, pas de changement de la température du noyau;
- isolante : production de chaleur corporelle et température du noyau inchangées, température cutanée plus basse;
- hypothermique : production de chaleur corporelle et température du noyau plus basses, température cutanée inchangée;
- isolante hypothermique : température du noyau et cutanée plus basses, production de chaleur corporelle inchangée.

Une exposition au froid chronique ou répétée entraîne une diminution des tremblements, de la vasoconstriction périphérique, de la sensation thermique, de l'inconfort, de la douleur, de la pression sanguine, des rythmes cardiaque et respiratoire. De plus, les premiers signes de changement peuvent apparaître après 10 jours d'exposition [Rintamäki, 2001]. Les modifications physiologiques produites lors d'une acclimatation ne subsistent que peu de temps suite au retrait de l'environnement stressant [Lambert, 2008]. Lorsque l'exposition entraîne une perte de chaleur corporelle non contrebalancée par la production métabolique de chaleur, c'est une acclimatation de type isolant qui semble se mettre en place [Young, 1996].

L'apparition d'un type d'acclimatation particulier semble dépendre de la durée de l'exposition, de la longueur de la période d'adaptation, de l'intensité du froid et de facteurs individuels [Young, 1996]. Bittel (1987) de son côté avance l'idée que ce sont les caractéristiques physiques qui influencent la mise en place d'un type d'acclimatation particulier (taux de graisse corporelle, niveau de condition physique). Il conclut que les personnes maigres présentent une adaptation de type métabolique alors que les personnes plus grasses présentent une adaptation de type isolant. Lors d'exposition à des froids modérés, les sujets obèses ou en surcharge pondérale semblent être mieux isolés au niveau du noyau que les sujets maigres grâce à un pourcentage de graisse corporelle supérieure, ce qui permet de prévenir la perte de chaleur [Wijers, 2000]. Des résultats similaires ont été rapportés dans une autre étude impliquant une exposition d'une durée d'une heure à 15 °C [Claessens, 2006]. Les deux études [Bittel, 1987 et Wijers, 2000] font cependant part de larges différences interpersonnelles dans les différents groupes observés.

Une troisième hypothèse avance que c'est l'apport énergétique (alimentation) qui semble être à la base des différents types d'adaptation. Une étude portant sur l'alimentation des Esquimaux révèle que leur plus haut taux métabolique au repos (acclimatation métabolique) semble provenir de leur alimentation riche en protéines [Auteur inconnu, 1952]. Snodgrass et coll. (2005) rapportent également une augmentation du TMR chez les individus de la population Yakut (Russie), mais n'observent aucune relation significative avec une alimentation riche en protéines, l'âge ou encore le style de vie (alimentation, activités de subsistance ainsi que les biens en leur possession).

### **3.2.3 Acclimatation locale**

L'acclimatation locale au froid a été mise en évidence autant chez de nombreuses populations natives de pays au climat froid que chez des individus fortement exposés au froid de par leur métier [Brown, 1963; Irving, 1960; Krog, 1960; Leblanc, 1962; Nelms 1962]. Des températures cutanées plus élevées dues à une vasoconstriction moins importante, une sensation de la douleur diminuée et un début de vasodilatation induite par le froid (VIF) plus précoce sont caractéristiques d'une acclimatation locale au froid [Launey, 2009]. La dextérité est ainsi favorisée mais la perte de chaleur est plus grande. Cheung et Daanen (2012) émettent une réserve quant à la présence d'un phénomène d'acclimatation locale due à une exposition aiguë ou chronique au travail. Ils suggèrent qu'un travailleur, ayant vécu des expériences physiologiques et psychologiques négatives au froid, sera plus enclin à chercher un travail où il n'est pas exposé à cet agresseur. À l'inverse, une personne présentant un flux sanguin élevé au niveau des mains (VIF) ressent donc moins de douleur et d'inconfort et se dirigera plus aisément vers des postes plus exposés au froid, sorte de sélection naturelle.

De nombreuses études sur le processus d'acclimatation ont été menées impliquant notamment l'immersion de la main dans de l'eau froide. Mäkinen (2010) met de l'avant la présence de divergences en ce qui concerne les résultats d'acclimatation au froid et cela pour des designs expérimentaux similaires. Certaines études présentent une vasoconstriction et une diminution de la sensation de douleur [Jansky, 2006; Geurts, 2005]. Cette dernière étude montre qu'il y a une acclimatation de type isolant, c'est-à-dire présentant une vasoconstriction augmentée et une diminution du phénomène de VIF.

Plusieurs études ont démontré qu'il n'est pas bénéfique de recourir à des expositions répétées par immersion dans de l'eau froide pour atteindre un niveau d'acclimatation permettant de réduire l'astreinte physiologique aux doigts et aux orteils [Cheung, 2012; Daanen, 2012]. Ces auteurs indiquent que le risque de développer des lésions dues au froid est plus élevé puisque la diminution de la douleur a pour effet pervers de diminuer la vigilance vis-à-vis du refroidissement de la peau et des tissus sous-jacents. Launay et coll. (2009) quant à eux évoquent le fait qu'une acclimatation locale des extrémités avec VIF est bénéfique pour les travailleurs, car elle améliore la dextérité et diminue la sensation de douleur.

### 3.3 Aspects génétiques

La relation entre le climat et le génome est moins clairement définie que les modifications physiologiques qui apparaissent en réponse à un environnement froid. Des études rapportent néanmoins que le froid modifie l'expression de certains gènes [Sonna, 2002]. Il pourrait même y avoir une pression sélective sur certains gènes laquelle serait associée à la distance par rapport à l'équateur [Piazza, 1981].

Brown (2012) indique qu'il faudra une meilleure compréhension de l'impact de l'alimentation et du climat pour distinguer les modifications génétiques. Cependant, la littérature comprend de nombreuses études qui tendent à donner au génome une place particulière. Les adaptations génotypiques semblent influencer la configuration morphologique (dimension et forme) davantage que les mécanismes de thermorégulation [Taylor, 2006].

La règle de Bergmann, bien connue en zoologie, suggère que la masse corporelle d'animaux d'un même genre augmente avec la latitude. La règle d'Allen stipule quant à elle que des individus homéothermes d'une même espèce vivant dans des climats chauds ont tendance à avoir des membres plus longs que ceux vivant dans des climats plus froids. Bien que ces règles écophysiologiques ne concernaient pas les humains à la base, il semble qu'une tendance similaire soit observée chez ces derniers. Les tables anthropométriques montrent d'ailleurs que les Afro-américains ont les membres supérieurs et inférieurs plus longs que les Américains de race blanche et ce, même si leur stature est similaire. Lambert et coll. (2008) rappellent qu'un ratio surface/masse corporelle bas est favorable à une meilleure conservation de la chaleur. Ces auteurs rajoutent que la largeur du corps humain semble avoir plus d'importance au niveau de la thermorégulation que la stature tel que le suggère Ruff (1993). En ce qui a trait à la masse corporelle moyenne, Roberts (1953) rapporte qu'elle est inversement liée à la température chez des individus faisant partie de populations indigènes. Cette étude montre également que pour une région tropicale donnée, des différences morphologiques sont observées entre les habitants selon que ces derniers soient issus de populations ayant vécu depuis longtemps à cet endroit ou non.

Cela suggère une certaine implication génétique car les habitants indigènes présentent une masse corporelle moins importante que les individus installés plus récemment (par ex : les aborigènes de Bornéo comparativement aux derniers immigrants) [Roberts, 1953].

Ainsi donc, l'impact de l'environnement thermique froid serait exprimé génétiquement tant par la masse corporelle que par la physiologie.

### **3.4 Aspects comportementaux**

Une étude de Young (1996) signale que l'avantage apporté par l'acclimatation au froid est considérablement moins performant que les vêtements de protection lorsqu'il s'agit de maintenir une température corporelle adéquate. De plus, Launay et coll. (2009) questionnent l'intérêt du développement d'adaptation générale du corps, car les tâches devant être effectuées peuvent l'être en évitant les troubles associés à l'exposition au froid au moyen d'abri, de vêtements, d'alternance travail/réchauffement. Ces moyens de protection, ainsi que les modes de vie (peu d'expositions à des froids extrêmes) sont autant de facteurs qui diminuent l'astreinte physiologique subie. Mäkinen et coll. (2004) rapportent que de jeunes Finlandais qui ont réduit l'astreinte physiologique associée au froid par différents moyens (courte exposition, intérieurs chauffés convenablement, utilisation de vêtements de protection adéquats) ne montrent pas d'acclimatation.

Dans une autre étude, le même auteur [Mäkinen, 2007] observe toutefois des différences principalement comportementales entre différentes populations vis-à-vis du froid, notamment lorsqu'il compare les populations circumpolaires et celles se trouvant à des latitudes inférieures. L'étude de Donaldson et coll. (2001) portant sur huit régions de l'Europe (nord et sud de la Finlande, les Pays-Bas, le Grand Londres, Bade-Wurtemberg, le nord de l'Italie, Palerme et Athènes) a permis de dégager certaines tendances. Ainsi, à des températures équivalentes, les personnes vivant dans des endroits plus froids et plus venteux ont tendance à porter plus de vêtements et à protéger leurs extrémités de façon plus efficace que des personnes vivant dans des régions où les hivers sont plus cléments. La différence géographique dans l'utilisation de chapeaux, de gants et d'écharpes, en raison du refroidissement du climat, est corrélée aux différents taux de mortalité due au froid. L'étude de Keatinge (1997) a mis en évidence que pour une même chute de température ambiante, le taux de mortalité était plus important dans les régions où les hivers sont plus chauds, où les gens portent moins de vêtements et où les maisons sont moins chauffées. Il semble que les habitants vivant plus au nord se sont adaptés plus efficacement au froid que les populations vivant plus au sud [Mäkinen, 2007].

### **3.5 Performance au froid**

La performance physique est caractérisée par l'endurance, la forme physique musculaire (force dynamique et statique) et les compétences physiques (agilité, équilibre et vitesse) [Mäkinen, 2007; Enander, 1989]. Dans leur méta-analyse portant sur la performance sous l'influence de facteurs de stress thermique, Hancock et coll. (2007) rapportent que le type de tâche effectuée, la durée d'exposition et l'intensité des facteurs de stress sont autant de variables clés qui influencent la performance. On parle également de relation dose-effet ici car plus la température des tissus des muscles et des nerfs diminue plus la performance est affectée [Oksa, 1997]. Selon le type et la vitesse de contraction, la performance musculaire peut être modifiée de 2 à 5 % par degré [Racinais, 2010]. Deux études ont comparé les performances physiques de sujets dans des

pièces climatiques à 20°C et -20°C. Celle de Patton et Vogel (1984) rapporte une réduction de l'endurance de 40,2 %. D'autre part, Quirion et coll. (1989) observent une diminution du rendement lors des tests physiques à -20°C. Ils constatent qu'il y a une diminution du  $VO_{2max}$  et de l'endurance. Le refroidissement des muscles diminue leur vitesse de contraction et ce sont les mouvements rapides qui sont les plus affectés [Sargeant, 1987; Oksa, 1995]. Dans les études de Oksa et coll. (1997, 2002), portant sur l'activité musculaire au niveau du mollet (triceps sural) et du poignet (muscles fléchisseur et extenseur), une des causes de la diminution de la performance est la contraction simultanée de paires de muscles (agoniste et antagoniste) à la suite d'une baisse de la température musculaire. De plus, le muscle agoniste est moins activé alors que le muscle antagoniste l'est plus que d'ordinaire [Oksa, 1997]. D'autre part, la vitesse de conduction nerveuse (nerf sensitif et moteur) est également influencée par la température [Todnem, 1989]. Ce phénomène semble expliquer la diminution de la performance qui suit un refroidissement [Mäkinen, 2007; Racinais, 2010]. Mäkinen (2005) a démontré que le contrôle postural est affecté par le froid avec notamment un balancement postural (oscillations simultanées dans le plan sagittal et frontal du corps) supérieure de 62 % - 87 % quand les sujets sont exposés à 10 °C par rapport à 25 °C.

Dans leur étude, Muller et coll. (2012) comparent les  $VO_{2max}$  lors de tests physiques au froid (5 °C) de 14 étudiants selon qu'ils s'entraînent à l'extérieur pendant les périodes froides depuis au moins deux ans (sujets acclimatés) ou à l'intérieur (sujets non acclimatés). Des tests ont été effectués dans des conditions neutres afin de vérifier l'homogénéité du groupe (performances cardiorespiratoires, paramètres cardiovasculaires). Les auteurs observent une diminution de la performance physique associée au froid moins importante chez sujets acclimatés. Lors de tests sous-maximaux, les individus exposés au froid de façon régulière montrent une dépense énergétique moins grande que les individus non acclimatés. Les auteurs précisent que les mécanismes associés à la dégradation de la performance physique pourraient être de nature biochimique, biomécanique ou respiratoire.

### **3.5.1 Dextérité manuelle**

L'exposition de la main au froid, que ce soit à l'air ambiant, dans de l'eau froide ou encore par contact avec des surfaces froides, est amplement connue pour ses effets négatifs sur la dextérité. Heus et coll. (1995) définissent la dextérité manuelle comme étant une habileté motrice déterminée par la plage de mouvement des bras, des mains et des doigts et par la possibilité de manipuler avec les mains et les doigts. La température de la main est le paramètre principal corrélé à la performance manuelle [Gaydos, 1958; Rana, 2010]. Dans l'étude de Gaydos (1958), des tests de performance manuelle ont été effectués en modifiant la température ambiante dans la pièce où se trouvent les sujets indépendamment de la température ambiante de la boîte où se trouvent les mains. Il rapporte que lorsque les mains sont maintenues à leur température normale mais avec un refroidissement du corps en général, la performance ne semble pas être affectée. Néanmoins, certaines études ont mis en avant le fait qu'un refroidissement général peut influencer la performance par la présence de tremblements. Rana (2010) rapporte une diminution de la performance lors de certaines tâches manuelles effectuées sous des températures ambiantes plus basses que celles utilisées par Gaydos (1958) pour refroidir le corps (moyenne pondérée de la température cutanée inférieure) alors que les mains sont maintenues à des températures normales. Ainsi, le fait de protéger les extrémités ne suffit pas à préserver la dextérité, car il y a une bonne relation entre la dextérité au niveau des doigts et la température du corps [Schiefer, 1984; Brajkonic, 2001]. Lorsque la température cutanée des doigts chute entre 20 °C et 22 °C il y

a diminution marquée de la performance manuelle. Ce phénomène est significativement plus important lorsque la température baisse en deçà de 15 °C [Daanen, 2009]. Heus et coll. (1995) statuent que la dextérité commence à fléchir lorsque les températures cutanées de la main et des doigts atteignent 20 °C, et ils établissent à 15 °C la limite inférieure à ne pas dépasser.

Outre la température de la peau, d'autres paramètres sont aussi liés à une diminution de la dextérité manuelle. Le froid ralentit la conduction nerveuse, de façon linéaire de 1,84 m.s<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup> sous une température du nerf entre 36 °C et 23 °C [De Jong, 1966]. Sous les 23 °C, la vitesse de conduction nerveuse chute drastiquement. Lorsque la température du nerf chute aux alentours de 10 °C il se produit un blocus nerveux [Basbaum, 1973; De Jong, 1966]. L'engourdissement au niveau des doigts semble apparaître de façon significative entre 6 et 8 °C [Morton, 1960]. Irving (1966) rapporte que la sensibilité de la peau à 20 °C correspond à un sixième de ce qu'elle est à 35 °C. La rigidité des doigts, c'est-à-dire la perte de mobilité, associée au refroidissement du liquide synovial au niveau des articulations, est également un facteur important dans la dégradation de la performance manuelle [Chi, 2012]. Le refroidissement des muscles de la main se traduit par un changement de la vitesse de contraction, de la force de contraction maximale et de la durée de contraction avant épuisement [Heus, 1995]. Pour ce qui est de la contraction volontaire maximale (CMV), elle est liée à la durée d'exposition au froid par l'intermédiaire de la température de la main comme l'observent Chi et coll. (2012). Ils notent également qu'à la suite d'une immersion dans de l'eau froide (11 °C) pendant 40 minutes, le fait de plonger la main dans de l'eau à 34 °C permet un retour de la CMV en cinq minutes et une récupération totale de la fatigue musculaire en 15 minutes.

