

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-799



Contraintes thermiques et substances chimiques

Bilan des connaissances
et emplois les plus à risque au Québec

*Ginette Truchon
Joseph Zayed
Robert Bourbonnais
Martine Lévesque
Mélyssa Deland
Marc-Antoine Busque
Patrice Duguay*



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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2013
ISBN : 978-2-89631-698-4 (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
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
novembre 2013



Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-799

Contraintes thermiques et substances chimiques

Bilan des connaissances et emplois les plus à risque au Québec

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.

*Ginette Truchon¹, Joseph Zayed^{2,3},
Robert Bourbonnais⁴, Martine Lévesque³,
Mélyssa Deland³, Marc-Antoine Busque²,
Patrice Duguay²*

¹Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST

²Direction scientifique, IRSST

³Université de Montréal

⁴Consultant

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. Daniel Drolet pour sa contribution lors de la sélection des experts et de l'élaboration du fichier Excel utilisé dans le cadre de la consultation. Les auteurs remercient également les 13 experts consultés pour leur collaboration dans la priorisation des emplois.

SOMMAIRE

L'exposition au froid ou à la chaleur déclenche une série de réponses physiologiques compensatrices qui permettent à l'organisme humain de maintenir sa température interne malgré un stress thermique. Ces mécanismes de thermorégulation sont bien documentés et les changements physiologiques qu'ils impliquent peuvent modifier les fonctions de plusieurs organes liées à l'absorption et au métabolisme des substances chimiques. Des études dans le domaine de la pharmacologie et de l'épidémiologie rapportent une augmentation de l'absorption et des effets de certains médicaments de même qu'une augmentation du taux de mortalité humaine associée à la pollution de l'air, lors d'une exposition simultanée à la chaleur et à des xénobiotiques. En extrapolant ces données à la santé au travail, il est permis de croire qu'une exposition concomitante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques est susceptible d'accroître l'absorption de certains xénobiotiques de même que leurs effets.

Le premier objectif de cette recherche visait à recenser l'ensemble des données publiées dans la littérature scientifique récente. Le deuxième objectif consistait à identifier les travailleurs québécois exposés aux substances chimiques et qui pourraient être les plus touchés par les contraintes thermiques. Une attention particulière a été accordée à la présence de substances chimiques susceptibles d'affecter les mécanismes de thermorégulation.

La revue de la littérature a été effectuée en interrogeant les bases de données bibliographiques Medline, Toxline et Chemical Abstract pour la période allant de janvier 1990 à juin 2012 afin de documenter les changements physiologiques associés aux contraintes thermiques, les expositions concomitantes aux contraintes thermiques et aux substances chimiques ainsi que leurs effets, les travailleurs exposés aux substances chimiques les plus susceptibles d'être affectés par les contraintes thermiques et les substances chimiques pouvant affecter les mécanismes de thermorégulation. Une démarche faisant appel au jugement professionnel a été subséquemment utilisée afin d'identifier les milieux de travail québécois où l'exposition aux contraintes thermiques était susceptible d'entraîner une modification de la toxicocinétique des substances chimiques. Ainsi, 13 experts dans le domaine des contraintes thermiques ou de l'hygiène industrielle ont été individuellement consultés afin qu'ils hiérarchisent les 136 emplois retenus à l'égard de l'importance de la problématique étudiée.

Les données recueillies montrent que l'impact de l'exposition au froid sur la toxicocinétique et les effets des substances chimiques a été peu étudié. Dans les quelques études recensées, on y rapporte qu'une exposition à un stress thermique froid entraîne habituellement une diminution de la toxicité des substances chimiques. L'exposition à la chaleur est, quant à elle, associée à une augmentation de l'absorption pulmonaire et cutanée des xénobiotiques, ceci étant souvent associé à une augmentation de leur toxicité et de leur concentration dans les fluides biologiques. La surveillance biologique de l'exposition peut être utilisée afin de mettre en évidence l'augmentation de l'absorption pulmonaire ou cutanée des contaminants lors d'une exposition à la chaleur. L'importance de l'augmentation dépend de l'intensité du stress thermique, des niveaux d'exposition et des caractéristiques physico-chimiques des substances chimiques.

Parmi les emplois les plus concernés au Québec par cette problématique, on en retrouve 20 appartenant au secteur de la fabrication des produits minéraux non métalliques / première transformation des métaux / fabrication de produits métalliques ainsi que les couvreurs de toiture

et les pompiers. Ces milieux de travail devraient être priorités dans le cadre de recherches ultérieures visant à mieux caractériser le risque associé à l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. De façon plus spécifique, l'exposition à certains contaminants peut affecter les mécanismes de thermorégulation et ainsi diminuer la capacité des travailleurs à s'adapter à la chaleur. Les travailleurs principalement visés par cette problématique sont ceux exposés au plomb et à ses composés inorganiques (poussières et fumées), à certains pesticides (organophosphorés et carbamates) et aux fumées d'oxydes métalliques (zinc, aluminium, antimoine, cadmium, cuivre, magnésium, manganèse, étain).