Afin de déterminer s'il est possible d'associer l'atteinte fonctionnelle (pourcentage de diminution de la dextérité manuelle) et les conditions météorologiques, Daanen (2009) a réalisé une série d'expériences en faisant varier la température ambiante et la vitesse du vent (donnant la température de refroidissement éolien WCET pour Wind Chill Equivalent Temperature). L'auteur rapporte une forte relation entre la WCET, la durée d'exposition et la dextérité digitale. Par exemple, il trouve qu'il y a une perte de dextérité digitale de 12 % en 25 minutes pour une WCET de -21°C. L'ajout d'un parka de l'armée de l'air néerlandaise à l'isolation vestimentaire que portait les sujets n'a pas influencé significativement la dextérité digitale.

### **3.5.2 Performance cognitive**

Des répercussions négatives sur la performance mentale sont rapportées lorsque l'exposition au froid entraîne un refroidissement important de la température centrale (hypothermie) et notamment de la température du cerveau [Oksa, 2006; Immink, 2012]. Par contre, la littérature montre des résultats divergents en ce qui concerne les réponses cognitives lors d'exposition à des froids n'entraînant pas d'hypothermie [Chi, 2012]. D'ailleurs, Mäkinen et coll. (2006) observent à la fois des améliorations et des dégradations de la performance mentale selon les tâches exécutées par leurs sujets exposés à 10 °C (température de l'air) pendant deux heures (froid non hypothermique). Deux hypothèses principales tentent d'expliquer cette observation. D'abord celle de la distraction, proposée par Coleshaw (1983), selon laquelle la dégradation de la performance mentale provient du fait que le froid occasionne un inconfort qui vient distraire la personne dans l'exécution de sa tâche. On note ainsi des temps de réaction plus longs, une vigilance diminuée, une mémoire affectée ainsi qu'un plus grand nombre d'erreurs [Irving, 1966; Coleshaw, 1983; Mäkinen, 2006]. Ensuite, l'hypothèse de l'éveil ou de l'alerte tente d'expliquer les améliorations de la performance parfois observées; soit une plus grande concentration qui

permet de mieux réaliser la tâche. Elle se traduit par une diminution du temps de réaction ou une meilleure précision lors de tâches complexes [John Paul, 2006; Muller, 2012; Marrao, 2005]. Cependant, Palinkas et coll. (2001) ajoutent qu'un tel état d'éveil entraîne une fatigue qui aura pour conséquence de diminuer la performance cognitive à plus ou moins long terme.

Plusieurs auteurs discutent de la relation entre l'exposition au froid et la performance cognitive ainsi que des facteurs clés sous-jacents. Il ressort que la performance est significativement affectée sous des températures ambiantes de 10 °C. Muller et coll. (2012) exposent leurs sujets à une température de 10 °C (vêtus d'un short, de chaussettes et portant des gants) pendant deux heures. Ils remarquent entre autres une dégradation de la mémoire de travail et du temps de réaction. De plus, ils observent que la dégradation de certaines fonctions cognitives persiste lors de la phase de réchauffement 60 minutes après l'exposition. Coleshaw et coll. (1983) quant à eux observent une dégradation du processus de mémorisation progressive de 70 % chez les sujets dont la température corporelle se situe entre 34 et 35 °C (alors que la température normale se situe entre 36,5 et 37 °C) au moment de la mémorisation. Cependant lorsque la mémorisation est réalisée avant induction de l'état d'hypothermie il ne semble pas y avoir de dégradation dans le rappel de la mémoire [Coleshaw, 1983]. Avec une température corporelle stabilisée à 35,5 °C, il a été démontré que certaines étapes du processus de traitement de l'information sont détériorées [Palinkas, 2001]. Les étapes de perception et de mémorisation à court terme (mémoire de travail), les facultés de raisonnement et de calcul sont également affectées par une diminution de la température corporelle avoisinant les 34-35 °C [Coleshaw, 1983]. Lorsque la température corporelle tombe sous les 35 °C (hypothermie modérée), il peut y avoir apparition de symptômes de confusion, d'amnésie ainsi qu'une diminution de l'état d'alerte et de la conscience [Mäkinen, 2007].

Dans une étude menée par Flouris et coll. (2007), le fait d'augmenter la température corporelle avant l'exposition au froid (-20 °C pendant deux heures) semble être efficace pour empêcher une diminution de la vigilance. Clarke et Jones (1962) ont exposé le fait qu'un individu exécute, au froid, une tâche qu'il a apprise également dans un environnement froid d'une meilleure façon qu'un individu ayant appris cette même tâche dans un environnement plus chaud. Cette hypothèse est également vérifiée dans l'étude de Oksa et coll. (2006), où des femmes sont entraînées à réaliser des tâches militaires (démonter et remonter une arme d'assaut) dans des ambiances thermiques neutre, neutre/froide et froide. Celles qui ont appris seulement dans un environnement neutre sont les plus lentes alors que les sujets qui se sont entraînés d'abord dans un environnement neutre et ensuite au froid sont les plus rapides dans deux des trois tâches. L'acclimatation fait partie des explications évoquées concernant ces différences. Immink et coll. (2012) rapportent également une diminution de la performance lorsqu'il y a changement de température entre l'apprentissage d'une tâche et son exécution (test).

John Paul et coll. (2010) se sont intéressés à l'impact du froid sur la performance cognitive chez des individus ayant vécu 14 mois dans un climat polaire (base de recherche en Antarctique). Des tests menés à trois occasions (2<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup> et 12<sup>e</sup> mois) visaient à évaluer entre autres la mémoire de reconnaissance et la mémoire à court terme. Ils ont observé que la mémoire de reconnaissance et l'apprentissage se sont améliorés au cours du séjour. Les auteurs suggèrent que la « distraction » provoquée par le froid au début de l'expérience semble disparaître ou diminuer au fil de l'étude. L'hypothèse de l'éveil semble également faire partie des explications possibles concernant l'amélioration de la précision des sujets lors des tests. De plus, ils discutent du fait

que les sujets étaient physiquement et mentalement aptes à supporter une telle expérience (motivation et tolérance).

### **3.6 Conclusion sur le travail au froid**

Bien que de moindre importance que l'adaptation comportementale, l'adaptation phénotypique et génotypique sont observées chez les personnes exposées aux ambiances froides. Cette adaptation est observée chez des sujets d'origines diverses. L'ensemble de tous ces ajustements physiologiques, que l'on nomme acclimatation, influence significativement les réponses physiologiques mesurées en termes de dextérité, de puissance, de capacité d'apprentissage et de mémorisation, de temps de réponse et de mémoire de travail. Les personnes non acclimatées ont une performance et une vigilance moindres et peuvent donc être plus à risque lorsqu'elles sont exposées au grand froid. Il importe donc de considérer et de reconnaître la provenance, de même que l'historique récent de travail des personnes qui ont à affronter ces situations particulières.

Même s'il a été démontré qu'il peut y avoir amélioration des performances physiques et mentales par des processus d'acclimatation, l'adaptation comportementale, qui s'acquiert en quelques expositions au froid, est plus importante. Il devient ainsi prioritaire d'opter pour la formation des personnes et l'utilisation de moyens de protection tels que les abris chauffés et les vêtements appropriés dans un programme de gestion de l'exposition au froid. Contrairement à la chaleur, l'acclimatation au froid ne semble pas être de première importance lorsqu'il s'agit de préparer les travailleurs à œuvrer dans de telles conditions.

Aucune étude ne s'est penchée sur les régimes d'alternance exposition au froid/pause en abri chauffé. Rintamaki (2001) estime que les changements physiologiques phénotypiques surviennent en quelques semaines d'exposition. Cette seule étude ne permet cependant pas de proposer un calendrier qui assurerait une acclimatation complète.

Quoiqu'il en soit, l'ensemble de la documentation révèle qu'un programme de surveillance de l'exposition au froid est pleinement justifié, spécialement pour ces situations où des gens non acclimatés et non accoutumés se trouvent exposés.



## 4. LES INDICES ET GUIDES DU TRAVAIL AU FROID

Les deux outils (indices et guides de travail au froid) initialement prévus dans cette étude étaient le *Cold Condition Guidelines for Working Outside* du ministère du Travail de la Saskatchewan (ci-après nommé l'indice Saskatchewan) et la norme ISO 11079 *Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination et interprétation de la contrainte thermique liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis du vêtement et les effets du refroidissement local* (ci-après nommé la norme  $I_{req}$  ou Isolement requis). Nous avons décidé de discuter également d'une troisième approche, soit l'indice de refroidissement éolien (WCET).

### 4.1 L'indice Saskatchewan

L'indice Saskatchewan jouit d'une popularité certaine. La température et la vitesse de l'air sont les seuls paramètres nécessaires à son application et il propose un régime d'alternance travail/repos facile d'interprétation. Cet indice est cité dans les Threshold Limit Values (TLV) de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) depuis 1983, ce qui lui confère une certaine notoriété. Au Québec cependant, nous avons rencontré peu de préventionnistes qui connaissent bien cet indice malgré qu'il apparaisse dans des publications du Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail aussi bien que de la CSST. Il concerne les environnements extrêmement froids puisque son domaine d'application débute entre  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$  avec un vent de 16 km/h et  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  par temps calme.

Les deux paramètres de l'ambiance thermique considérés par cet indice sont connus comme étant les deux paramètres dominants dans la détermination du niveau de froideur. Les autres paramètres environnementaux sont prescrits. Ainsi, cet indice suppose un ciel ensoleillé. Quant à l'humidité absolue de l'air, à des températures sous  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , elle est nécessairement infime.

D'autres valeurs pertinentes aux échanges thermiques sont également prescrites. L'indice suppose une charge physique de travail de niveau moyen ou lourd ainsi qu'une tenue vestimentaire appropriée et sèche, mais sans en préciser la nature. Il est également prévu que les travailleurs aient accès à des boissons chaudes durant les pauses.

Le tableau ci-dessous montre le régime travail/pause recommandé pour chaque période de quatre heures. Ce régime est défini à la fois par une durée maximum d'exposition continue au froid et le nombre minimal de pauses, incluant la pause normale après deux heures de travail. Ces pauses doivent permettre aux personnes de demeurer à la chaleur pendant une durée minimale de dix minutes.

**Tableau 1. Indice Saskatchewan**

Température de l'air, ciel ensoleillé (°C)	Pas de vent notable		Vent de 8 km/h		Vent de 16 km/h		Vent de 24 km/h		Vent de 32 km/h	
	Durée période de travail (min.)	N <sup>bre</sup> de pauses	Durée période de travail (min.)	N <sup>bre</sup> de pauses	Durée période de travail (min.)	N <sup>bre</sup> de pauses	Durée période de travail (min.)	N <sup>bre</sup> de pauses	Durée période de travail (min.)	N <sup>bre</sup> de pauses
-26 à -28	Régime normal		Régime normal		75	2	55	3	40	4
-29 à -31	Régime normal		75	2	55	3	40	2	30	5
-32 à -34	75	2	55	3	40	4	30	5	Urgences seulement	
-35 à -37	55	3	40	4	30	5	Urgences seulement			
-38 à -39	40	4	30	5	Urgences seulement					
-40 à -42	30	5	Urgences seulement							
-43 et moins	Urgences seulement									

Cet indice prévoit donc que le travail a cours normalement jusqu'à une température de -28°C sous un vent de 8 km/h. À l'opposé, tout travail non urgent doit cesser sous des températures de -43 °C même en l'absence de vent. Entre ces limites, le nombre de pause varie entre deux et cinq et la durée maximum d'exposition ininterrompue au froid se situe entre 75 et 30 minutes. Il mentionne également que le travail non-urgent doit cesser sous un indice de refroidissement éolien de -51 ou moins.

#### 4.1.1 Instrumentation nécessaire

Le niveau de froideur couvert par cet indice exclut tout appareil dont l'affichage est à cristaux liquides. Ce type d'affichage gèle entre -10 et -20 °C, rendant la lecture de la température très difficile et celle de la vitesse de l'air totalement impossible (parce qu'elle fluctue constamment). Deux alternatives sont possibles : s'en remettre aux données d'une station météorologique située à proximité ou se procurer une station mobile. Les stations des services officiels, tel Environnement Canada, constituent une source fiable mais sont très parsemées dans les régions où des températures de -26 °C ou moins sont courantes. Par contre, une station météo mobile telle que celle utilisée par notre équipe (Davis Vantage Vue sans fil) coûte environ 500 \$ et s'est montrée d'une fiabilité irréprochable lors de notre étude en plus de jouir d'une bonne réputation sur les forums météorologiques. Les senseurs reposent sur un trépied bien ancré au sol, à 1,5 mètre de hauteur alors que l'afficheur est déposé dans un espace chauffé, à une distance pouvant atteindre environ 70 mètres. Un tel dispositif a l'avantage de permettre la mesure de la vitesse du vent près du lieu de travail.

Dans le cas où une station officielle se situe à proximité des travailleurs concernés, le vent est mesuré à une hauteur normalisée de 10 mètres. Il est possible d'estimer la vitesse à la hauteur du sol en divisant celle-ci par 1,5 [Holmer, 2009].

#### 4.1.2 Applicabilité

Un parcours des Archives nationales d'information et de données météorologiques d'Environnement Canada révèle que la Saskatchewan connaît des hivers extrêmement froids et venteux, mais ensoleillés. C'est également le cas des régions nordiques du Québec depuis l'Abitibi et la Côte-Nord jusqu'au Nunavik. La latitude est comparable de sorte que le rayonnement solaire peut être assumé équivalent entre ces régions.

Un simple coup d'œil au Tableau 1 suffit à conclure que cet indice n'est pas douillet. Les hypothèses sur lesquelles reposent l'indice Saskatchewan à l'effet que les travailleurs savent comment se vêtir et ont accès à des vêtements appropriés sont des conditions *sine qua non* à son application. Deux séjours au Nunavik ont suffi pour démontrer que ces deux hypothèses ne sont pas toujours respectées. Par exemple, quelques travailleurs portaient des vêtements de coton : matériau indésirable au froid, et ce, malgré le fait que l'employeur ait affiché un guide qui précise les matériaux à favoriser.

Il est surprenant de constater le manque de publications scientifiques discutant de cet indice. Aucun article de qualité n'évalue sa performance ou sa pertinence. Des contacts avec le Labour Standards Division du ministère du travail de cette province et avec un chercheur de grande renommée du Manitoba ne nous ont rien appris sur ses fondements même, pas plus que sur son applicabilité. Cependant, lors de notre séjour en l'hiver 2012, nous avons observé trois travailleurs qui ont dépassé substantiellement, et à plusieurs reprises, les limites proposées sans montrer de refroidissement préoccupant au niveau de la main (température cutanée) comme au niveau de la température buccale. Les tests de dextérité montraient cependant une perte significative, mais non préoccupante. Un de ces cas concerne deux travailleurs exposés de façon ininterrompue pendant 120 minutes à une température de  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  et à des vents au sol de  $28,8\text{ km/h}$ . L'indice prescrit que seuls les travaux urgents peuvent avoir cours sous de telles conditions. L'application de cet indice aurait donc assuré une bonne protection aux travailleurs exposés. Il faut souligner que les vêtements ont énormément évolués au cours des 30 dernières années. L'isolement vestimentaire est plus performant qu'au moment où cet indice a été conçu, ce qui est de nature à le rendre plus sécuritaire.

L'avantage de cet indice repose sur sa simplicité. Il ne laisse guère de place à l'interprétation. Par contre, il requiert une station météorologique pour assurer des lectures fiables et représentatives de la température et de la vitesse de l'air.

En conclusion, cet indice peut s'avérer utile à la condition qu'un programme de formation soit appliqué à l'ensemble des travailleurs exposés au froid et que ceux-ci disposent de vêtements appropriés et de mesures pour les conserver secs.

## 4.2 La norme ISO 11079 Ireq ou Isolement Requis

L'indice ISO 11079 Isolement requis mérite certainement notre attention, ne serait-ce que par le fait qu'il provient d'un groupe de travail qui a produit une foule de normes ISO sur l'environnement thermique dont certaines s'imposent mondialement comme outil d'analyse détaillée. L'approche de cette norme est rationnelle : elle repose sur un calcul des échanges thermiques entre l'homme et son environnement pour indiquer l'isolement vestimentaire requis ( $I_{req}$ ) pour maintenir des conditions confortables pour le sujet en limitant la chute de température corporelle profonde à  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou moins. Lorsque l'isolement vestimentaire réel est inférieur à l' $I_{req}$  calculé, une durée limite d'exposition (DLE) est calculée sur la base d'une chute de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la température cutanée ( $T_{sk}$ ). Toutes les valeurs d'isolement vestimentaire sont déterminées à partir de la norme ISO 9920 : *Détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire*. Ces valeurs sont obtenues expérimentalement sur un mannequin statique puis corrigées pour tenir compte de la vitesse de l'air et des mouvements du corps.

Ainsi, son application requiert entre autres l'utilisation de plusieurs paramètres : l'ambiance thermique (vitesse, température et humidité de l'air et, température moyenne de rayonnement); l'énergie métabolique; le pourcentage d'efficacité mécanique (pourcentage du métabolisme transformé en travail externe), l'isolement et la perméabilité à l'air de la tenue vestimentaire et finalement; la vitesse de marche. La complexité du calcul du bilan thermique impose l'utilisation d'un programme informatique, mais plusieurs sont offerts sans frais sur le web.

#### **4.2.1 Instrumentation nécessaire**

L'application de cette norme requiert une instrumentation plutôt lourde. La vitesse et la température de l'air rencontrent les mêmes exigences que celles discutées au Chapitre 4.1.1. Dans le but d'alléger l'appareillage, Holmer (2009) rappelle que la température moyenne de rayonnement se situe très près de la température de l'air et qu'il est permis d'utiliser une seule et même valeur. Ceci est vrai par temps couvert, mais comporte une erreur certaine par temps ensoleillé. Dans ce dernier cas, l'erreur est à la faveur d'une plus grande sécurité puisqu'elle néglige l'apport du rayonnement solaire.

L'humidité relative est de peu d'importance. Le calcul des échanges thermiques repose sur l'humidité absolue qui, par temps très froid, est toujours extrêmement faible. À titre indicatif, par une température de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , à 100 % d'humidité relative, l'humidité absolue est de 0,001 kg d'eau/kg d'air sec. Ainsi, une erreur importante sur la lecture de l'humidité relative aura peu d'impact sur le calcul du bilan thermique. Holmer (2009) propose d'éviter cette lecture et d'utiliser une valeur de 85 %. Par contre, une station météorologique portable telle que celle utilisée dans notre étude affiche cette valeur. Nos relevés se situaient entre 54 et 70 %.

La détermination de l'énergie métabolique pose toujours problème. La mesure de cette valeur nécessite un équipement que très peu de laboratoires de physiologie de l'effort possèdent. Dans la pratique, ces valeurs sont tirées de tables ou de méthodes simplifiées fournissant une estimation. Quant au pourcentage d'efficacité mécanique, on peut trouver des valeurs très approximatives sur quelques tables.

L'isolement et la perméabilité à l'air de la tenue vestimentaire doivent être extraits de la norme ISO 9920. Cette norme est plutôt volumineuse et bien que simple en apparence, la détermination des valeurs doit suivre un cheminement assez complexe, car elle varie en fonction des matériaux, de leur épaisseur et de la forme des vêtements et de leur facteur de surface. Il nous a été impossible de déterminer l'isolement et la perméabilité de plusieurs pièces de vêtements utilisées par les sujets que nous avons observés. Aussi, la norme ISO 9920 ne permet pas de bien distinguer les différents niveaux de pièces de forme identique. Par exemple, deux parkas de même configuration, fait des mêmes matériaux, auront une seule et même valeur d'isolement alors que tout adepte du froid sait que les parkas sont de performance variable. Finalement, certains matériaux fréquemment utilisés, tels les multiples niveaux de duvet, n'apparaissent pas dans cette norme.

La vitesse de marche peut être estimée à partir de podomètres, mais sa variabilité dans le temps est grande. La majorité des travailleurs que nous avons observés dans le Nord-du-Québec marchaient très peu.

## 4.2.2 Applicabilité

Les articles scientifiques mettant l'indice  $I_{req}$  à l'épreuve ne sont pas légions. Holmer, qui a développé cet indice, est pratiquement le seul à publier sur ce sujet. Aucun article ne rapporte des études menées sous des conditions aussi froides que celles observées dans le nord du Québec.

De par son approche, cet indice s'adresse aux experts seulement. Et puisque certains paramètres doivent être estimés, il comporte une marge d'erreur plutôt large. L'expérience du chercheur principal en contrainte thermique chaude l'a amené à conclure que l'estimation du métabolisme par des hygiénistes formés, comprend une marge d'erreur de 20 %. De plus, elle entraîne généralement une surestimation, qui, dans le contexte d'exposition à la chaleur, est à la faveur d'une plus grande sécurité. Inversement, sous contrainte thermique froide, une surestimation du métabolisme mène vers une protection moindre. Le Tableau 2 montre les durées limites d'exposition (DLE) et les valeurs de l' $I_{req}$  pour des valeurs de métabolisme variant entre 100 et 225  $w/m^2$ , sous des conditions semblables aux plus rudes que nous avons observées :

Température de l'air :  $T_a = -35\text{ °C}$

Température moyenne de rayonnement :  $T_r = -35\text{ °C}$

Vitesse de l'air :  $V_a = 11\text{ m/s}$

Perméabilité de la tenue vestimentaire =  $5\text{ l/sm}^2$

Humidité relative = 60 %

Isolement vestimentaire porté :  $4\text{ clo}^1$  ( $0,62\text{ m}^2\text{°C/W}$ )

Notons que sous de telles conditions, l'indice Saskatchewan prescrit que seuls les travaux urgents peuvent avoir cours.

**Tableau 2. Analyse selon l' $I_{req}$**

Métabolisme ( $w/m^2$ )	Durée limite d'exposition (heure)	Isolement requis (clo)
100	0,3 à 0,4	4,9 à 5,2
125	0,4 à 0,5	3,8 à 4,1
150	0,5 à 0,7	3,1 à 3,4
175	0,8 à 1,3	2,6 à 2,9
200	1,3 à 8	2,3 à 2,5
225	4,5 à 8	2,0 à 2,2

Les variations autant en termes de durée limite d'exposition (DLE) que de l' $I_{req}$  sont importantes. Également, le fait que l'isolement vestimentaire requis atteigne 5,2 clo a de quoi surprendre puisque les meilleures tenues vestimentaires connues atteignent quatre clo. En fait, le programme disponible à :

[http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk\\_miljoe/IREQ2009ver4\\_2.html](http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/IREQ2009ver4_2.html)

Accepte des valeurs de la température de l'air de  $-95\text{ °C}$ , de métabolisme jusqu'à  $400\text{ w/m}^2$  (ce qui est possible mais ne peut être maintenu que quelques minutes avec un habillement hivernal)

<sup>1</sup> Unité d'isolement thermique pour qualifier un vêtement

et donne des valeurs de clo dépassant la dizaine (Figure 2). Un tel programme devrait limiter les valeurs admissibles et reconnaître les situations impossibles. À l'opposé, les vitesses de l'air considérées sont limitées à 18 m/s et moins, ce qui correspond à 65 km/h, or les archives météorologiques montrent que des vents plus élevés s'observent régulièrement dans les régions nordiques du Québec.

En conclusion, cet indice semble avoir été conçu pour des environnements moins froids que le nord du Québec. Il peut s'avérer utile aux experts qui désirent approfondir l'analyse rationnelle de certaines situations de travail qui s'insèrent à l'intérieur de sa plage. Son utilisation requiert un programme qui limiterait les valeurs de saisies aussi bien que les recommandations à l'intérieur de valeurs logiques.

**CALCULATION OF REQUIRED INSULATION, IREQ AND DURATION LIMITED EXPOSURE, Dlim**

150	M (W/m <sup>2</sup> ), Metabolic energy production (58 to 400 W/m <sup>2</sup> )
0	W (W/m <sup>2</sup> ), Rate of mechanical work, (normally 0)
-35	Ta (C), Ambient air temperature (< +10 C)
-35	Tr (C), Mean radiant temperature (often close to ambient air temperature)
5	p (l/m <sup>2</sup> s), Air permeability (low < 5, medium 50, high > 100 l/m <sup>2</sup> s)
0.7	w (m/s), Walking speed (or calculated work created air movements)
11	v (m/s), Relative air velocity (0.4 to 18 m/s)
60	rh (%), Relative humidity
4	Icl (clo), AVAILABLE basic clothing insulation (1 clo = 0.155 W/m <sup>2</sup> K)

**IREQ & Dlim RESULTS (minimal to neutral)**

Insulation Required, IREQ 3.1 to 3.4 (clo)

REQUIRED basic clothing insulation (ISO 9920), Icl 5.9 to 6.5 (clo)

Duration limited exposure, Dlim 0.7 to 0.5 (hours)

CALCULATION READY!

Figure 2. Programme informatique pour l'application de l'indice  $I_{req}$

### 4.3 L'indice de refroidissement éolien (WCET)

La majorité des Canadiens connaissent l'existence de l'indice de refroidissement éolien. Selon Environnement Canada, près de 80% d'entre eux consultent son site web pour planifier leurs activités extérieures par temps froid. Cet indice considère à la fois les deux principaux paramètres de l'ambiance thermique par temps froid, soit la température et la vitesse de l'air. Pour s'arrimer à la préférence des Canadiens, cet indice est exprimé en degrés malgré le fait qu'il soit en réalité adimensionnel (température-vitesse de l'air). L'indice représente une température de l'air, par temps calme, qui provoque un même taux de déperdition de chaleur au-dessus de la peau nue. Cependant, lorsqu'il s'agit de cet indice, Environnement Canada ne précise pas l'unité,

par exemple, sous une température de -35°C et un vent de 30 km/h, l’indice de refroidissement éolien sera noté – 52.

La plage couverte va de – 50 à + 5°C de température de l’air, et de 0 à 100 km/h pour la vitesse de l’air.

L’équation permettant le calcul de l’indice est :

$$T(re) = 13.12 + 0.6215 * T - 11.37 * V^{0.16} + 0.3965 * T * V^{0.16}$$

Où: T(re) est la température de refroidissement éolien en degrés

V est la vitesse du vent en km/h mesurée à 10m de hauteur

T est la température, de l'air en degrés Celsius

mais dans la pratique, les intéressés font généralement usage du site web d’Environnement Canada ou encore liront cet indice sur un tableau. Environnement Canada situe le niveau de risques selon cet indice dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3. Refroidissement éolien**

Les risques du refroidissement éolien et quoi faire			
Refroidissement éolien	Risques de gelure	Autres risques pour la santé	Quoi faire
0 à -9	<b>Faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Légère augmentation de l’inconfort.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S’habiller chaudement.</li> <li>• Demeurer au sec.</li> </ul>
-10 à -27	<b>Faibles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inconfortable.</li> <li>• Risque d’hypothermie si la personne se trouve à l’extérieur pendant de longues périodes sans protection adéquate.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porter plusieurs couches de vêtements chauds, avec une couche extérieure résistante au vent.</li> <li>• Porter un chapeau, des mitaines ou des gants isolants, un foulard et des chaussures isolantes et imperméables.</li> <li>• Demeurer au sec.</li> <li>• Rester actif.</li> </ul>
-28 à -39	<b>Risque</b> : La peau exposée peut geler en 10 à 30 minutes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque de gelure très superficielle ou d’engelure. Surveiller les engourdissements ou les blancheurs au visage et aux extrémités.</li> <li>• Risque d’hypothermie si la personne se trouve à l’extérieur pendant de longues périodes sans vêtements adéquats ou sans abri contre le vent et le froid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porter plusieurs couches de vêtements chauds, avec une couche extérieure résistante au vent.</li> <li>• Couvrir la peau exposée.</li> <li>• Porter un chapeau, des mitaines ou des gants isolants, un foulard, un tube cache-cou ou un masque, et des chaussures isolantes et imperméables.</li> <li>• Demeurer au sec</li> <li>• Rester actif</li> </ul>

Les risques du refroidissement éolien et quoi faire			
Refroidissement éolien	Risques de gelure	Autres risques pour la santé	Quoi faire
-40 à -47	<b>Risque élevé :</b> La peau exposée peut geler en 5 à 10 minutes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risque élevé de gelure: Surveiller les engourdissements ou les blancheurs au visage et aux extrémités.</li> <li>Risque d'hypothermie si la personne se trouve à l'extérieur pendant de longues périodes sans vêtements adéquats ou sans abri contre le vent et le froid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Porter plusieurs couches de vêtements chauds, avec une couche extérieure résistante au vent.</li> <li>Couvrir toute la peau exposée.</li> <li>Porter un chapeau, des mitaines ou des gants isolants, un foulard, un tube cache-cou ou un masque, et des chaussures isolantes et imperméables.</li> <li>Demeurer au sec</li> <li>Rester actif.</li> </ul>
-48 à -54	<b>Risque très élevé :</b> La peau exposée peut geler en 2 à 5 minutes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Risque très élevé de gelure : surveiller souvent les engourdissements ou la blancheur du visage et des extrémités.</li> <li>Risque sérieux d'hypothermie si la personne se trouve à l'extérieur pendant de longues périodes sans vêtements adéquats ou abri du vent et du froid.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Être prudent. Porter plusieurs couches de vêtements chauds, avec une couche extérieure résistante au vent.</li> <li><b>Couvrir toute la peau exposée.</b></li> <li>Porter un chapeau, des mitaines ou des gants isolants, un foulard, un tube cache-cou ou un masque, et des chaussures isolantes et imperméables.</li> <li><b>Être prêt à réduire la durée de vos activités extérieures et même, à les annuler.</b></li> <li>Demeurer au sec.</li> <li>Rester actif.</li> </ul>
-55 et plus froid	<b>Risque extrêmement élevé:</b> La peau exposée peut geler en moins de deux minutes	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>DANGER!</b> Les conditions extérieures sont <b>dangereuses</b>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Demeurer à l'intérieur.</b></li> </ul>

### 4.3.1 Instrumentation nécessaire

L'indice de refroidissement éolien a été élaboré par un service météorologique gouvernemental et les données nécessaires à son calcul sont la température et la vitesse de l'air et telles que lues dans une station météo classique. Ainsi, la vitesse de l'air considérée, notée  $V_{a10}$ , est celle lue à 10 mètres de hauteur.

Son utilisation est donc très simple lorsqu'une station météorologique officielle se trouve près du lieu de travail considéré. Dans le cas contraire, il suffit de lire ces deux paramètres avec une station météo portable et d'estimer la vitesse de l'air à 10 mètres de la façon suivante :

$V_{a10} = 1,5 V_a$ , où  $V_a$  est la lecture lue au niveau du sol [Holmer, 2009].

### 4.3.2 *Applicabilité*

Le refroidissement éolien est certainement l'indice de froid le plus familier des Québécois et cela représente un net avantage. À l'instar de l'indice humidex, qui est utilisé pour caractériser la chaleur, il n'est pas rare d'entendre les gens citer cette valeur à la place de la température de l'air pour bien illustrer le niveau de froideur. Dans les mines où nous avons séjournés, les travailleurs ne parlaient qu'en termes de refroidissement éolien sans faire mention de la véritable température de l'air. Par contre, les actions proposées au Tableau 3 (*être prudent, demeurer au sec, rester actif*) sont plutôt générales, ne tiennent pas compte du contexte de travail et ne permettent ni de cibler le niveau de protection vestimentaire, ni d'établir un régime d'alternance travail/repos en abri chauffé.

Cet indice est utile pour situer, en une seule valeur, le niveau de froideur auquel on est exposé, mais son utilité pour l'hygiéniste qui doit surveiller l'exposition de travailleurs est extrêmement limitée. Il devrait alors être complété par des recommandations plus précises.