Ce bilan permettra de guider les intervenants en santé au travail dans leurs démarches d'évaluation du risque lors de situations d'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques, notamment en ayant permis de cibler certains emplois plus à risque. Les données compilées dans le présent rapport pourront également être utilisées pour le développement de modèles toxicocinétiques afin de permettre une meilleure évaluation du risque. Des études en milieu de travail pourraient être également menées afin de documenter, en situation réelle, l'influence d'une exposition à la chaleur sur l'absorption et la toxicocinétique des substances chimiques; la surveillance biologique constituant un outil de choix dans l'étude de cette problématique.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS.....	3
2.1 Objectif général.....	3
2.2 Objectifs spécifiques.....	3
3. MÉTHODE.....	5
3.1 Revue de la littérature.....	5
3.2 Identification des travailleurs exposés simultanément aux contraintes thermiques et aux substances chimiques.....	5
3.2.1 Appréciation des facteurs de stress thermique et critères de mesure.....	5
3.2.2 Appréciation de l'exposition aux substances chimiques.....	9
3.2.3 Nombre de travailleurs potentiellement exposés.....	9
3.2.4 Consultation d'experts et priorisation finale des emplois.....	10
4. RÉSULTATS.....	11
4.1 Le bilan de la revue de la littérature.....	11
4.1.1 Les considérations thermiques.....	11
4.1.1.1 Facteurs individuels affectant la tolérance de l'organisme au stress thermique.....	12
4.1.1.2 Facteurs de l'environnement de travail pouvant affecter l'interaction entre le stress thermique et l'exposition aux substances chimiques.....	13
4.1.2 Les mécanismes de thermorégulation.....	14
4.1.3 Exposition à la chaleur et changements physiologiques.....	14
4.1.4 Exposition au froid et changements physiologiques.....	16
4.1.5 Effet de l'exposition concomitante aux contraintes thermiques sur la toxicocinétique et la toxicité des substances chimiques.....	17
4.1.5.1 Substances chimiques et exposition à la chaleur.....	17
4.1.5.2 Substances chimiques et exposition au froid.....	22
4.1.6 Effet des substances chimiques sur les mécanismes de thermorégulation.....	23
4.1.6.1 Substances vasoconstrictrices.....	23
4.1.6.2 Substances vasodilatatrices.....	23
4.1.6.3 Composés organophosphorés et carbamates.....	24
4.1.6.4 Métaux.....	24
4.1.6.5 Pentachlorophénol.....	24
4.1.6.6 Arsenic.....	24
4.1.6.7 Autres substances.....	25

4.2	Identification des travailleurs exposés simultanément aux contraintes thermiques et aux substances chimiques	25
5.	DISCUSSION	29
5.1	Bilan de la littérature.....	29
5.1	Identification des emplois.....	31
6.	CONCLUSION, APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES.....	33
	BIBLIOGRAPHIE.....	35
	ANNEXE 1 : Exemple de cotation du risque thermique	41
	ANNEXE 2 : Exemple d’appréciation de l’exposition concomitante aux substances chimiques et aux contraintes thermiques à l’aide de cotes de priorité.....	42
	ANNEXE 3 : Priorisation des emplois en fonction de leur risque potentiel découlant d’une exposition concomitante aux substances chimiques et aux contraintes thermiques	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Facteurs de stress thermique et critères de jugement.....	7
Tableau 2 : Matrice de cotation du risque de stress thermique.....	8
Tableau 3 : Influence attendue de la charge de travail ou de l'exposition à la chaleur sur l'absorption pulmonaire de différentes substances organiques en fonction de leur valeur de $P_{\text{sang:air}}$	19
Tableau 4 : Emplois priorités par les experts en fonction de leur risque potentiel découlant d'une exposition concomitante aux substances chimiques et aux contraintes thermiques	27

1. INTRODUCTION

L'exposition à la chaleur peut entraîner des problèmes de santé allant du coup de soleil au coup de chaleur, ce dernier pouvant mener au décès à la suite d'une défaillance de la thermorégulation. Au Québec, entre 1983 et 2003, la chaleur a entraîné le décès de neuf travailleurs associés à des activités comme le reboisement, l'abattage manuel d'arbres, la construction et les travaux agricoles (Schreiber et coll., 2004). Le travail au froid peut également donner lieu à des problèmes de santé, mais cette problématique est beaucoup moins préoccupante, du moins au Québec où les travailleurs disposent habituellement de moyens de protection efficaces (Schreiber et coll., 2004).

L'exposition au froid ou à la chaleur déclenche une série de réponses physiologiques compensatrices qui permettent à l'organisme humain de maintenir sa température interne malgré un stress thermique. Ces mécanismes de thermorégulation sont bien documentés et les changements physiologiques qu'ils impliquent, notamment dans la redistribution des débits sanguins, peuvent modifier les fonctions de plusieurs organes liées à l'absorption et au métabolisme des substances chimiques (Mairiaux et Malchaire, 1990). De plus, certaines substances, dont des pesticides, peuvent affecter les mécanismes de thermorégulation ce qui pourrait diminuer la capacité des travailleurs à s'adapter à un stress thermique (Johnson Rowsey et coll., 2003).

Des études dans le domaine de la pharmacologie rapportent une augmentation de l'absorption et des effets de certains médicaments lorsqu'ils sont administrés simultanément à une exposition à la chaleur (Sidhu et coll., 2011; Vanakoski et Seppälä, 1998). De plus, des études épidémiologiques portant sur l'impact de l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et à la pollution de l'air ont mis en évidence un effet significatif de cette combinaison d'agresseurs sur le taux de mortalité humaine (Katsouyanni et coll., 1993; Rainham et Smoyer-Tomic, 2003). En extrapolant les données populationnelles au milieu de la santé au travail, il est permis de croire qu'une exposition concomitante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques est susceptible d'accroître l'absorption et les effets de certains xénobiotiques. Peu de données sont actuellement disponibles sur cette question d'où l'intérêt de recenser, d'analyser et d'intégrer les résultats publiés. Ce faisant, l'influence des contraintes thermiques sur l'évaluation du risque associé à l'exposition professionnelle aux substances chimiques pourrait être discuté, notamment sous l'angle de son impact sur la surveillance biologique.

2. OBJECTIFS

2.1 Objectif général

L'objectif de cette recherche visait à analyser et à intégrer l'ensemble des données publiées dans la littérature scientifique récente afin de documenter l'effet des contraintes thermiques sur la cinétique, sur la toxicité des substances chimiques dans le contexte de la santé au travail et sur la surveillance biologique. Les résultats pourraient notamment être utilisés afin de cibler certains emplois plus à risque dans le cadre de travaux abordant la problématique des changements climatiques.