## 5. OBSERVATIONS DE SITUATIONS DE TRAVAIL AU FROID

Deux séjours dans le Nunavik nous ont permis de nous familiariser avec les conditions de grands froids, le premier d'une durée de 10 jours à l'hiver 2011 puis un second, d'une semaine, à l'hiver 2012. Ce dernier a été le plus froid des deux séjours alors que les conditions environnementales atteignaient la limite ultime des catégories des indices Saskatchewan (Urgences seulement) et WCET (-55 °C et plus froid). Nous rapportons ci-dessous les observations faites auprès de trois travailleurs lors de trois journées particulièrement froides (2 au 4 mars 2012). Un de ces travailleurs faisait de l'arpentage, ce qui l'obligeait à effectuer de nombreux déplacements en camionnette qui sont autant d'occasions de réchauffement. Les deux autres étaient chargés d'arroser un pont de glace. Ces derniers étaient alors obligés de demeurer au froid sur de longues périodes, soit pour vider le camion-citerne avant que l'eau ne gèle dans la canalisation, soit pour réparer et dégeler les boyaux. Leur exposition au grand froid a atteint 135 minutes ininterrompues en deux occasions.

Les trois travailleurs étaient âgés entre 47 et 60 ans. Ils avaient tous une vaste expérience du travail dans les régions très froides; Nunavik et Nunavut.

### 5.1 Paramètres

Sur le site même de travail, avec la station météo portable, nous avons enregistré la température, la vitesse et l'humidité de l'air.

Quant aux paramètres physiologiques, nous avons retenu la température buccale et celle de la face dorsale de la main avant et après le quart de travail. Le Purdue Peg Board est le test retenu pour mesurer la dextérité des travailleurs. La valeur après exposition a été comparée à la valeur obtenue en matinée, avant exposition au froid, mais avec tous les vêtements d'extérieur pour inclure l'influence d'une tenue vestimentaire encombrante. Finalement, la fréquence cardiaque a été enregistrée; son principal intérêt réside dans la facilité à identifier les périodes de travail et de pause.

### 5.2 Contraintes observées

Le Tableau 4 montre les valeurs relevées lors de deux journées particulièrement froides. Il ressort clairement que les trois travailleurs observés ont dépassé à de nombreuses reprises et parfois dans une forte proportion, les limites de durée d'exposition recommandées par l'indice Saskatchewan. De la même manière, le refroidissement éolien situait souvent le risque comme étant "très élevé" et "extrêmement élevé". Dans ce dernier cas, il est recommandé de demeurer à l'intérieur. Deux situations sont étonnantes : le 3 mars, vers 10 h 00 AM, où la durée observée est de 120 minutes sous une température de l'air de -35 °C et un vent de 28,8 km/h au sol, pour un indice de refroidissement éolien de -55. Peu de temps après, la même journée vers midi, ces travailleurs ont passé 135 minutes sous un indice de refroidissement éolien de -56. Dans ces deux cas, l'indice Saskatchewan prévoit que seuls les travaux d'urgence aient cours. Environnement Canada, se basant sur le refroidissement éolien, recommande de demeurer à l'intérieur.

Pourtant, les lectures de température buccale prises après le quart de travail se situent, pour l'ensemble des trois travailleurs observés, entre 36,3 et 36,9 °C. Il est donc permis de conclure

qu'aucun de ces travailleurs n'a subi un refroidissement significatif puisque la documentation parle d'hypothermie lorsque cette valeur chute sous 35 °C. D'ailleurs, leur propre évaluation de sensation de froid, sur une échelle de 0 (aucunement froid) à 10 (sensation de gelure) se situe entre 3 et 7, sauf deux cas où, au visage, les travailleurs ont coté 8 et 10. Aucun cas d'engelure ou de gelure n'a été observé.

La tenue vestimentaire de ces sujets était singulière et comprenait des éléments pour lesquels aucune valeur d'isolement vestimentaire n'est disponible. Par exemple, un surtout isolé de conception spéciale, un couvre-chapeau de sécurité double épaisseur, une cagoule qui couvre tout le visage et dirige l'air expiré vers le bas du visage. Aucun de ces éléments ne figure dans la norme ISO 9920 à laquelle réfère la norme ISO 11079 :  $I_{req}$ . Cela illustre bien la difficulté de cette approche qui, bien que reposant sur des bases intéressantes, s'appuie sur une donnée d'isolement vestimentaire qu'il est généralement impossible d'obtenir avec précision et certitude.

**Tableau 4. Données enregistrées en ambiance froide et valeur des indices**

Date/ Heure	Vitesse de l'air (km/h)		Tempé- rature de l'air (°C)	WCET (°C)	Zone de Risque WCET	Indice Saskat- chewan	Durée d'expo. observée (min.)
	à 1,5m	à 10m					
<b>2 Mars</b>							
7 h 00	3,2	5	-31	-40	Élevé	75-2	
8 h 00	7,9	12	-31	-41	Élevé	75-2	135
9 h 00	33,8	51	-32	-52	Très élevé	Urgence	
10 h 00	35,3	53	-32	-52	Très élevé	Urgence	
11 h 00	41,8	63	-33	-55	Extrême	Urgence	
12 h 00	40,3	60	-33	-54	Très élevé	Urgence	95
13 h 00	40,3	60	-32	-53	Très élevé	Urgence	
14 h 00	33,8	51	-33	-53	Très élevé	Urgence	95
15 h 00	32,0	48	-34	-54	Très élevé	Urgence	
<b>3 mars</b>							
10 h 00	28,8	43	-35	-55	Extrême	Urgence	120
11 h 00	35,3	53	-34	-55	Extrême	Urgence	
12 h 00	41,8	63	-34	-56	Extrême	Urgence	135
13 h 00	41,8	63	-33	-56	Extrême	Urgence	
14 h 00	43,6	65	-33	-55	Extrême	Urgence	35
<b>4 mars</b>							
11 h 00	13,0	19	-31	-44	Élevé	40-4	
12 h 00	16,2	24	-32	-47	Élevé	40-4	
13 h 00	17,6	26	-30	-45	Élevé	55-3	
14 h 00	11,2	17	-30	-42	Élevé	75-2	
15 h 00	11,8	17	-30	-42	Élevé	75-2	

### 5.3 Impact sur la dextérité

Le test de *Purdue Peg Board* consiste à réaliser de petits assemblages simples constitués de très petites pièces. Le score rapporté au Tableau 5 représente le nombre d'assemblages réalisés en une minute. Ainsi, plus le score est élevé, meilleure est la dextérité du sujet.

**Tableau 5. Résultats au test de Purdue**

Code Sujet	Date	Pré ou post Exposition	Température dos de la main (°C)	Score Essai 1	Score Essai 2
<b>1</b>	2 mars	Post	22,3	31	36
	3 mars	Post	35,5	39	38
	5 mars	Pré	32,2	40	40
<b>2</b>	2mars	Post	23,2	26	28
	3 mars	Post	28,6	32	34
	4 mars	Post	27,2	32	32
	5 mars	Pré	30,2	34	32
<b>3</b>	2 mars	Post	27,2	15	19
	3 mars	Post	30,3	23	24
	4 mars	Post	30,4	22	22
	5 mars	Pré	31,7	25	27

Tel que rapporté dans notre revue de la documentation, une température de la peau sur le dessus de la main de 24 °C marque le début d'une perte de dextérité. L'ampleur modeste de notre étude ne nous permet pas de valider cette affirmation, mais il est clair que la dextérité de nos sujets a été affectée par le froid. Les sujets 1 et 2 se sont présentés une fois alors que la température était sous 24 °C et ont réalisé leur plus faible score sur le test Purdue. Le sujet 1 a montré la valeur la plus faible à 22.3 °C. Ce sujet est arpenteur et doit à l'occasion enlever sa grosse mitaine pour ajuster ses instruments. Pour les trois sujets, leur meilleure performance a été observée lors du test pré exposition.

### 5.4 Conclusion

Les indices Saskatchewan et refroidissement éolien sont très cohérents. Cela n'a rien de surprenant puisqu'ils se basent sur les deux mêmes paramètres de l'environnement. Toutefois, l'indice Saskatchewan va plus loin en proposant un régime d'alternance entre le travail au froid et les pauses en abri chauffé alors que le refroidissement éolien se limite à des recommandations qualitatives. Sans être douillet, les deux indices semblent assurer une protection acceptable pour les travailleurs informés qui disposent des mesures nécessaires en termes d'abri et de vêtements. Les deux indices peuvent se baser sur les données d'une station météorologique existante, ou requièrent un même appareillage portatif facilement accessible.

L'indice  $I_{req}$  ne répond pas aux besoins du nord du Québec autant par les conditions météo qu'il couvre (ou ne couvre pas dans le cas du vent) que des données concernant les tenues vestimentaires qui ne sont pas disponibles dans la norme ISO 9920.

L'indice de refroidissement éolien (WCET) est familier et sa base scientifique, à laquelle les services météorologiques du Canada et des États-Unis ont contribué, est bien documentée. Par

contre, les recommandations du WCET (c.-à-d. *porter des couches de vêtements chauds, demeurer au sec, rester actif, réduire la durée de vos activités extérieures*) sont extrêmement générales quant aux mesures de prévention à privilégier. Il faudrait considérer enrichir cet indice de recommandations plus précises pour en faire un véritable outil de prévention. Dans leur formulation actuelle, aucun indice d'exposition au froid ne rencontre à la fois les exigences en termes d'assise scientifique et d'utilité.

## 6. L'INDICE DE CONFORT THERMIQUE PREDICTED MEAN VOTE ET PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED (PMV-PPD)

L'indice *PMV-PPD* (ISO 7730) concerne le confort des gens au regard de l'ambiance thermique des espaces intérieurs de travail. Il offre une alternative plus articulée et mieux documentée à l'application de l'Annexe IV du RSST qui accuse un sérieux retard. Puisqu'il concerne des espaces intérieurs, aucune validation spécifique à notre climat n'est nécessaire.

Contrairement aux autres indices discutés dans ce rapport et conçus pour évaluer la contrainte thermique, le *PMV* et *PPD* a pour objet l'analyse des conditions de confort thermique. Celui-ci est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement. La sensation de confort peut être observée lorsque le bilan thermique est équilibré moyennant des valeurs optimales de température de la peau et d'évaporation. L'idée originale de la norme ISO 7730 fut d'introduire le calcul de ces deux paramètres dans le bilan thermique. On en obtint une équation qui est fonction de six paramètres primaires: température de l'air :  $T_a$ , température moyenne de rayonnement :  $T_{mr}$ , pression partielle de vapeur d'eau :  $P_a$ , vitesse de l'air :  $V_a$ , métabolisme :  $M$ , et isolation vestimentaire :  $clo$ . Cette équation a donc permis, connaissant cinq des paramètres, de déduire le niveau optimal du sixième (généralement la température de l'air) pour que l'ambiance thermique soit jugée confortable.

### 6.1 Le Predicted Mean Vote (PMV)

En plus de définir les conditions optimales de confort, la méthode proposée par Fanger permet de quantifier quelle sensation de chaleur serait associée à des conditions quelque peu différentes. À cette fin, on utilise l'indice *PMV*. Cet indice est basé sur le vote moyen prédit correspondant à la moyenne des votes de sensation thermique qu'un groupe de personnes exprimeraient dans une ambiance donnée sur une échelle en sept points: +3 très chaud, +2 chaud, +1 légèrement chaud, 0 ni chaud ni froid, -1 légèrement frais, -2 frais et -3 froid. La norme ISO 7730 comprend une série de tables donnant la valeur du *PMV* en fonction du métabolisme, de l'isolation vestimentaire, de la vitesse de l'air et de la température opérative ( $T_{op}$ ) :

$$T_{op} = a T_a + (1-a) T_{mr}$$

Où:  $T_{mr}$  est la température moyenne de rayonnement,

$V_a$  est la vitesse relative de l'air, et

$$a = 0.5 + 0.25 V_a$$

Si cette vitesse est nulle, ce qui est fréquent dans les espaces de travail intérieurs, la température opérative est la moyenne arithmétique des températures de l'air et de rayonnement. Cette dernière valeur est calculée à partir des lectures de  $T_a$ ,  $V_a$  et de la température au globe noir ( $T_g$ ) de la façon suivante :

$$T_{mr} = ((T_g + 273)^4 + 2.5 \cdot 10^8 \cdot V_a^{0.6} (T_g - T_a))^{0.25} - 273$$

En l'absence d'échange par rayonnement, par exemple si le poste de travail se situe loin des fenêtres, la température globe se situe au niveau de celle de l'air ainsi que la température

moyenne de rayonnement. Dans ce dernier cas, il est possible de substituer simplement la température de l'air à la température opérative.

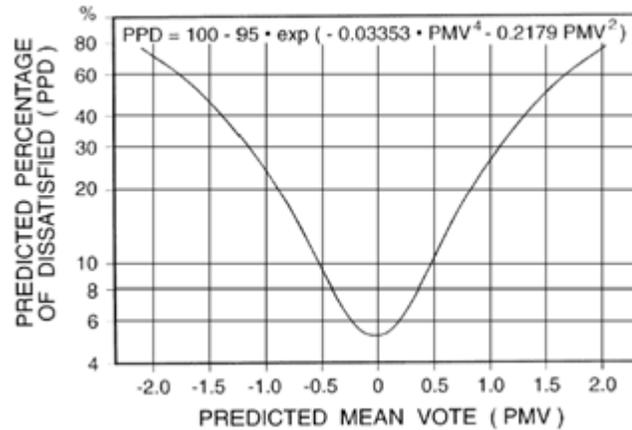
Le Tableau 6 présente un des nombreux tableaux qui composent la norme ISO 7730. Il permet de déterminer la température opérative qui satisferait le plus grand nombre, soit un PMV égal à zéro, pour un métabolisme, un isolement vestimentaire et une vitesse relative de l'air donnés. Mais un PMV de zéro ne contentera pas tous les occupants. Cette réflexion nous amène à l'indice PPD.

**Tableau 6. Exemple de valeurs de PMV (d'après la norme ISO 7730)**

	VÊTE- MENT CLO	TEMP. OPÉ. °C	VITESSE RELATIVE (m/s)										
			< 0,10	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	1,00	1,50		
Niveau d'activité 70 W/m <sup>2</sup> (125 W)	0,50	18	-2,01	-2,01	-2,17	-2,38	-2,70						
		20	-1,41	-1,41	-1,58	-1,76	-2,04	-2,25	-2,42				
		22	-0,79	-0,79	-0,97	-1,13	-1,36	-1,54	-1,69	-2,17	-2,46		
		24	-0,17	-0,20	-0,36	-0,48	-0,68	-0,83	-0,95	-1,35	-1,59		
		26	0,44	0,39	0,26	0,16	0,01	-0,11	-0,21	-0,52	-0,71		
		28	1,05	0,98	0,83	0,81	0,70	0,61	0,54	0,31	0,16		
		30	1,64	1,57	1,51	1,46	1,39	1,33	1,29	1,14	1,04		
			32	2,25	2,20	2,17	2,15	2,11	2,09	2,07	1,99	1,95	
		0,75	16	-1,77	-1,77	-1,91	-2,07	-2,31	-2,49				
			18	-1,27	-1,27	-1,42	-1,56	-1,77	-1,93	-2,05	-2,45		
			20	-0,77	-0,77	-0,92	-1,04	-1,23	-1,36	-1,47	-1,82	-2,02	
			22	-0,25	-0,27	-0,40	-0,51	-0,66	0,78	-0,87	-1,17	-1,34	
			24	0,27	0,23	0,12	0,03	-0,10	-0,19	-0,27	-0,51	0,65	
			26	0,76	0,73	0,64	0,57	0,47	0,40	0,34	0,14	0,03	
			28	1,29	1,23	1,17	1,12	1,04	0,99	0,94	0,80	0,72	
			30	1,80	1,74	1,70	1,67	1,62	1,58	1,55	1,46	1,41	
		1,00	16	-1,18	-1,18	-1,31	-1,43	-1,59	-1,72	-1,82	-2,12	-2,29	
			18	-0,75	-0,75	-0,88	-0,98	-1,13	-1,24	-1,33	-1,59	-1,75	
			20	-0,32	-0,33	-0,45	-0,54	-0,67	-0,76	-0,83	-1,07	-1,20	
			22	0,13	0,10	0,00	-0,07	-0,18	-0,26	-0,32	-0,52	-0,64	
			24	0,58	0,54	0,46	0,40	0,31	0,24	0,19	0,02	-0,07	
			26	1,03	0,98	0,91	0,86	0,79	0,74	0,70	0,57	0,50	
			28	1,47	1,42	1,37	1,34	1,28	1,24	1,21	1,12	1,06	
			30	1,91	1,86	1,83	1,81	1,78	1,75	1,73	1,67	1,63	

## 6.2 Le Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD)

Le pourcentage prédit d'insatisfaits représente la proportion de personnes qui, placées dans des conditions identiques, répondent avoir frais ou froid (vote de -2 à -3) ou chaud ou très chaud (vote de +2 à +3). La Figure 3 illustre la relation entre les indices *PMV* et *PPD*. On y voit qu'aucune condition thermique ne peut satisfaire 100 % des gens. Même dans le cas le plus favorable (*PMV* = 0), il subsiste 5 % d'insatisfaits. Pour un *PMV* égal à +1 ou -1 (légèrement chaud et légèrement frais), le *PPD* sera de 27 et 24 %. La norme ISO 7730 préconise de limiter le *PPD* à 10 %, ce qui revient à limiter l'intervalle acceptable du *PMV* entre -0.5 et +0.5.



**Figure 3. Pourcentage prédit d'insatisfaits (PPD) en fonction du vote moyen prédit (PMV)**

### 6.3 Instrumentation nécessaire

Cette norme peut s'appliquer de façon rigoureuse et nécessite alors la lecture de la température et de la vitesse de l'air, en plus de la température globe afin de calculer la température de rayonnement. Elle exige également d'estimer le niveau de métabolisme et l'isolement vestimentaire que portent les occupants.

Par contre, sous certaines conditions, il est possible de s'en tirer avec peu d'instruments. Tel que rapporté plus haut, si la vitesse de l'air est de 2 m/s ou plus, alors la  $T_{op}$  se fond avec la température de l'air. Cependant, une telle vitesse relative de l'air se rencontre rarement en milieu de travail intérieur. À l'opposé, l'absence de rayonnement est beaucoup plus fréquente : espaces de travail sans fenêtres, ou avec stores. Dans ce cas, les températures de l'air et opératives ont la même valeur.

### 6.4 Applicabilité

L'applicabilité de cette norme requiert minimalement la lecture de la vitesse de l'air. Des instruments intégrateurs à bon marché permettent maintenant une lecture de précision acceptable pour ce paramètre. L'accessibilité de ces indices sera améliorée par un programme informatique qui reconnaît les situations où la température de l'air peut être substituée à la température opérative ( $V_a \geq 2$  m/s ou absence de rayonnement) pour permettre à l'utilisateur de situer le confort thermique dans son espace sans avoir recours à un instrument qui comprend le globe de Vernon.

L'estimation du niveau d'activité est connue de tout intéressé par la contrainte thermique et les valeurs d'isolement pour les vêtements d'usage courant sont facilement accessibles.



## 7. TRAVAIL SOUS DES AMBIANCES EXCESSIVEMENT CHAUDES

Contrairement aux ambiances froides, nous ne rapportons pas ici une revue exhaustive de la documentation concernant le travail en ambiances chaudes pour diverses raisons. D'abord, les versions des deux indices dominants sont bien connus, quoique encore récents : les TLV de l'ACGIH ont été mis à jour en 2007 et se basent sur l'indice WBGT pour une étape de dépistage des conditions de travail à risque. De son côté, l'indice ISO 7933 : *Ergonomie des ambiances thermiques – Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondée sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible* (ci-après nommée PHS) a été modifié en 2004 et a fait l'objet de nombreuses études. Aussi, le chercheur principal et l'expert scientifique de cette activité ont été impliqués régulièrement et encore récemment dans le domaine.

Un projet récent a permis d'offrir des utilitaires qui sont hébergés sur le site web de l'IRSST dont l'un permet l'application de l'indice WBGT en accord avec la version du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) du Québec et un autre offre la version 2007 des TLV de l'ACGIH. Cette dernière prévoit, conformément au document des TLV, une correction pour le port de quelques types de vêtements de protection par l'application d'un facteur d'ajustement pour vêtements (CAF) et propose une courbe dite "action" qui peut déterminer également les limites d'exposition de travailleurs non-acclimatés.

Il n'y a pas de définition répandue, mais nous entendons par "excessivement chaude" des ambiances se situant au-dessus de 32 °C-WBGT. Parce que les limites d'exposition prescrites par l'indice WBGT ont été fixées empiriquement sur la base d'une étude [Lind 1963] dont l'ambiance thermique extérieure variait entre 10 et 32 °C-WBGT, et que cette étude s'appuyait sur la température rectale à l'équilibre, rien ne permet de supposer que cet équilibre serait observé sous des contraintes plus sévères. La présente activité doit étudier la pertinence et, le cas échéant, les conditions d'application de deux approches dans le cas spécifique de ces ambiances thermiques excessivement chaudes. Ces deux approches sont, d'abord, la *Short-Term Exposure Limit* (STEL) proposée par Bernard et Ashley (2009) laquelle est basée sur la température WBGT puis, le PHS dont le champ d'application déborde déjà celui de la température WBGT, mais qui devrait néanmoins être étendu pour permettre des valeurs de la température de l'air, de pression partielle de vapeur d'eau (humidité) et d'isolement vestimentaire plus élevées que ce qui est prescrit dans la norme ISO 7933, à savoir 50 °C, 4,5 kPa et 1,0 clo respectivement.

Dans ces conditions extrêmement chaudes, la température corporelle devrait atteindre la limite sécuritaire (généralement 38 °C), bien avant que le déficit hydrique (déshydratation) soit significatif. Dans le cas de la fréquence cardiaque, autre domaine de l'astreinte thermique, les gestionnaires doivent vérifier sur le terrain que sa valeur soit acceptable jusqu'à ce que la température rectale atteigne sa limite.

### 7.1 Le Short-Term Exposure Limit (STEL)

Le STEL a été proposée il y a plus de trois ans et une version en ligne a été rendue accessible sur le portail du chercheur Thomas Bernard avant même la parution de l'article dans *le Journal of Occupational and Environmental Hygiene* [Bernard et Ashley, 2009].

### 7.1.1 Instrumentation nécessaire

A priori simple d'application, cet indice requiert la détermination de l'indice WBGT, du niveau de métabolisme et du facteur d'ajustement pour les vêtements non standards (ou CAF). Les deux premiers paramètres sont connus de toute personne intéressée par la contrainte thermique alors que les facteurs d'ajustement pour les vêtements sont obtenus dans la documentation scientifique, en provenance de l'équipe du chercheur Bernard. Des outils web permettent de déterminer le *Safe Exposure Time* (SET).

La Figure 4 illustre la courbe pour une situation de travail où le métabolisme est de 348 watts et le CAF est zéro, correspondant à des vêtements de travail normaux. Cette figure permet de lire une durée d'exposition sécuritaire (SET) selon l'indice WBGT entre 30 et 55 °C.

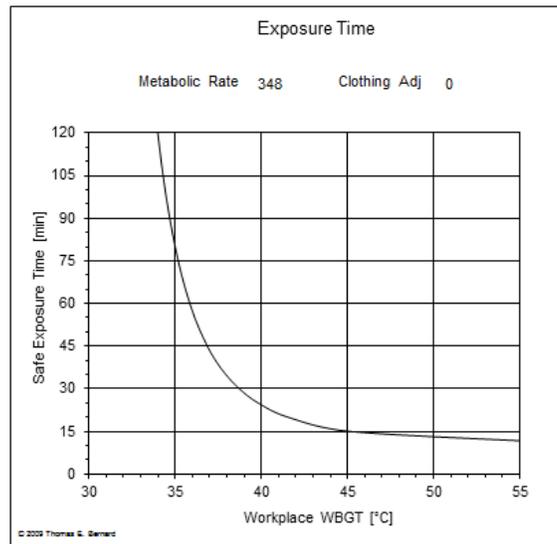


Figure 4. Durée d'exposition sécuritaire (SET) selon le *Short-Term Exposure Limit*

### 7.1.2 Applicabilité

D'entrée de jeu, les valeurs de SET (Figure 4) sont surprenantes. Par exemple, pour un indice WBGT de 36°C, elle dépasse légèrement 60 minutes. Il s'agirait dans ce cadre d'application d'une exposition unique, après laquelle le travailleur aurait la possibilité de récupérer librement dans une ambiance supposée plus fraîche mais non définie. L'indice WBGT selon le RSST ou les TLV situe à 27.5 °C la limite d'exposition pour un métabolisme de 349 watts. Ces deux versions de l'indice WBGT s'appliquent sur toute période de 60 minutes et prétendent limiter la hausse de température corporelle profonde à 38 °C.

Cette incohérence s'expliquerait, selon les auteurs (Bernard, communications personnelles) par le fait que les limites ne sont pas fixées sur la même base. Celles prescrites dans les TLV (comme celles du RSST d'ailleurs) sont extraites des travaux de Lind (1963) sur la base des températures rectales à équilibre ( $T_{rec,eq}$ ) des sujets exposés à un niveau de contrainte environnementale constant. Tel qu'illustré à la Figure 5 (gauche), la température rectale atteint un plateau qui varie selon le niveau de contrainte environnementale.

Par exemple, sous un environnement de 29.5°C-WBGT, la  $T_{rec,eq}$  se situe à environ 38°C. Lind a défini des "prescriptive zones" sur cette base et les auteurs qui ont suivi ont déterminé de telles limites pour divers niveaux de métabolisme pour ainsi former les courbes retrouvées aussi bien dans le RSST que dans les TLV.

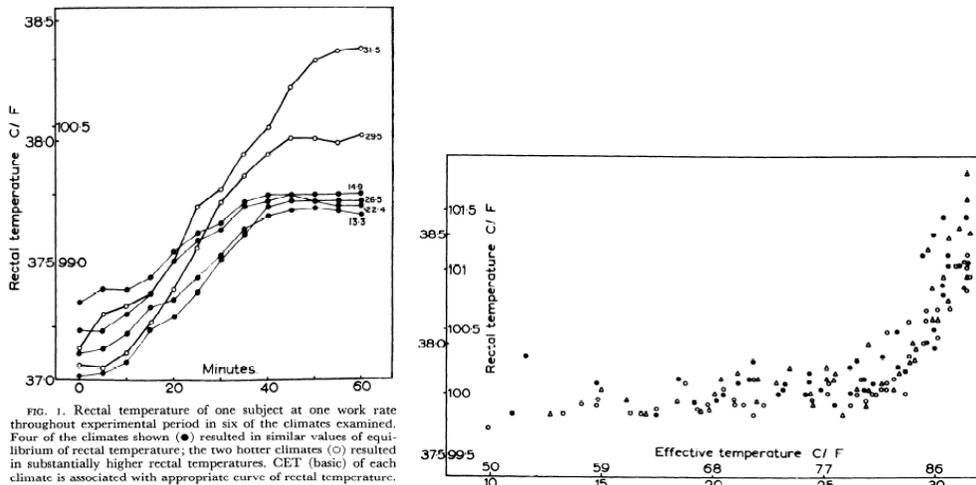
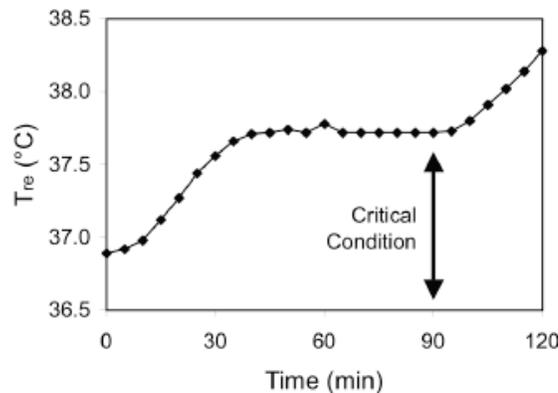


FIG. 1. Rectal temperature of one subject at one work rate throughout experimental period in six of the climates examined. Four of the climates shown (●) resulted in similar values of equilibrium of rectal temperature; the two hotter climates (○) resulted in substantially higher rectal temperatures. CET (basic) of each climate is associated with appropriate curve of rectal temperature.

**Figure 5. Concept de température rectale à équilibre (gauche) et relation  $T_{rec,eq}$  vs environnement thermique à  $M = 348$  watts (droite) (Tiré de Lind, 1963)**

Il s'agirait donc bien dans cette approche de limites pour une température centrale de 38 °C.

La méthode utilisée pour déterminer les SET dans l'élaboration de la STEL serait différente. Bernard et Ashley (2009) se basent ici sur la valeur WBGT critique ( $WBGT_{crit}$ ). Cette valeur est déterminée lors d'expériences durant lesquelles le niveau de contrainte environnementale est augmenté graduellement, pour un ensemble de conditions données (métabolisme et tenue vestimentaire). La valeur  $WBGT_{crit}$  est celle qui prévalait cinq minutes avant que l'équilibre de la température rectale soit rompu et que celle-ci augmente à nouveau (Figure 6). Cette approche expérimentale ne peut être valable que si un état d'équilibre est atteint à chaque niveau de contrainte expérimentale. Si tel est le cas (et ceci n'a pas été prouvé), le  $WBGT_{crit}$  ne correspond pas nécessairement à une température centrale de 38 °C, comme le montre en particulier la figure 6.



**Figure 6. Concept de condition critique [Bernard, 2009]**

Les valeurs SET reposeraient ainsi sur des observations où l'équilibre de la température rectale est sur le point d'être rompu, alors que l'indice WBGT déterminerait plutôt des situations où la température centrale a atteint 38 °C. Et la différence n'est pas mince. Revenons à l'exemple cité plus tôt d'une personne exerçant une tâche à 348 watts, exposée à un environnement de 36 °C-WBGT dont la SET (Figure 4) est de plus de 60 minutes alors que la TLV est de 27,5 °C-WBGT. Le graphique de droite de la Figure 5 illustre justement les valeurs de la température rectale à l'équilibre pour ce niveau de métabolisme. Il est facile de constater qu'une extrapolation au niveau d'une température effective de 36 °C montrerait une température rectale totalement inacceptable, voire fatale.

La STEL propose de plus un *clothing adjustment factor* (CAF). Un petit nombre de valeurs de CAF a été proposé par l'équipe du même chercheur principal [Bernard, 2004; Bernard, 2008]. Le mode d'application est d'ajouter le CAF à la valeur WBGT lue dans le milieu de travail pour obtenir une valeur WBGT corrigée ( $WBGT_{corr}$ ). Les CAF ont été déterminés expérimentalement et les auteurs proposent une seule et même valeur pour toutes les conditions de métabolisme et d'ambiance étudiées. Le Tableau 7, tiré de Bernard et coll. (2004), illustre les valeurs obtenues.

**Tableau 7. Valeurs de CAF [Bernard, 2004]**

Ensemble	$R_{e,t}$ [kPa m <sup>3</sup> /W]	CAF [°C-WBGT]
Work Clothes w/ Undershirt	0.0131	0.0
Tyvek® 1422A Coveralls with Hood	0.0164	1.8
Spun-bonded, melt-blown polypropylene Coveralls w/ Hood	0.0109	-1.1
Amoco Microporous Film Coveralls with Hood	0.0176	2.6
Limited Use Vapor-barrier Coveralls with Hood (literature)	N/A	8
Encapsulating Suit (literature)	N/A	11
ProTech 2000 Coveralls with Hood (estimated)	N/A	0
ProTech 2000 Coveralls with Hood and Scrub Suit	0.0196	3.0
Cloth Coveralls with Hat (CAF estimated)	0.0176	3.5
Cloth Coveralls with Hood and Scrub Suit (CAF estimated)	0.0256	4.5
Zirpo® Wool Shirt & FR8 Denim Pants	0.0141	0.5
FR9 Cotton Shirt and Pants (no undershirt)	0.0144	0.8
FR9 with Undershirt	0.0156	1.3
FR9 w/ Undershirt and Single-layer Jacket-closed	0.0169	2.1
FR9 w/ Undershirt and Double-layer Jacket-open	0.0187	2.6
FR9 w/ Undershirt and Double-layer Jacket-closed	0.0175	3.2

De toutes les valeurs se trouvant dans ce Tableau, seule celle du surtout de travail avec casque (*cloth coveralls with hat*) peut être utile dans les situations de travail sous chaleur extrême. Notons que cette valeur est estimée, et non déterminée expérimentalement. Tous les autres items de cette liste concernent des éléments de protection contre des agresseurs chimiques ou biologiques qui ne sont jamais portés sous une chaleur extrême parce qu'ils sont fabriqués de fibres synthétiques qui peuvent fondre, voire s'enflammer, sous de telles conditions.