2.2 Objectifs spécifiques

Plus spécifiquement, les objectifs de la recherche ont été de trois ordres, soit :

- Recenser, par le biais d'une revue de la littérature, les études portant sur
 - les changements physiologiques associés aux contraintes thermiques;
 - l'exposition concomitante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques ainsi que leurs effets;
 - les travailleurs exposés aux substances chimiques (incluant la pollution de l'air) les plus susceptibles d'être affectés par les contraintes thermiques;
 - les substances chimiques pouvant altérer les mécanismes de thermorégulation des travailleurs.
- Identifier les travailleurs exposés aux substances chimiques qui pourraient être les plus touchés par les contraintes thermiques en apportant une attention particulière à la présence d'espèces chimiques susceptibles d'affecter les mécanismes de thermorégulation des travailleurs.
- Discuter de l'impact de l'exposition concomitante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques sur l'absorption, le métabolisme, l'interprétation des données de surveillance biologique et la toxicité des substances chimiques (incluant, lorsque pertinent, la pollution de l'air pour les travailleurs œuvrant à l'extérieur).

3. MÉTHODE

3.1 Revue de la littérature

La revue de la littérature a été effectuée en interrogeant les bases de données bibliographiques Medline, Toxline et Chemical Abstract pour la période allant de janvier 1990 à juin 2012. Des combinaisons de différents mots-clés ont été utilisées : *hot temperature, heat stress, thermal stress, hypothermia, hyperthermia, cold temperature, cold stress, body temperature, thermoregulation* et *physiological response, chemical, toxic response, toxicant, xenobiotic, health effect, work environment*. Les publications précédant l'année 1990 ont été considérées en fonction de leur pertinence, peu importe la date de publication.

3.2 Identification des travailleurs exposés simultanément aux contraintes thermiques et aux substances chimiques

L'identification des travailleurs susceptibles d'être exposés simultanément à un stress thermique et aux substances chimiques a été effectuée, dans un premier temps, par le biais de la revue de la littérature tel que décrit au point 3.1. Dans un second temps, une démarche faisant appel au jugement de professionnels œuvrant en hygiène du travail a été utilisée afin d'identifier les milieux de travail québécois où l'exposition aux contraintes thermiques était susceptible d'entraîner une modification de la cinétique et de la toxicité des substances chimiques.

Cette démarche, décrite dans les paragraphes suivants, s'est déroulée en deux temps. Dans une première étape, notre groupe de recherche a identifié une liste des emplois pour lesquels les travailleurs pouvaient être potentiellement exposés de façon importante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Dans un deuxième temps, cette liste a été soumise à un groupe de professionnels dans le but de juger et de prioriser l'importance de cette double exposition pour chaque emploi.

3.2.1 *Appréciation des facteurs de stress thermique et critères de mesure*

La contrainte ou le stress thermique correspond à l'ensemble des charges thermiques imposées au corps humain résultant de la charge métabolique (énergie dépensée au travail) et de la chaleur échangée avec l'environnement général. Les échanges de chaleur entre l'environnement et le corps humain peuvent être exprimés par le bilan thermique (voir section 4.1.1) qui est l'expression du changement de température du corps.

Les paramètres de base. Tel que résumé par Malchaire (2004), il existe six paramètres qui influencent directement les échanges thermiques en milieu de travail, soient 1) la température de l'air (température sèche), 2) l'humidité de l'air, 3) la vitesse de circulation de l'air, 4) la température des surfaces environnantes (température de rayonnement), 5) l'habillement ou l'isolement vestimentaire et enfin 6) la dépense énergétique (métabolisme du travail). Bien que tous ces facteurs soient mesurables quantitativement (température sèche, température humide naturelle, anémomètre, température du globe noir, température corporelle, etc.), les deux derniers dépendent essentiellement des exigences liées aux règles et aux procédés de production ainsi qu'aux tâches exécutées par la personne à son poste de travail.

Lorsqu'on aborde les aspects d'évaluation des paramètres de base de la contrainte thermique, il est important de décrire les indices qui permettent de prédire les conditions qui s'y rapportent. L'observation (par l'expérience ou la connaissance des milieux de travail) permet en effet d'examiner quels facteurs sont responsables d'une situation de travail satisfaisante (c.-à-d. situation de confort thermique – sans risque) ou d'une situation non satisfaisante (c.-à-d. situation de contrainte – avec risque). Parmi les six paramètres énoncés plus haut, seulement quatre ont été retenus pour la détermination des emplois à risque de stress thermique chaud ou froid. Il s'agit des quatre facteurs de stress thermique suivants : la température, l'humidité relative, l'énergie rayonnante et la dépense énergétique ou charge de travail. Dans l'optique de cette étude, la vitesse de circulation de l'air, le port d'équipements de protection individuelle et l'isolement vestimentaire sont des facteurs qui n'ont pas été pris en considération puisque leur utilisation exige une observation en temps réel des travailleurs dans leur situation spécifique de travail. Il en est de même pour les épisodes de froid intense et de canicule qui n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation de la contrainte thermique pour les emplois réalisés à l'extérieur. De plus, lorsque les deux types de contraintes (chaude et froide) étaient présents à un même poste de travail, la contrainte thermique chaude a été priorisée puisque cette dernière, comparativement à la contrainte thermique froide, est plus susceptible d'entraîner des changements physiologiques modifiant la toxicocinétique des substances chimiques.

La dépense énergétique ou charge de travail : un paramètre d'une grande importance. Des quatre facteurs de stress thermique retenus, la dépense énergétique (ou charge de travail) revêt une importance capitale. Bien souvent, c'est parce qu'il ne peut intervenir sur la nature même de son emploi (c.-à-d. impérativement imposée par le processus de son travail) qu'un travailleur sera considéré à risque de stress thermique. Par exemple, le métier de couvreur de toiture exige de celui qui l'exerce qu'il travaille surtout l'été, quand il fait beau et parfois très chaud, sur un horaire non conventionnel, en fournissant un effort physique important à cause des charges lourdes qu'il doit manipuler en hauteur et des différentes positions du corps qu'il doit adopter, le plus souvent en cherchant à garder un équilibre postural précaire. Il en est de même pour plusieurs métiers de la construction, ainsi que pour différents emplois dans les domaines de l'agriculture et de la foresterie pour ne citer que ces secteurs. La dépense énergétique est un des paramètres importants à considérer dans l'évaluation du risque de stress thermique. C'est pourquoi une liste de tâches encodées pour l'activité physique professionnelle provenant du *Compendium of Physical Activities* d'Ainsworth de l'Arizona State University a été utilisée (Ainsworth et coll., 2011). Ce Compendium, qui classe l'activité physique en taux de dépense énergétique, a été développé pour améliorer la comparabilité des résultats entre différentes études. Il utilise un code à cinq chiffres et classe plus de 800 activités physiques humaines en grandes rubriques (par exemple, activités professionnelles, sportives, domestiques, etc.) par leur intensité énergétique définie comme étant le ratio du taux métabolique d'une activité spécifique au taux métabolique au repos. Les données du Compendium ont été obtenues à partir d'études chez des adultes par des modèles mesurant la dépense énergétique de certaines activités physiques quotidiennes dans différents milieux de vie.