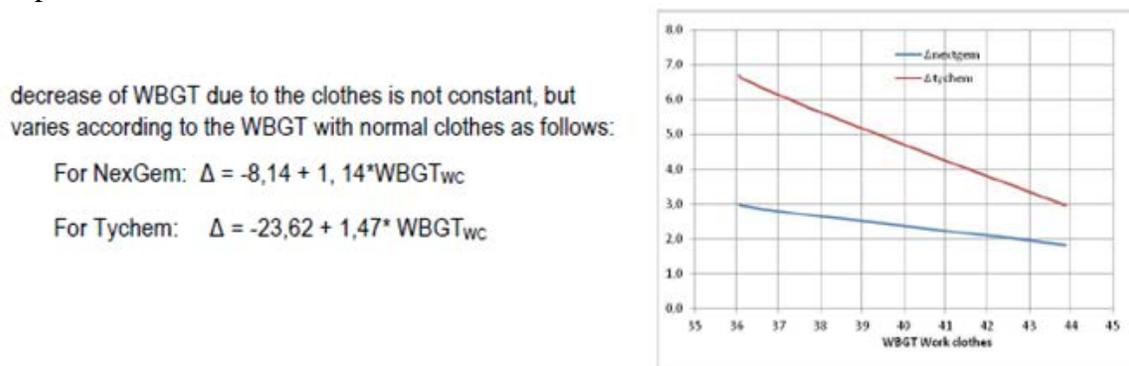
Le fait qu'un seul et même CAF puisse être appliqué sous toute condition environnementale [Bernard, 2004] et tout niveau de métabolisme [Bernard, 2004; Bernard, 2008] nous apparaît questionnable pour différentes raisons. Logiquement d'abord. Dans l'application de la STEL, le CAF est ajouté à la valeur WBGT lue pour obtenir un  $WBGT_{corr}$  et ainsi tenir compte des vêtements plus isolants que les vêtements de travail normaux. Donc, l'ajout de vêtements serait toujours défavorable, quel que soit le niveau de contrainte. Ainsi avec un surtout de travail et le port d'un casque, un indice WBGT de 36 °C devrait être corrigé de 3,5 unités, soit 39,5 °C et, selon la Figure 4, la SET serait abaissée d'environ 60 à 25 minutes. Cela est en contradiction

avec nos observations sur le terrain qui ont montré que les travailleurs exposés à des ambiances thermiques excessivement chaudes optent pour une tenue vestimentaire plus lourde que les vêtements de travail normaux. Un tel choix s'explique rationnellement puisque dans de telles ambiances, l'apport de chaleur par convection et par rayonnement depuis l'environnement vers la personne devient plus important que la perte de chaleur depuis la personne vers l'environnement. Il y a donc un niveau de contrainte au-delà duquel il devient pertinent d'augmenter la tenue vestimentaire.

Personne ne songerait à envoyer un pompier combattre un brasier sans une lourde tenue vestimentaire et ce, même sous la seule considération de la contrainte thermique.

D'autre part, l'analyse de trois articles [Bernard, 2008; Bernard, 2005; Bernard, 2009] révèle quelques incohérences. La différence entre les valeurs de WBGT limite et la valeur WBGT établie avec la tenue vestimentaire considérée varie largement : 10,3 vs 8,9 °C pour les vêtements de travail normaux; 5,5 vs 2,4 °C pour une combinaison Tychem [Bernard, 2008]. Dans une étude comparant l'impact de quatre ensembles vestimentaires sous trois taux d'humidité ambiante différents [Bernard, 2005], la seule combinaison pour laquelle l'humidité est significative est celle qui est totalement imperméable. Or, il est connu que le port d'une telle combinaison crée une condition de saturation d'humidité à l'intérieur du vêtement et que le taux d'évaporation ne dépend plus de l'ambiance [Dessureault, 1995]. Finalement, sur la base des données rapportées dans Bernard et Ashley (2009), nous avons établi les relations entre la température WBGT et les *Safe Exposure Times* (SET) proposés pour deux ensembles (Nexgen et Tychem). Celles-ci montrent que pour un même SET, l'impact du vêtement sur le WBGT critique n'est pas constant mais varie selon les équations trouvées à la Figure 7.

Des échanges de documents et une rencontre avec le chercheur Bernard ne nous ont pas convaincu et nous demeurons persuadés que l'approche qui consiste à ajouter un CAF à la lecture WBGT n'est pas viable pour l'ensemble des ambiances excessivement chaudes que la STEL prétend couvrir.



**Figure 7. Analyse des corrections de deux ensembles selon le WBGT**

En conclusion, le *Short-Term Exposure Limit* (STEL) utilise l'indice WBGT au-delà des limites des études qui ont soutenu son développement empirique. Les *Safe Exposure Time* (SET) sont arrêtés sur une base de température rectale différente de celle à l'origine des limites connues et largement utilisées. Des CAF sont proposées pour tenir compte de l'influence de vêtements différents des vêtements ordinaires. Mais le fait que la STEL retienne un seul et même CAF pour

tout niveau d'ambiance thermique autant que de métabolisme est très contestable et intuitivement inconcevable.

D'ailleurs l'ACGIH dans sa TLV utilise depuis 2007 l'indice WBGT à l'étape de dépistage (*Screening*) et recommande l'analyse rationnelle selon ISO 7933 pour les situations où les risques de dépassement des courbes sont présents, ce qui est manifestement le cas dans le champ d'application de la STEL. Finalement, malgré que l'article proposant la STEL soit paru depuis plus de trois ans et que l'outil web soit disponible depuis encore plus longtemps, aucun article n'est venu confirmer sa performance et sa pertinence. Pour ces raisons, nous ne retenons pas cet indice dans sa forme actuelle.

## 7.2 L'indice de l'astreinte thermique prévisible (PHS)

Contrairement à l'indice WBGT, l'indice PHS (*Predicted Heat Strain*) repose sur un bilan des échanges thermiques entre la personne et son environnement. Il est l'évolution du Heat Stress Index développé par Belding et Hatch en 1955, amélioré par Givoni en 1963, puis par Vogt et coll. en 1981 et finalement au cours du vaste programme international BIOMED durant les années '90 sous la direction de Jacques Malchaire. Suite à ce dernier programme la norme ISO 7933, jusqu'alors connue sous l'appellation de « Sudation requise » fut considérablement revue [ISO7933, 2004] et renommée *Predicted Heat Strain*.

L'approche repose à la fois sur la thermodynamique et sur la physiologie. Les échanges par convection, rayonnement ou évaporation, autant à la surface du corps que via les voies respiratoires, obéissent aux règles thermodynamiques. Les algorithmes permettant leur calcul, assez complexe, ont été ajustés et le bilan thermique complet peut être calculé avec une précision tout-à-fait acceptable, parfois surprenante tel qu'en témoignent les observations sur le terrain d'un regroupement de chercheurs [Biomed, 1999].

Les réactions physiologiques associées au travail à la chaleur sont d'ordre vasomoteur, sudoral (hydrique), cardiaque et thermique (températures corporelles). Elles sont également bien documentées et la précision de la norme est démontrée pour les situations de travail se situant à l'intérieur des limites des différents paramètres nécessaires à son application.

L'interprétation des valeurs calculées par cette méthode analytique se fait sur la base de deux limites d'astreinte : une température rectale de 38 °C et une perte hydrique de 5 % de la masse corporelle.

Cet indice couvre déjà des ambiances thermiques de travail très chaudes. Si on considère à la fois chaque paramètre à sa limite supérieure ( $T_a = 50^\circ\text{C}$ ;  $T_g = 60^\circ\text{C}$ ;  $p_a = 4.5 \text{ kPa}$ ;  $V_a = 0 \text{ m/s}$ ;  $I_{cl} = 1.0 \text{ clo}$ ), l'indice WBGT correspondant est de 39.8 °C, ce qui est bien au-delà des 32 °C cités plus haut. Ainsi, cet indice permet de couvrir la plupart des situations de travail. Cependant, notre objectif est également de vérifier s'il est possible que son application couvre des situations de travail allant jusqu'à 45 °C-WBGT.

### 7.2.1 Instrumentation nécessaire

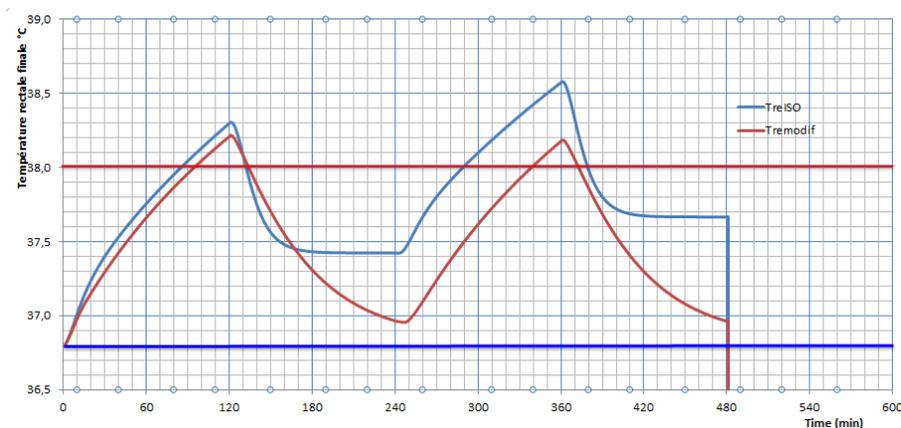
L'application de la norme ISO 7933, PHS nécessite l'évaluation de tous les paramètres de l'ambiance thermique (température, vitesse et humidité de l'air, température du globe noir), la

détermination du métabolisme et de l'isolement vestimentaire. Contrairement à l'indice WBGT, il tient compte directement de la vitesse de l'air et de l'isolement vestimentaire. Les instruments récents permettent de lire la moyenne pondérée de la vitesse de l'air sur des périodes de durées variables (typiquement 2 et 10 minutes). Quant à l'isolement vestimentaire, plusieurs tables rapportent des valeurs pour les vêtements de travail d'utilisation fréquente en ambiance excessivement chaude.

## 7.2.2 Applicabilité

L'indice WBGT et les indices antérieurs, permettent, au mieux, de déterminer l'astreinte, à l'équilibre, lors d'une exposition à la chaleur. Comme le montre la Figure 8, la nouveauté essentielle du modèle PHS est de prédire l'évolution des paramètres d'astreinte (température centrale et perte hydrique) au cours de cette exposition. Ceci permet naturellement de prédire cette évolution, non seulement lors d'une exposition continue, mais lorsque les conditions d'exposition changent au cours du temps, comme cela est pratiquement toujours le cas.

Tel que le PHS est présenté dans la norme actuelle [ISO 7933, 2004], l'algorithme ne considère pas la dissipation de la chaleur corporelle durant une exposition peu contraignante qui suit une période marquée par une élévation de température rectale et la température centrale prédite ne retourne pas à 36,8 °C lors d'une récupération (courbe en bleu, Figure 8). Les algorithmes ont été corrigés (courbe rouge) et validés au moyen de la base de données BIOMED.



**Figure 8. Évolution des températures rectales prédites selon la norme ISO 7933 actuelle et avec les modifications proposées aux algorithmes**

Le développement d'un outil informatique a permis une analyse itérative exhaustive des combinaisons de paramètres de l'environnement aussi bien que d'isolement vestimentaire et de métabolisme. Ce processus a relevé quelques variations incohérentes quant à la durée limite d'exposition (DLE) pour atteindre une température rectale de 38 °C. Toutes ces situations incohérentes avaient pour cause l'algorithme qui déterminait la capacité maximale de sudation ( $SW_{max}$ ) en fonction du métabolisme entre une valeur minimale (250 W) et une valeur maximale (400 W). Il va de soi qu'il y ait un maximum, les glandes sudoripares ont une capacité certes limitée. Le concept même d'un minimum est moins évident. Le fait de fixer  $SW_{max}$  à 400 pour les non acclimatés au lieu de le faire varier en fonction du métabolisme corrige ces situations.

En conclusion, il était connu que la norme ISO 7933, telle qu'elle est énoncée à ce jour, doit être corrigée en ce qui concerne l'estimation de la sudation maximale et la dissipation de chaleur accumulée dans le corps. Ces deux modifications seront soumises au Groupe de travail sur l'environnement thermique ISO TC/159 WG 1 pour fins de correction de la norme.

Avec ces deux modifications, l'indice PHS s'avèrerait un outil pertinent d'analyse des contraintes thermiques très chaudes.

### 7.3 Comparaison STEL versus PHS

Une simple comparaison entre les indices STEL et PHS confirme les critiques que nous avons formulées envers la STEL. La Figure 9 montre les valeurs de durée d'exposition obtenues (DLE dans le cas de la PHS et SET dans le cas de la STEL) pour des situations de travail avec le même métabolisme, la même humidité absolue, la même vitesse d'air et des températures de l'air ( $T_a$ ) et globe ( $T_g$ ) croissantes. Pour chacune, le WBGT a été calculé ainsi que le SET. Ces calculs ont été réalisés pour des isolements thermiques vestimentaires de 0,6 clo (vêtements de travail normaux) et 1,3 clo (surtout double épaisseur pour lequel le *clothing adjustment factor* (CAF) est égal à 3). Les résultats sont présentés en fonction de l'indice WBGT.

Les deux courbes PHS de la Figure 9 montrent que la DLE prédite est plus courte pour un isolement vestimentaire plus lourd (1,3 vs 0,6 clo) jusqu'à un WBGT de 39-40 °C et que cela s'inverse au-delà, confirmant ce que nous avons dit précédemment que, dans les ambiances extrêmement chaudes, le vêtement joue un rôle protecteur. Les valeurs SET (de la STEL) sont supérieures aux DLE (de PHS) jusqu'à 40 °C-WBGT pour 0,6 clo et 35 °C pour 1,3 clo. Les différences sont majeures puisque, à WBGT=35 °C et pour 0,6 clo (vêtements de travail ordinaires), la SET est égale à 90 minutes alors que la DLE est de 45 minutes.

Il est clair que sur la base scientifique, l'indice PHS est largement supérieur, mieux documenté, plus récent et que par conséquent cette approche est celle qui doit être retenue.

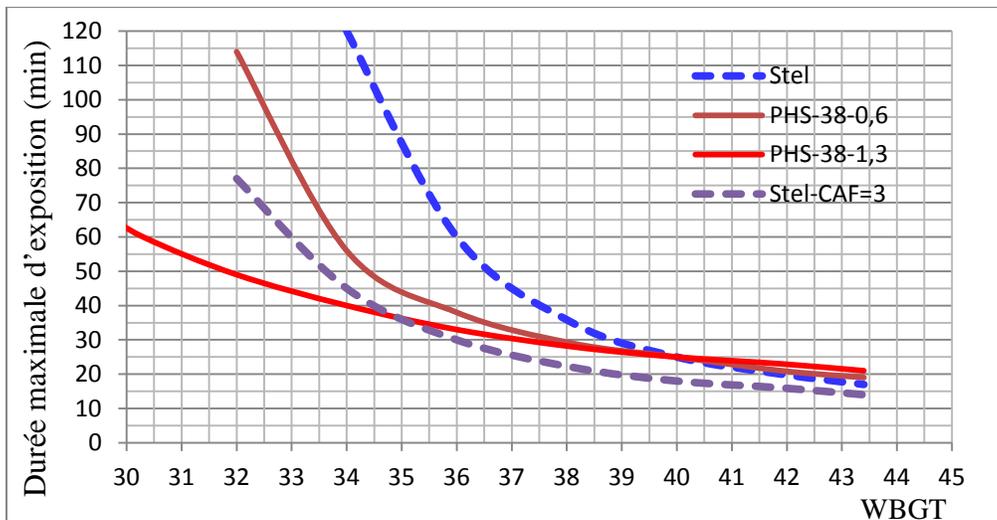


Figure 9. Durée limite d'exposition (selon PHS) vs *Safe Exposure Time* (selon STEL)

## **8. OBSERVATIONS DE SITUATIONS DE TRAVAIL EXCESSIVEMENT CHAUDES**

Nos visites sur le terrain durant les étés 2011 et 2012 nous ont permis d'observer des travailleurs sous des ambiances thermiques allant de 22 à 35,1 °C-WBGT. Ces travailleurs étaient affectés à la déconnection de cuves électrolytiques dans une aluminerie. Les tâches de travail étaient variées et de courte durée. Au total, 11 travailleurs ont fait l'objet d'un monitoring pendant au moins une période de travail. La déconnection avait lieu en matinée, entre 7 h 00 et 11 h 00, mais durait généralement moins de trois heures. Ces périodes étaient entrecoupées de pauses. La cadence de travail était libre.

Le but de ces observations était de définir les conditions d'application et les besoins instrumentaux, mais également de vérifier si les valeurs de fréquence cardiaque respectaient les limites prescrites pour des fenêtres de temps de 5, 10, 20, 30, 45, 60 et 90 minutes suivant la méthode proposée par Bernard et Kenney (1994).

### **8.1 Paramètres**

L'ensemble de tous les paramètres environnementaux ( $T_a$ ,  $V_a$ , HR,  $T_g$ , WBGT) était enregistré à période d'environ 15 minutes tout au long des périodes d'observation. Le niveau de métabolisme était déterminé par décomposition de la tâche. Enfin, l'isolement vestimentaire était toujours le même : vêtements de travail en sergé de laine et sous-vêtements, pour un  $I_{cl} = 1,1$  clo.

Le monitoring physiologique des travailleurs comprenait la lecture des températures buccales avant et après la période de travail et l'enregistrement minute de la fréquence cardiaque. À l'été 2012, nous avons ajouté la lecture de la tension artérielle.

### **8.2 Contraintes observées**

Aucune donnée physiologique n'a atteint les limites généralement acceptées. Nous rapporterons ici les quelques cas où l'astreinte observée était la plus élevée.

Tel que mentionné précédemment, dans un contexte de chaleur excessive, la hausse des températures corporelles devrait atteindre les limites recommandées plus précocement que les pertes hydriques. Tous les cas de hausses de température buccale étaient de 0,5 °C ou moins. Cette observation laisse croire que l'exposition est acceptable.

Il reste à vérifier que la fréquence cardiaque ne soit pas trop élevée. Celle-ci est poussée à la hausse à la fois par l'astreinte thermique et le travail physique. Pour cette analyse, nous avons retenu la tâche qui consiste à couper des bandes de métal avec une meuleuse à main. Elle demandait à la fois l'application de force, des gestes répétitifs à cadence rapide et de la précision. L'évaluation du métabolisme, par décomposition de la tâche, la situe à 400 Watts. Le Tableau 8 présente les données les plus astreignantes obtenues chez le participant 1 à l'été 2011.

**Tableau 8. Valeurs limites et enregistrées de fréquence cardiaque (FC)**

Fenêtre de temps	Équivalent VO2	Fréquence cardiaque au repos	Fréquence Cardiaque maximum théorique	FC moyenne	Fréquence cardiaque plafond observée	% FC max	Limite de fréquence cardiaque (MTA)	Fréquence au travail observée
minutes	%	bpm	bpm	bpm	bpm	%	bpm	bpm
5	83	75	193	111	173	90	173	166
10	75						163	160
20	67						154	152
30	63						149	140
45	59						145	132
60	56						141	124
90	51						135	114

Les limites de fréquence cardiaque ont été calculées suivant la méthode décrite par Bernard et Kenney (1994) pour l'âge exact du participant. La fréquence cardiaque moyenne, à 111 battements par minute (bpm) est tout-à-fait acceptable. La valeur plafond est cependant assez élevée à 173 bpm, soit 90 % de la fréquence maximum théorique. En recherche, la limite pour ce dernier paramètre est passée de 90 à 85 % [Bernard, 2009]. Les limites pour des fenêtres de temps variant de 5 à 90 minutes ne montrent aucun dépassement mais elles laissent voir des périodes de 10 et de 20 minutes très près des limites correspondantes, soit 160 vs 163 battements par minute (bpm) pour une période de dix minutes, et 152 vs 154 bpm pour 20 minutes.

Cet enregistrement, le plus astreignant que nous ayons relevé, se situe donc près de la limite acceptable sur la base des fréquences cardiaques. Il faut souligner que ceci est vrai pour un seul travailleur, les autres affectés à la même tâche n'ont pas montré de valeurs aussi élevées. Toutefois, l'analyse selon le PHS revêt un intérêt particulier. Le Tableau 9 présente les valeurs saisies au programme d'analyse; elles ont été observées sur la courte période considérée la plus intense :

**Tableau 9. Paramètres de l'analyse selon ISO 7933**

		Travail	
Température de l'air	Ta	39,1	°C
Vitesse de l'air	Va	0,1	m/s
Température du globe noir	Tg	50,4	°C
Humidité relative	HR	31	%
Métabolisme	M	400	W
Isolement vestimentaire	Icl	1,1	clo
Temp. moy. Rayonnement	Tmr	55,5	°C
Pression part. vap. Eau	Pa	2,14	kPa

La Figure 10 présente les résultats. Avec une température WBGT à 35,1 °C selon la STEL (en assumant un CAF de 1 et de 2) la SET se situe à 37 et 30 minutes respectivement. Le PHS pour sa part prescrit une DLE de 37 minutes sur la base d'une température rectale prédite de 38 °C. Le débit sudoral est très élevé, à 1450 g/h mais, tel qu'attendu, les courtes durées de travail considérées limitent la perte hydrique à 690 grammes. Sachant que la fréquence cardiaque moyenne sur cette fenêtre de 20 minutes se situait très près de la limite, il est normal de retrouver

une DLE qui soit du même ordre de grandeur. Toutefois, il nous apparaît que le monitoring cardiaque demeure souhaitable pour les travailleurs qui montrent un niveau d'astreinte cardiaque plus élevé.

En conclusion, les observations sur le terrain nous ont permis de constater que les DLE déterminées par l'application du PHS aurait été de nature à protéger adéquatement le participant le plus vulnérable (sur les 11 observés au total) autant sur le plan de la hausse de température corporelle que celui de la fréquence cardiaque. Cependant, puisqu'une lourde charge physique de travail, de même qu'une ambiance thermique très chaude, ont un impact notoire et rapide sur la fréquence cardiaque, il est attendu que ce paramètre de l'astreinte atteigne les limites plus tôt que la hausse de température corporelle.

***L'analyse en fonction du WBGT donne les résultats suivants:***

La température humide naturelle est égale à	28,5 °C
L'indice WBGT est égal à	35,1
<b>L'approche WBGT n'est PAS applicable car l'indice est supérieur à la limite de 33</b>	

***L'évaluation doit être réalisée à partir de l'indice PHS (Predicted Heat Strain).***

La durée de travail doit être limitée à	37	min
Débit sudoral final (g/h)	1450	g/h
Perte hydrique totale (g)	690	g
Perte hydrique maximale non dépassée		
Recommandation: boire 200cc d'eau à 10°C toutes les	10,0	min
Température centrale finale (°C)	38,0	°C
<b>Durée de travail limitée pour température centrale = 38°C</b>		

**Figure 10. Résultats de l'analyse selon ISO 7933**



## 9. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

### 9.1 Conclusion

Bien que l'indice Saskatchewan soit présent dans les TLV de l'ACGIH et dans de nombreuses publications (CCHST, CSST et autres), que nos observations sur le terrain montrent que les limites proposées étaient sécuritaires, et que sa simplicité d'application joue en sa faveur, le fait que son origine scientifique n'ait pu être retracée nous laisse sans assise scientifique probante. Il devient alors impossible d'analyser davantage sa pertinence. À l'opposé, l'indice de refroidissement éolien (WCET) repose sur une démarche scientifique rigoureuse, mais son utilité à titre d'outil de surveillance des travailleurs exposés au froid se limite à des consignes générales et déjà connues des intéressés. Les deux indices requièrent les mêmes données (avec ajustement pour la vitesse de l'air selon qu'elle soit lue au niveau du sol ou à une hauteur de 10 mètres). Le WCET est le plus familier auprès des québécois comme des canadiens. Le préventionniste doit donc choisir entre, d'une part, un indice rationnel bien documenté menant à des mesures de prévention générales, et d'autre part, un guide de pratique facile d'interprétation et d'application mais sans base scientifique connue.

L'indice ISO 11079 Isolement requis présente des difficultés à déterminer les valeurs d'isolement des pièces de vêtements utilisés. Les tables de la norme ISO 9920 à laquelle il réfère ne reflètent pas adéquatement les vêtements nécessaires par grand froid. De plus, sur la base des outils informatiques rendus disponibles par ses auteurs, les résultats peuvent atteindre des valeurs d'isolement impossibles à ce jour. Cet indice ne semble pas adapté à notre climat.

L'analyse du confort thermique via les indices *Predicted Mean Vote* et *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PMV-PPD) permet de combler le vide entre les ambiances froides et chaudes. Elle interpelle directement les responsables de la qualité de l'air dans les espaces de travail intérieurs. De plus, l'indice PPD permet d'estimer le pourcentage d'insatisfaits en cas de contrainte thermique avérée. Sous les conditions de rayonnement ou de vitesse de l'air définies plus haut, son application est grandement simplifiée en ce qu'elle évite la lecture de la température du globe.

Finalement, le choix d'un outil de surveillance des ambiances thermiques excessivement chaudes est strictement nécessaire. Plusieurs situations de travail exposent des personnes à des valeurs dépassant 32 °C-WBGT. Ces situations sont actuellement analysées en prolongeant l'indice WBGT bien au-delà de sa plage valide. Le *Short-Term Exposure Limit* n'est pas retenu en raison des réserves présentées plus haut et auxquelles il a été impossible d'obtenir des réponses satisfaisantes. Par contre, le prolongement de la plage d'application de la norme ISO 7933 au-delà de 39,8 °C tel qu'elle se limite présentement, se montre cohérent à la condition d'apporter les deux correctifs proposés dans cette étude quant à la sudation maximale et à la récupération.

### 9.2 Recommandations

Nous recommandons d'offrir dans un seul et même outil d'analyse les indices PMV-PPD, le Guide de prévention des coups de chaleur, le WBGT et enfin l'indice PHS pour ainsi couvrir la plage d'ambiance thermique depuis le confort thermique des espaces de travail intérieurs

jusqu'aux chaleurs excessives. Cet ensemble d'indices et guides est bien documenté, bien adapté et applicable à nos environnements thermiques intérieurs aussi bien qu'extérieurs.

Afin d'en faciliter l'accès à tous les utilisateurs, l'analyse doit pouvoir se faire à divers niveaux de détail, allant du dépistage jusqu'à l'expertise qui inclut l'analyse de l'impact de modifications possibles (écran contre le rayonnement, modification de la tenue vestimentaire, charge de travail, etc.). Cette approche permet de valider ou d'invalider des hypothèses, d'obtenir des informations quantitatives ou qualitatives. On peut ainsi vérifier la sensibilité d'un modèle à certains paramètres, ou encore mieux, permettre à l'utilisateur de saisir le comportement du modèle.

Quel que soit le niveau d'analyse retenu par l'utilisateur, la réflexion en profondeur que cette activité nous a permis de faire, nous rappelle qu'aucun indice de contrainte thermique n'est parfait et que les variations inter et intra individuelles sont importantes. Ainsi, toutes ces méthodes nous permettent d'estimer, non pas mesurer, le niveau d'astreinte des personnes exposées à ces ambiances thermiques hostiles. Le recours à la modélisation à même l'outil informatique que nous recommandons de concevoir permettrait l'intégration des incertitudes associées à chacun des paramètres du modèle autant en termes de durée limite d'exposition, de nombre et de durée de pauses, que de mesures à mettre en place. Le résultat d'une telle approche s'exprime alors en termes probabiliste et non en termes déterministe, ce qui permet une bien meilleure représentation de la réalité, tant dans sa complexité que dans sa variabilité.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACGIH. *Heat stress and strain*. Documentation on the Threshold limit values. American conference of governmental industrial hygienists. Cincinnati. 2011.
- Andersen, K.L., et coll., *Metabolic and thermal response of Eskimos during muscular exertion in the cold*. Journal of Applied Physiology, 1963. **18**(3): p. 613-618.
- Andersen, K.L., et coll., *Metabolic and thermal response to a moderate cold exposure in nomadic Lapps*. Journal of Applied Physiology, 1960. **15**: p. 649-653
- Auteur inconnu. *Basal metabolism of the Eskimo*. J Nutr, 1952. **48**(3): p. 359-368.
- Basbaum, C.B., *Induced hypothermia in peripheral nerve: electron microscopic and electrophysiological observations*. Journal of Neurocytology, 1973. **2**(2): p. 171-187.
- Belding, H.S et Hatch, T.F. *Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain*. Heating, Piping and Air Conditioning, 1955. **27** : 129-136.
- Bernard, Thomas, Candi D. Ashley, Skai W. Schwartz et Victor Caravello. *Making heat stress assessment relevant again*. NIOSH, final report. University of Southern Florida, 2004.
- Bernard, Thomas E et Candi D Ashley. *Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate*. J. Occ. And Env. Hyg. **6** :362-638. 2009.
- Bernard, Thomas E, Victor Caravello, Skai W. Schwartz et Candi D Ashley. *WBGT Clothing adjustment factors for four clothing ensembles and the effects of metabolic demands*. J. Occ. And Env. Hyg. **5** : 1-5. 2008.
- Bernard, Thomas E, Christina L. Luecke, Skai W. Schwartz, K.Scott Kirkland et Candi D. Ashley. *WBGT clothing adjustments for four clothing ensembles under three relative humidity levels*. J. Occ. And Env. Hyg. **2** : 251-256. 2005.
- Bernard, Thomas E, W. Larry Kenney. *Rationale for a personal monitor for heat strain*. Am. Ind. Hyg. Assoc. Journal (55)/ June 1994.
- Biomed. Proceedings of Evaluation and control of warm working conditions. Jacques Malchaire éditeur. Université Catholique de Louvain, Unité Hygiène et Physiologie du Travail. Barcelone, juin 1999.
- Bittel, J.H., *Heat debt as an index for cold adaptation in men*. Journal of Applied Physiology, 1987. **62**(4): p. 1627-1634.
- Brajkovic, D., M.B. Ducharme, and J. Frim, *Relationship between body heat content and finger temperature during cold exposure*. Journal of Applied Physiology, 2001. **90**(6): p. 2445-2452.
- Brown, G.M., et coll., *Response to cold of Eskimos of the eastern Canadian Arctic*. Journal of Applied Physiology, 1963. **18**(5): p. 970-974.