Détermination et application des critères de jugement pour chaque facteur de stress thermique. Des critères de jugement de la situation de travail pour chaque facteur retenu ont donc été élaborés et sont présentés au tableau 1. Ils correspondent, à quelques différences près, à ceux présentés par Malchaire (2004). Les principales différences résident dans le regroupement des

catégories de température « très élevée » et « extrême » en une seule catégorie « très élevée ». De la même façon, les deux dernières catégories pour le rayonnement « très chaud » et « extrême » ont été regroupées dans notre étude en une seule catégorie « très chaud ». Bien que ces critères de jugement soient définis d'une manière assez large, ils constituent néanmoins des balises qui permettent de juger de l'importance de chacun des facteurs de stress thermique pour un emploi donné.

Tableau 1 : Facteurs de stress thermique et critères de jugement

<i>Facteurs</i>	<i>Critères</i>	<i>Jugement</i>
<i>Température</i>	Température fraîche, froide ou gel	faible
	En général entre 15 et 27 °C	normale
	De 28 à 35 °C	élevée
	Au-delà de 35 °C	très élevée
<i>Humidité</i>	Gorge, nez et/ou yeux secs après 2-3 heures (<20 % HR ¹)	faible
	Comme à l'extérieur (entre 30 et 60/70 % HR)	normale
	Peau moite (60-80 % HR)	élevée
	Peau trempée (>80 % HR)	très élevée
<i>Rayonnement</i>	Sensation de froid sur main/visage après 2-3 minutes	froid
	Pas de rayonnement thermique perceptible	normal
	Sensation de chaud sur main/visage après 2-3 minutes	chaud
	Impossible de tenir main/visage exposé plus de 2 min	très chaud
<i>Charge de travail</i>	Travail assis, exigeant un faible effort (< 1.6 MET)	légère
	Travail assis ou debout avec effort plus grand (1.6 et 3.0 MET)	moyenne
	Travail intense du corps (3.1 et 6.0 MET)	lourde
	Travail très intense et soutenu du corps (> 6.0 MET)	très lourde

¹ HR : humidité relative

Adapté de Malchaire (2004)

Une liste des emplois distribués dans plusieurs secteurs d'activité a été élaborée par notre groupe de recherche à partir de données d'emploi provenant de différentes sources : les comités sectoriels de main-d'œuvre du site web de métiers-Québec (Commission de la construction du Québec, 2011), Statistique Canada (2007) pour le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) et Ressources humaines et Développement des Compétences Canada (2006) pour la Classification nationale des professions (CNP). La liste des emplois répertoriés a été présentée conformément au SCIAN. Les quatre facteurs de stress thermique ont ensuite été évalués pour chaque emploi par notre groupe de recherche en fonction des critères de jugement du tableau 1.

Matrice de cotation du risque de stress thermique. Pour aider à interpréter le niveau de danger découlant de l'ensemble des critères associés aux quatre facteurs de stress thermique, une matrice de cotation du risque a été construite par notre équipe de recherche. Une échelle de probabilité a été créée. Celle-ci permettait d'exprimer la probabilité de présence (fréquence) du stress thermique pour un travailleur occupant un emploi spécifique. L'échelle proposée comporte

quatre niveaux de probabilité : faible, moyenne, élevée et très élevée. Une échelle de sévérité (faible, moyenne, élevée, très élevée) de la situation de travail a également été élaborée. La sévérité reflète l'ampleur du stress thermique auquel est exposé le travailleur occupant un emploi déterminé. Le niveau de sévérité associé à chaque emploi a été déterminé en fonction de l'importance attribuée à chacun des quatre facteurs de stress thermique selon le jugement professionnel des membres de l'équipe.

Enfin la combinaison des échelles de probabilité et de sévérité a permis le développement d'une matrice de cotation du risque à seize cases, telle que présentée au tableau 2. Ce tableau fait référence à une matrice emploi-exposition fréquemment utilisée en analyse de risque avec une approche similaire à celle décrite par Mulhausen et coll. (2006). Sur la base d'un jugement éclairé par l'expérience et la documentation scientifique, quatre valeurs de risque ont été utilisées : négligeable, tolérable, important et critique. Aux fins de cette étude, seuls les emplois dont le risque de stress thermique a été jugé important ou critique ont été retenus.

Tableau 2 : Matrice de cotation du risque de stress thermique

Probabilité	Faible	Négligeable	Tolérable	Important	Important
	Moyenne	Négligeable	Tolérable	Important	Critique
	Élevée	Négligeable	Tolérable	Important	Critique
	Très élevée	Tolérable	Important	Important	Critique
		Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
		Sévérité			

Liste des emplois à risque de stress thermique au Québec. En résumé, la démarche présentée dans les paragraphes précédents s'est déroulée en quatre étapes. Pour chacun des emplois, notre groupe de recherche a i) porté un jugement sur les conditions de température, d'humidité, de rayonnement et de charge de travail en utilisant les critères présentés au tableau 1, ii) évalué la probabilité (fréquence) de la présence de stress thermique, iii) jugé de la sévérité de la situation de travail en fonction de l'importance attribuée à chacun des quatre facteurs de stress thermique et iv) déterminé la cote de risque en utilisant la matrice présentée au tableau 2 pour une probabilité et une sévérité déterminées. Un tableau comprenant la liste des principaux emplois répertoriés par secteur d'activité et incluant les critères de jugement associés aux quatre facteurs retenus, les attributs de probabilité et de sévérité, ainsi que la cote de risque pour chaque emploi, a été élaboré. Un exemple de ce tableau est joint à l'annexe 1.