- Brown, E.A., *Genetic explorations of recent human metabolic adaptations: Hypotheses and evidence*. Biological Reviews, 2012. **87**(4): p. 838-855.
- Budd, Grahame M. *Wet-bulb globe temperature (WBGT) –its history and its limitations*. Journal of science and medicine in sports. **11** : 20-32. 2008.
- Cappaert, Thomas et coll. National athletic trainers' association position statement : environmental cold injuries. Journal of Athletic Training **43** : 640-658. 2008.
- Caravello, Victor, E.A. McCullough, Candi Ashley et Thomas E. Bernard. *Apparent evaporative resistance at critical conditions for five clothing ensembles*. Eur. J. Appl. Physiol. **104** : 361-367. 2008.
- Carlson, L.D., et coll., *Adaptative changes during exposure to cold*. J Appl Physiol, 1953. **5**: p. 672-676.
- Cheung, S.S. and H.A.M. Daanen, *Dynamic Adaptation of the Peripheral Circulation to Cold Exposure*. Microcirculation, 2012. **19**(1): p. 65-77.
- Chi, C.F., Y.C. Shih, and W.L. Chen, *Effect of cold immersion on grip force, EMG, and thermal discomfort*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012. **42**(1): p. 113-121.
- Claessens-Van Ooijen, A.M.J., et coll., *Heat production and body temperature during cooling and rewarming in overweight and lean men*. Obesity, 2006. **14**(11): p. 1914-1920.
- Clarke, E.R. and C.E. Jones, *Manual performance during cold exposure as a function of practice level and the thermal conditions of training*. Journal of Applied Psychology, 1962. **46**(4): p. 276-280.
- Coleshaw, S.R.K., R.N.M. Van Someren, and A.H. Wolff, *Impaired memory registration and speed of reasoning caused by low body temperature*. Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology, 1983. **55**: 27-31.
- Daanen, H.A.M., J. Koedam, and S.S. Cheung, *Trainability of cold induced vasodilatation in fingers and toes*. European Journal of Applied Physiology, 2012. **112**(7): p. 2595-2601.
- Daanen, H.A.M., *Manual performance deterioration in the cold estimated using the wind chill equivalent temperature*. Industrial Health, 2009. **47**(3): p. 262-270.
- De Jong, R.H., W.N. Hershey, and I.H. Wagman, *Nerve conduction velocity during hypothermia in man*. Anesthesiology, 1966. **27**(6): p. 805-810.
- Dessureault, Pierre C., Richard B. Konzen, Newton C. Ellis et Daniel Imbeau. Heat strain assessment for workers using an encapsulating suit and a self-contained breathing apparatus. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 10, No 3, mars 1995.
- Donaldson, G.C., H. Rintamäki, and S. Näyhä, *Outdoor clothing: Its relationship to geography, climate, behaviour and cold-related mortality in Europe*. International Journal of Biometeorology, 2001. **45**(1): p. 45-51.

Enander, A.E., *Effects of thermal stress on human performance*. Scandinavian Journal of Work, Environment and Health, 1989. **15**(SUPPL. 1): p. 27-33.

Fanger P.O., "Calculation of Thermal Comfort: Introduction of a Basic Comfort Equation", ASHRE Trans., Vol.73, Pt 2, 1967.

Flouris, A.D., D.A. Westwood, and S.S. Cheung, *Thermal balance effects on vigilance during 2-hour exposures to -20°C*. Aviation Space and Environmental Medicine, 2007. **78**(7): p. 673-679.

Gaydos, H.F., *Effect on complex manual performance of cooling the body while maintaining the hands at normal temperatures*. Journal of Applied Physiology, 1958. **12**(3): p. 373-376.

Givoni, B. *A new method for evaluating industrial heat exposure and maximum permissible work load*. Soumis à International Biometeorological Congress, Pau, France. 1963.

Geurts, C.L.M., G.G. Sleivert, and S.S. Cheung, *Local cold acclimation of the hand impairs thermal responses of the finger without improving hand neuromuscular function*. Acta Physiologica Scandinavica, 2005. **183**(1): p. 117-124.

Gonzalez, N.W., Thomas E. Bernard, Nora L. Carroll, Michael A. Bryner et James P. Zeigler. *Maximum sustainable work rate for five protective clothing ensembles with respect to moisture vapor transmission rate and air permeability*. Jour. Occ. Env. Hyg. 3 :80-86. 2006.

Gouvernement du Québec. Le Québec et les changements climatiques, un défi pour l'avenir. Juin 2006. Document pdf. [http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan\\_action/2006-2012\\_fr\(an1\).pdf](http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/2006-2012_fr(an1).pdf)

Hammel, H.T., *Terrestrial animals in cold: recent studies of primitive man*, in *Handbook of Physiology*, D. D.B, A. E.F, and W. C.G, Editors. 1964, Am Physiol Soc: Washington, D.C. p. 413-434.

Hammel, H.T., *Thermal and metabolic responses of the Alacaluf Indians to moderate cold exposure*. WADC technical report. United States. Air Force. Wright Air Development Center, Dayton, Ohio, 1960. **60-633**: p. 1-44.

Hammel, H.T., et coll., *Thermal and metabolic responses of the Australian aborigine exposed to moderate cold in summer*. Journal of Applied Physiology, 1959. **14**(4): p. 605-615.

Hancock, P.A., J.M. Ross, and J.L. Szalma, *A meta-analysis of performance response under thermal stressors*. Human Factors, 2007. **49**(5): p. 851-877.

Hart, J.S., et coll., *Thermal and metabolic responses of coastal Eskimos during a cold night*. Journal of Applied Physiology, 1962. **17**: p. 953-960.

Heus, R., H.A.M. Daanen, and G. Havenith, *Physiological criteria for functioning of hands in the cold*. Applied Ergonomics, 1995. **26**(1): p. 5-13.

Hicks, C.S., *Terrestrial animals in cold: exploratory studies of primitive man*, in *Handbook of Physiology*, D. D.B, A. E.F, and W. C.G, Editors. 1964, Am Physiol Soc: Wahington D.C.

Hildes, J.A., *Comparison of coastal Eskimos and Kalahari Bushmen*. Federation proceedings, 1963. **22**: p. 843-845.

Holmer, Ingvar. *Evaluation of cold workplaces : an overview of standards for assessment of cold stress*. Industrial Health. 47 : 228-234. 2009.

Immink, M.A., D.L. Wright, and W.S. Barnes, *Temperature dependency in motor skill learning*. Journal of Motor Behavior, 2012. **44**(2): p. 105-113.

Irving, L., et coll., *Metabolism and temperature of Arctic Indian men during a cold night*. Journal of Applied Physiology, 1960. **15**(4): p. 635-644.

Irving, L., *Adaptations to cold*. Scientific American, 1966. **214**(1): p. 94-101.

ISO. *Ergonomie des ambiances thermiques –Détermination analytique et interprétation de la contrainte thermique fondées sur le calcul de l'astreinte thermique prévisible*. Organisation Internationale de Normalisation. Norme ISO 7933. 2004.

ISO. *Ergonomie des ambiances thermiques –Détermination et interprétation de la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique requis du vêtement (Ireq) et les effets du refroidissement local*. Organisation Internationale de Normalisation. Norme ISO 11079. 2007.

IUPS, *Glossary of terms for thermal physiology (3rd ed)*. Jpn J of Physiol., 2001. **51**(2): p. 245–280.

Janský, L., et coll., *Changes in thermal homeostasis in humans due to repeated cold water immersions*. Pflugers Archiv European Journal of Physiology, 1996. **432**(3): p. 368-372.

Janský, L., et coll., *Thermal, cardiac and adrenergic responses to repeated local cooling*. Physiological Research, 2006. **55**(5): p. 543-549.

John Paul, F.U., et coll., *Cognitive performance during long-term residence in a polar environment*. Journal of Environmental Psychology, 2010. **30**(1): p. 129-132.

Keatinge, W.R., *Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe*. Lancet, 1997. **349**(9062): p. 1341-1346.

Krog, J., et coll., *Hand circulation in the cold of Lapps and North Norwegian fishermen*. Journal of Applied Physiology, 1960. **15**(4): p. 654-658.

Lambert, M., T. Mann, and J. Dugas, *Ethnicity and temperature regulation*, in *Thermoregulation and Human Performance. Physiological and Biological Aspects*, F.E. Marino, Editor 2008, Karger: Basel. p. 104-120.

Lapp, M.C. and G.K. Gee, *Human acclimatization to cold water immersion*. Arch Environ Occup Health, 1967. **15**(5): p. 568-579.

Launay, J.C. and G. Savourey, *Cold adaptations*. Industrial Health, 2009. **47**(3): p. 221-227.

Leblanc, J., *Local adaptation to cold of Gaspé fishermen*. Journal of Applied Physiology, 1962. **17**: p. 950-952.

Leonard, W.R., et coll., *Climatic influences on basal metabolic rates among circumpolar populations*. American Journal of Human Biology, 2002. **14**(5): p. 609-620.

Leppäluoto, J., I. Korhonen, and J. Hassi, *Habituation of thermal sensations, skin temperatures, and norepinephrine in men exposed to cold air*. Journal of Applied Physiology, 2001. **90**(4): p. 1211-1218.

Lind, A.R. *A physiological criterion for setting thermal environmental limits for everyday work*. Journal of Applied Physiology. 51-56. 1963.

Mäkinen, T.M., *Different types of cold adaptation in humans*. Frontiers in bioscience (Scholar edition), 2010. **2**: p. 1047-1067.

Mäkinen, T.M., *Human cold exposure, adaptation, and performance in high latitude environments*. American Journal of Human Biology, 2007. **19**(2): p. 155-164.

Mäkinen, T.M., et coll., *Effect of repeated exposures to cold on cognitive performance in humans*. Physiology and Behavior, 2006. **87**(1): p. 166-176.

Mäkinen, T.M., et coll., *Postural sway during single and repeated cold exposures*. Aviation Space and Environmental Medicine, 2005. **76**(10): p. 947-953.

Mäkinen, T.M., et coll., *Seasonal changes in thermal responses of urban residents to cold exposure*. Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology, 2004. **139**(2): p. 229-238.

Malchaire, J. éditeur. *Biomed. Proceedings of Evaluation and control of warm working conditions*. Université Catholique de Louvain, Unité Hygiène et Physiologie du Travail. Barcelone, juin 1999.

Marrao, C., et coll., *Physical and cognitive performance during long-term cold weather operations*. Aviation Space and Environmental Medicine, 2005. **76**(8): p. 744-752

Morton, R. and K.A. Provins, *Finger numbness after acute local exposure to cold*. Journal of Applied Physiology, 1960. **15**: p. 149-154.

Muller, M.D., et coll., *Effect of cold acclimatization on exercise economy in the cold*. European Journal of Applied Physiology, 2012. **112**(2): p. 795-800.

Muller, M.D., et coll., *Acute cold exposure and cognitive function: Evidence for sustained impairment*. Ergonomics, 2012. **55**(7): p. 792-798.

Muza, S.R., et coll., *Respiratory and cardiovascular responses to cold stress following repeated cold water immersion*. Undersea Biomed Res, 1988. **15**: p. 165-178.

Nelms, J.D. and D.J. Soper, *Cold vasodilatation and cold acclimatization in the hands of British fish filleters*. Journal of Applied Physiology, 1962. **17**: p. 444-448.

Oksa, J., H. Rintamäki, and T. Mäkinen, *The effect of training of military skills on performance in cold environment*. Military Medicine, 2006. **171**(8): p. 757-761.

Oksa, J., M.B. Ducharmeand, and H. Rintamäki, *Combined effect of repetitive work and cold on muscle function and fatigue*. Journal of Applied Physiology, 2002. **92**(1): p. 354-361.

Oksa, J., H. Rintamäki, and S. Rissanen, *Muscle performance and electromyogram activity of the lower leg muscles with different levels of cold exposure*. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1997. **75**(6): p. 484-490.

Oksa, J., et coll., *Cooling-induced changes in muscular performance and EMG activity of agonist and antagonist muscles*. Aviation Space and Environmental Medicine, 1995. **66**(1): p. 26-31.

Palinkas, L.A., *Mental and cognitive performance in the cold*. International journal of circumpolar health, 2001. **60**(3): p. 430-439.

Patton, J.F. and J.A. Vogel, *Effects of acute cold exposure on submaximal endurance performance*. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1984. **16**(5): p. 494-497.

Piazza, A., P. Menozzi, and L.L. Cavalli-Sforza, *Synthetic gene frequency maps of man and selective effects of climate*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1981. **78**(4 II): p. 2638-2642.

Quirion, A., et coll., *Metabolic and hormonal responses during exercise at 20°, 0° and - 20°C*. International Journal of Biometeorology, 1989. **33**(4): p. 227-232.

Racinais, S. and J. Oksa, *Temperature and neuromuscular function*. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2010. **20**: p. 1-18.

Radomski, M.W. and C. Boutelier, *Hormone response of normal and intermittent cold-preadapted humans to continuous cold*. Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology, 1982. **53**(3): p. 610-616.

Rana, T.S. and S. Parvati Gopal, *Decrement in manual arm performance in cold*. Ind J Aerospace Med, 2010. **54**(2).

Rintamäki, H., *Human cold acclimatisation and acclimation*. International journal of circumpolar health, 2001. **60**(3): p. 422-429.

Roberts, D.F., *Body weight, race and climate*. American Journal of Physical Anthropology, 1953. **11**(4): p. 533-558.

Roulet, Claude-Alain. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Presses polytechniques et universitaires romandes. ISBN : 2-88074-547-0. 2004.

- Ruff, C.B., *Climatic adaptation and hominid evolution: The thermoregulatory imperative*. *Evolutionary Anthropology*, 1993. **2**(2): p. 53-60.
- Sargeant, A.J., *Effect of muscle temperature on leg extension force and short-term power output in humans*. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1987. **56**(6): p. 693-698.
- Schiefer, R.E., et coll., *Finger skin temperature and manual dexterity. Some inter-group differences*. *Applied Ergonomics*, 1984. **15**(2): p. 135-141.
- Scholander, P.F., et coll., *Cold adaptation in Australian aborigines*. *Journal of Applied Physiology*, 1958. **13**(2): p. 211-218.
- Smolander, J., et coll., *Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water*. *Physiology and Behavior*, 2004. **82**(4): p. 691-695
- Snodgrass, J.J., et coll., *Basal metabolic rate in the Yakut (Sakha) of Siberia*. *American Journal of Human Biology*, 2005. **17**(2): p. 155-172.
- Sonna, L.A., et coll., *Invited review: Effects of heat and cold stress on mammalian gene expression*. *Journal of Applied Physiology*, 2002. **92**(4): p. 1725-1742.
- Stocks, J.M., et coll., *Metabolic habituation following repeated resting cold-water immersion is not apparent during low-intensity cold-water exercise*. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 2001. **20**(5): p. 263-267.
- Taylor, N.A.S., *Ethnic differences in thermoregulation: Genotypic versus phenotypic heat adaptation*. *Journal of Thermal Biology*, 2006. **31**(1-2 SPEC. ISS.): p. 90-104.
- Todnem, K., et coll., *The non-linear relationship between nerve conduction velocity and skin temperature*. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, 1989. **52**(4): p. 497-501.
- Vogt, J.J. et coll. *Required sweat rate as an index of thermal strain in industry*, in K.Cena and J.A. Clark (ed.), *Bioengineering, thermal physiology and comfort*, Amsterdam : Elsevier, 1981. pp. 99-110.
- Ward, J.S., G.A.C. Bredell, and H.G. Wenzel, *Responses of Bushmen and Europeans on exposure to winter night temperatures in the Kalahari*. *Journal of Applied Physiology*, 1960. **15**(4): p. 667-670.
- Wijers, S.L.J., W.H.M. Saris, and W.D. Van Marken Lichtenbelt, *Cold-induced adaptive thermogenesis in lean and obese*. *Obesity*, 2010. **18**(6): p. 1092-1099.
- Wang, Faming, Kalev Kuklane, Chuansi Gao et Ingvar Holmer. *Can the PHS model (ISO 7933) predict reasonable thermophysiological responses while wearing protective clothing in hot environments ?* *Physiological Measurement*. 32 : 239-249. 2011.

Wyndham, C.H. and J.F. Morrison, *Adjustment to Cold of Bushmen in the Kalahari Desert*. Journal of Applied Physiology, 1958. **13**(2): p. 219-225.

Young, A.J., *Homeostatic responses to cold prolonged cold exposure: human cold acclimatization*, in *Handbook of Physiology*, F. MJ and B. CM, Editors. 1996, Oxford University Press: New York. p. 419-438.

Young, A.J., S.R. Muza, and M.N. Sawka, *Human thermoregulatory responses to cold air are altered by repeated cold water immersion*. Journal of Applied Physiology, 1986. **60**(5): p. 1542-1548.

**Sites web consultés :**

<http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=fr&n=5F8F816A-1#table1>

<http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData>

[http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk\\_miljoe/IREQ2009ver4\\_2.htm](http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/IREQ2009ver4_2.htm)

<http://forums.accuweather.com/index.php?showforum=4>