3.2.2 Appréciation de l'exposition aux substances chimiques

L'exposition aux substances chimiques a ensuite été évaluée pour les emplois retenus comme étant *critiques* ou *importants* à l'égard du risque de stress thermique, en considérant huit classes de produits : 1) les solvants, 2) les poussières, 3) les pesticides, 4) les hydrocarbures polycycliques aromatiques, 5) les gaz toxiques, 6) les métaux lourds, 7) l'amiante/silice et 8) les réactifs/autres substances chimiques.

Chacune de ces classes de produits n'est pas exclusive en soi. Ainsi, on peut retrouver un métal lourd dans la composition d'un pesticide ou encore dans celle des poussières. Néanmoins, cette classification des produits donne une bonne indication de la nature des expositions des travailleurs aux contaminants rencontrés en milieu de travail. Il faut noter cependant qu'en l'absence de données probantes quantitatives sur l'exposition des travailleurs et le port d'équipements de protection individuelle pour l'ensemble des emplois listés, ceux-ci seront évalués sur la présence connue et documentée de substances chimiques dans le milieu de travail.

L'information ayant servi à compléter les données provient de la base de données du National Occupational Exposure Survey (NOES) entre 1981 et 1983 (NIOSH, 1990), et des résultats des analyses de substances chimiques produites à l'IRSST pour la période 2001-2005 (Ostiguy et coll., 2007a et Ostiguy et coll., 2007b).

Ces informations, de même que des recherches documentaires sur l'utilisation, la manipulation et la production de substances chimiques, ont permis à l'équipe de recherche de porter un jugement qualitatif sur la quantité et la diversité des substances chimiques auxquelles les travailleurs des différents emplois sont susceptibles d'être exposés. Basé sur le jugement professionnel et en considérant à la fois l'importance de l'exposition aux substances chimiques (quantité et diversité) et la cote de risque thermique (important ou critique), l'équipe de recherche a ensuite attribué une cote de priorité pour chaque emploi retenu. Une cote variant entre 1 et 5 a ainsi été attribuée, la cote 1 correspondant aux emplois les plus à risque à l'égard d'une exposition concomitante aux substances chimiques et au stress thermique. L'annexe 2 présente un exemple d'appréciation de l'exposition aux substances chimiques pour quelques emplois les plus à risque à l'égard du stress thermique. Seuls les emplois ayant obtenu la cote 1 ou 2 ont été retenus pour les étapes subséquentes.

3.2.3 Nombre de travailleurs potentiellement exposés

L'estimation du nombre de travailleurs associé aux emplois retenus à l'étape précédente a été effectuée à partir des effectifs de travailleurs rémunérés provenant du recensement de la population du Canada de 2006. À partir des données mensuelles de l'enquête sur l'emploi, la rémunération et les heures de travail de Statistique Canada, les données du recensement ont été ajustées pour tenir compte des variations mensuelles des effectifs d'individus pour chaque groupe industriel durant la période 2005-2007. Ces données n'intègrent pas les travailleurs autonomes en entreprise non constituée en société.

3.2.4 Consultation d'experts et priorisation finale des emplois

Tel que décrit dans les sections 3.2.1 et 3.2.2, une première priorisation des emplois a été effectuée par notre groupe de recherche. La liste soumise aux experts correspondait aux emplois ayant obtenu la cote « 1 » ou « 2 » concernant l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Le groupe de 13 experts dans le domaine des contraintes thermiques ou de l'hygiène industrielle a été consulté afin de prioriser et compléter cette liste d'emplois au besoin. En utilisant une cote de 1 à 10, les experts ont été invités à hiérarchiser les 136 emplois présentés à l'annexe 3 en fonction de l'importance du risque, la cote 1 devant être associée aux emplois pour lesquels les experts jugeaient que l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques était très importante. Les réponses des experts ont été colligées et les moyennes et écarts-types des cotes attribuées pour chaque emploi ont été calculées.

4. RÉSULTATS

Cette section présente, dans un premier temps, les principales informations recueillies dans la revue de la littérature scientifique et dans un deuxième temps, les emplois qui auront été identifiés comme étant les plus à risque en considérant les contraintes thermiques et l'exposition aux substances chimiques.

4.1 Le bilan de la revue de la littérature

4.1.1 Les considérations thermiques

Les humains sont des êtres endothermes ce qui signifie qu'ils dépendent de la production interne de chaleur afin de contrôler leur température corporelle (T_c). L'homme maintient sa T_c aux alentours de 37 °C. Cette stabilité implique qu'il y a un équilibre entre la production de chaleur (métabolisme basal, thermogénèse, activité physique) et les pertes de chaleur par radiation, convection, conduction et évaporation. Le terme de bilan thermique est utilisé pour désigner la somme de ces gains et de ces pertes de chaleur corporelle (Schreiber et coll., 2004; Mairiaux et Malchaire, 1990) :

$$M = C_{res} + E_{res} + K + C + R + E$$

Selon cette équation, la production de chaleur interne du corps (M) est compensée par les échanges de chaleur des voies respiratoires par convection (C_{res}) et évaporation (E_{res}), ainsi que par les échanges de chaleur cutanés par conduction (K), convection (C), rayonnement (R) et évaporation (E).

Afin de maintenir son homéothermie, l'organisme humain fait appel à deux modes de contrôle : un contrôle comportemental et un contrôle basé sur le système nerveux autonome. Les réponses comportementales consistent en une modification de la tenue vestimentaire, un éloignement de la source de chaleur ou de froid, une modification du niveau d'activité physique ou encore, l'ingestion de boissons et de repas chauds ou froids (Mairiaux et Malchaire, 1990). Les manifestations réflexes les plus évidentes du contrôle thermique sont la sudation et l'augmentation du débit sanguin cutané dans les ambiances chaudes ainsi que la diminution du débit sanguin cutané et le frisson ou thermogénèse dans les ambiances froides. Lorsque les mécanismes de thermorégulation basés sur le système nerveux autonome entrent en jeu, ils entraînent plusieurs changements physiologiques susceptibles d'avoir un impact sur l'absorption, le métabolisme et la toxicité des substances chimiques (Gordon, 2005).

Les facteurs énumérés dans les deux prochaines sections sont susceptibles d'affecter le seuil de déclenchement des mécanismes de thermorégulation ou encore, l'importance des changements physiologiques qui leur sont associés, ce qui peut avoir un impact sur la cinétique et la toxicité des substances chimiques.

4.1.1.1 Facteurs individuels affectant la tolérance de l'organisme au stress thermique

Plusieurs facteurs individuels peuvent affecter la tolérance de l'organisme au stress thermique. Une synthèse est présentée dans la présente section. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à deux articles de Ganem et coll. (2004, 2006).

Vieillesse. Le vieillissement entraîne une diminution de la tolérance à la chaleur même pour les individus en bonne santé. Les facteurs responsables de cette situation sont une réduction progressive de la puissance aérobique maximale ($VO_2\text{max}$), du volume d'éjection systolique et du débit cardiaque, de la vasodilatation cutanée de même qu'une élévation du seuil de déclenchement de la sudation accompagnée d'une réduction de l'excrétion sudorale (Gordon, 2005). Cependant, selon Pandolf (1991), la diminution du seuil de tolérance à la chaleur chez les personnes plus âgées dépend davantage de leur condition physique que de leur âge. L'organisme vieillissant s'adapte également plus difficilement au froid en raison d'une diminution de son aptitude à diminuer son débit sanguin et à augmenter sa production de chaleur (Gordon, 2005; Stocks et coll., 2004). Les personnes âgées seraient donc plus à risque de souffrir d'hypo- ou d'hyperthermie (Slevinski, 2007).

Sexe. En raison des distinctions morphologiques et fonctionnelles entre les sexes, des différences peuvent être observées lors de l'exposition aux contraintes thermiques. En ambiance chaude et sèche, la femme présente un déclenchement sudoral plus lent, des températures centrale et cutanée et une fréquence cardiaque plus élevées (Mairiaux et Malchaire, 1990) ce qui la rendrait plus vulnérable que les hommes lorsqu'exposée à la chaleur sèche (Pandolf, 1991). Cette différence entre les sexes disparaît toutefois lorsque les individus sont acclimatés à la chaleur (Mairiaux et Malchaire, 1990). En ambiance chaude et humide, la tolérance de la femme à la chaleur est équivalente à celle de l'homme bien que la quantité totale de sueur secrétée soit moins élevée chez la femme. La tolérance à la chaleur ne semble pas être affectée par le cycle menstruel (Mairiaux et Malchaire, 1990) alors que la grossesse réduit la résistance à la chaleur (Semenza et coll., 1996). Lors de l'exposition au froid, il existe une différence en fonction des sexes dans la réponse vasoconstrictrice, un plus faible gradient de température entre la peau et l'environnement ayant été mis en évidence chez la femme comparativement à l'homme (Japke Claessens, 2008).

Obésité. L'obésité et la mauvaise condition physique sont des facteurs qui diminuent les capacités de l'organisme à combattre la chaleur. La masse adipeuse sous-cutanée limite le transfert de la chaleur par conduction (Leon et Gordon, 2011). De plus, pour deux individus de même poids, l'individu le plus mince aura une masse hydrique corporelle considérablement plus élevée que l'autre. Ainsi, un déficit en eau dû à l'exposition à la chaleur et à une hydratation déficiente peut avoir des conséquences majeures chez les sujets obèses (Kenefick et Sawka, 2007). Une masse adipeuse plus importante permet de diminuer les pertes de chaleur et permet de mieux résister au froid (Stocks et coll., 2004).

Maladies, médicaments, alcool et autres. Les maladies chroniques et les médicaments qui entraînent une perturbation de la thermorégulation sont des facteurs qui peuvent induire une sensibilité accrue à la chaleur (Albert et coll., 2006). Certains médicaments contre l'hypertension peuvent réduire la sudation et donc la capacité de l'organisme à éliminer la chaleur. La

consommation d'alcool et de certaines drogues illicites peut également favoriser les troubles associés à une exposition à la chaleur (Slevinski, 2007). Tous les facteurs nuisant à la production de chaleur, contribuant aux pertes de chaleur ou interférant avec la capacité de l'organisme à maintenir sa Tc peuvent favoriser l'hypothermie. Parmi ces facteurs, citons l'état de santé, l'état nutritionnel, la déshydratation, le statut mental, la médication et la consommation d'alcool (Slevinski, 2007). Le café et l'éthanol produisent un effet vasodilatateur (perte de chaleur) et leur consommation doit idéalement être évitée lors de l'exposition au froid (Slevinski, 2007).

4.1.1.2 Facteurs de l'environnement de travail pouvant affecter l'interaction entre le stress thermique et l'exposition aux substances chimiques

Plusieurs facteurs liés aux conditions ou à l'environnement de travail doivent être considérés dans l'évaluation du risque potentiel découlant de l'interaction entre le stress thermique et l'exposition aux substances chimiques.

Vêtements et équipements de protection. Les vêtements et les différents équipements de protection personnelle sont des facteurs importants à considérer dans l'évaluation du stress thermique en raison de leur poids ou de l'isolation de la peau qu'ils procurent, ce qui limite ainsi les échanges de chaleur avec l'environnement. Parmi les travailleurs susceptibles d'être visés par cette problématique on retrouve les épandeurs de pesticides, les combattants du feu et les conducteurs d'auto de course (Leon et Gordon, 2011). La présence de sueur abondante peut parfois affecter l'intégrité des tissus des vêtements, augmentant ainsi la probabilité que les contaminants dans l'environnement de travail les traversent pour se déposer sur la peau et être éventuellement absorbés (Wester et coll., 1996). La chaleur peut également conduire les travailleurs à enlever leurs vêtements ou équipements de protection contribuant ainsi à augmenter l'exposition concomitante à la chaleur et aux substances chimiques (Leon, 2008). Le port du masque de protection rend la consommation de fluides plus difficile et peut ainsi entraîner la déshydratation des travailleurs exposés à la chaleur (Kenefick et Sawka, 2007)

Activité physique. L'activité physique contribue à augmenter la Tc ce qui augmente la demande pour les mécanismes de thermorégulation. Une activité intense effectuée en ambiance chaude entraîne une compétition au niveau du système cardio-vasculaire afin de fournir simultanément un flot sanguin adéquat aux muscles actifs et au système cutané pour l'évacuation de la chaleur. Lorsque la capacité cardio-vasculaire maximale est atteinte, le flux sanguin aux muscles est maintenu au détriment des mécanismes de thermorégulation (Johnson, 2010).

Conditions du milieu externe. Le rayonnement solaire, le vent et l'humidité sont des facteurs pouvant affecter les concentrations et la distribution des substances chimiques présentes dans l'environnement de travail. Une température élevée favorise la dispersion des substances chimiques dans l'air. Plus la température ambiante sera élevée, plus les substances volatiles auront tendance à être présentes sous forme de vapeur augmentant ainsi les niveaux d'exposition par voie respiratoire. L'humidité et la vitesse du vent sont les facteurs les plus importants à l'égard des pertes de chaleur par évaporation. Un faible taux d'humidité couplé à la présence de vent favorisent l'évaporation de la sueur de la surface de la peau ce qui rend ce mécanisme plus efficace. Le vent peut également favoriser les pertes de chaleur par convection.

4.1.2 Les mécanismes de thermorégulation

Les mécanismes de thermorégulation qui permettent à l'organisme humain de maintenir sa température interne face à un stress thermique, sont décrits dans les prochains paragraphes particulièrement en ce qui a trait aux changements physiologiques susceptibles d'entraîner une modification de la cinétique et de la toxicité des substances chimiques. Pour plus de détails sur les mécanismes de thermorégulation, le lecteur peut se référer à Mairiaux et Malchaire (1990) ainsi qu'à Gordon (2005).

La thermorégulation est rendue possible grâce à l'existence de structures nerveuses thermosensibles qui détectent en continu la température des tissus périphériques de même que la T_c . Le système nerveux sympathique joue un rôle important dans les mécanismes de thermorégulation. L'intégration de ces signaux thermiques se fait au niveau de l'hypothalamus. La perception d'un inconfort thermique peut mener à des réponses de nature comportementale (p. ex., l'arrêt de l'activité physique, l'ingurgitation de liquide froid) ou déclencher, par voie nerveuse réflexe, une ou plusieurs réponses physiologiques compensatrices. Dans ce dernier cas, il est question d'hypo- ou d'hyperthermie *forcée*, c'est-à-dire que l'organisme tend à ramener sa T_c à un niveau équivalent à la température à laquelle il maintient habituellement son corps (T_{set}). Dans d'autres circonstances, par exemple lors d'une infection, c'est l'organisme qui programmera une augmentation de sa température. Il est alors question d'hyperthermie *régulée*. Cette distinction est importante afin de comprendre les mécanismes d'action impliqués lors de l'exposition à certaines substances chimiques agissant sur le système de thermorégulation de l'organisme. Si l'exposition à un agent chimique entraîne un changement de la T_{set} , cela signifie que cette substance agit nécessairement sur le système nerveux central, ce qui n'est pas obligatoirement le cas pour les expositions aux substances menant à une réponse d'hypo- ou d'hyperthermie forcée (Gordon, 2005).

4.1.3 Exposition à la chaleur et changements physiologiques

L'exposition à la chaleur déclenche une série de réponses physiologiques compensatrices qui permettent à l'organisme humain de maintenir sa température interne aux alentours de 37 °C. Ces mécanismes de thermorégulation sont bien documentés et impliquent des changements physiologiques. Parmi ceux-ci, mentionnons une augmentation et une redistribution du débit cardiaque, une accélération du débit respiratoire et de la ventilation pulmonaire, une hausse du débit sanguin périphérique et un accroissement de sécrétion de sueur. Ces changements physiologiques sont décrits dans les paragraphes suivants.

L'évaporation est le principal mécanisme de dissipation de la chaleur chez l'humain. L'excrétion sudorale est sous le contrôle du système nerveux sympathique. La sueur est produite par les glandes eccrines et apocrines, les premières étant principalement responsables de la thermorégulation chez l'humain. La densité, le taux de sécrétion et le seuil d'activation des glandes sudoripares constituent les facteurs déterminants du volume de sueur produit (Leon et Gordon, 2011; Ramphal, 2000). Le débit sudoral est fonction du bilan thermique, lequel est fortement influencé par l'intensité de l'effort physique. De l'énergie est requise pour évaporer la sueur à la surface de la peau, cette énergie se traduisant par une perte de chaleur (Japke Claessens, 2008). L'état d'hydratation de la surface de la peau peut modifier l'excrétion

sudorale. En effet, la réduction progressive de l'excrétion sudorale chez les sujets exposés à une ambiance humide serait attribuable à l'hydratation progressive des couches superficielles de la peau.

Les besoins de transfert de chaleur vers l'environnement se traduisent également par une augmentation importante du débit sanguin cutané (vasodilatation). Les humains peuvent présenter une large gamme de débits sanguins cutanés ceux-ci pouvant aller de 150-200 mL/min, dans un environnement frais, à 2000 mL/min dans un environnement chaud (Gordon, 2005). Le flux sanguin cutané augmente de 3 L/min/°C de température rectale ce qui peut conduire à des augmentations d'un facteur 10, et parfois davantage, selon les individus et l'environnement thermique (Leon et Gordon, 2011; Vanakoski et Seppälä, 1998). À titre d'exemple, le débit sanguin cutané est augmenté de 400 % lors d'une exposition à la chaleur entraînant une fréquence cardiaque de 140 battements/min (Sidhu et coll., 2011). Bien que ces résultats ne soient pas généralisables à toutes les situations d'exposition à la chaleur, ces derniers permettent néanmoins de mettre en évidence que l'exposition à la chaleur est susceptible d'entraîner une augmentation significative du débit sanguin cutané.

Pour répondre à l'augmentation du débit sanguin cutané, le système cardio-vasculaire met en jeu des mécanismes d'adaptation comparables à ceux utilisés lors de l'exercice musculaire (Mairiaux et Malchaire, 1990; Rowell, 1986). Des différences sont cependant à noter pour les débits sanguins au niveau de la peau et des muscles. Le débit sanguin aux muscles est augmenté significativement lors d'une activité physique alors qu'il est diminué lors de l'exposition à la chaleur. Le débit sanguin cutané représente pour sa part plus de 50 % du débit cardiaque lors d'une exposition à la chaleur, comparativement à 10 % lors d'un exercice physique (Sidhu et coll., 2011).

Le système cardio-vasculaire réagit en augmentant le débit cardiaque principalement en élevant la fréquence cardiaque (FC) alors que le volume d'éjection systolique reste stable ou diminue. Le débit cardiaque peut ainsi augmenter de 75 à 100 % (Vanakoski et Seppälä, 1998; Mairiaux et Malchaire, 1990). Il a été démontré chez des travailleurs en salle de cuves Soderberg que l'exposition à la chaleur représentait à elle seule une charge supplémentaire sur le système cardio-vasculaire de l'ordre de 20-25 battements/min (Rodahl, 2003). Les surfaces respiratoires peuvent contribuer aux échanges de chaleur avec l'environnement en favorisant l'évaporation de liquide (Japke Claessens, 2008). Les humains présentent, en effet, une augmentation de la fréquence respiratoire et de la ventilation minute ce qui contribue de façon modeste à l'évaporation de l'eau (Ingram et Mount, 1975; Leon et Gordon, 2011).

Haldane (1905) a été le premier chercheur à rapporter une augmentation de la ventilation pulmonaire, associée à une hyperthermie, chez l'humain. De plus, Cabanac et White (1995) ont mis en évidence une augmentation de la ventilation pulmonaire chez des sujets exposés à la chaleur, au repos. Cette augmentation survenait lorsque les températures tympanique et oesophagienne (T_{oes}) des individus atteignaient respectivement 38,1 et 38,5 °C. Dans cette étude les volontaires étaient assis dans un bain d'eau à 41 °C. Fujii et coll. (2008) ont, pour leur part, noté une élévation de la ventilation pulmonaire à partir de T_{oes} de 37,8±0,5 °C, chez des individus immergés dans un bain d'eau à 35 °C.

On observe également une redistribution d'une partie du débit sanguin irriguant les régions inactives, principalement les organes abdominaux (réseau splanchnique) et les reins, vers les tissus sous-cutanés. Sidhu et coll. (2011) rapportent une diminution du débit sanguin au niveau des reins, des intestins, de l'estomac, de la rate et du pancréas lors d'une exposition à la chaleur. L'importance de cette diminution varie en fonction de l'intensité de la contrainte thermique et de son impact sur la fréquence cardiaque. Dans des conditions extrêmes, correspondant à des températures cutanées de l'ordre de 40-41 °C, Vanakoski et Seppälä (1998) rapportent une diminution de 30-35 % du flux sanguin aux viscères ce qui peut entraîner une ischémie du tractus gastro-intestinal et augmenter la perméabilité vasculaire (Leon, 2008).

Chez un sujet soumis à un exercice musculaire en ambiance chaude, la vasodilatation augmente davantage ce qui entraîne une réduction supplémentaire des débits sanguins splanchnique et rénal permettant ainsi de hausser le débit sanguin cutané. La FC s'accélère pour éviter une chute significative du débit cardiaque et de la pression artérielle. Le système de contrôle de la pression induit alors, par voie nerveuse réflexe, une augmentation du tonus vasoconstricteur pour réduire le débit sanguin cutané. Ainsi, il existe une compétition entre le contrôle de la Tc (vasodilatation - augmentation du débit sanguin cutané) et celle de la pression artérielle (maintien des débits musculaire et cardiaque) (Mairiaux et Malchaire, 1990).

Exposé de façon répétée à la chaleur, un individu développe des mécanismes d'adaptation. Ces mécanismes se traduisent notamment par une réduction de l'élévation de la Tc et une réduction de la FC. Cet équilibre thermique est obtenu grâce à une efficacité accrue de la vasodilatation, de la sudation et de l'abaissement de son seuil de déclenchement (Mairiaux et Malchaire, 1990).

L'application des différentes méthodes utilisées afin d'évaluer l'indice de contrainte thermique (p. ex., le Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), un indice composite de température utilisé pour estimer les effets de la température, de l'humidité, et du rayonnement solaire sur l'homme) vise à maintenir la Tc en dessous de 38 °C (38,5 °C pour les travailleurs adaptés à la chaleur). Le respect de la réglementation sur les contraintes thermiques devrait permettre à la plupart des travailleurs de maintenir leur Tc en dessous des limites au-delà desquelles les mécanismes de thermorégulation interviennent (OMS, 1969; RSST, 2007; ACGIH, 2009).

4.1.4 Exposition au froid et changements physiologiques

Tel que décrit dans l'article de Stocks et coll. (2004), plusieurs changements physiologiques sont associés à une exposition au froid. Lors de l'exposition au froid, le débit sanguin cutané diminue par le biais d'une vasoconstriction des vaisseaux sanguins périphériques et musculaires (Slevinski, 2007). Cela se traduit par une réduction du transfert de la chaleur centrale du corps vers la peau et entraîne conséquemment une diminution des pertes de chaleur de la peau vers l'environnement (Japke Claessens, 2008). L'exposition au froid induit également un processus de thermogénèse à partir de l'énergie emmagasinée dans l'organisme, ce qui entraîne une augmentation du métabolisme. Si l'exposition au froid se poursuit, des frissons apparaissent, ce qui contribue à augmenter la production de chaleur (Japke Claessens, 2008). Les mécanismes de thermorégulation mis en jeu lors d'une exposition au froid sont énergivores et peuvent entraîner une augmentation du débit cardiaque et de la ventilation pulmonaire (Japke Claessens, 2008; Ballard, 1974). Lorsque l'exposition au froid se poursuit et que la température rectale atteint les 35 °C, le taux métabolique diminue (Ballard, 1974). À la suite de leur augmentation initiale, les

fréquences respiratoire et cardiaque diminuent de façon proportionnelle à l'abaissement de la T_c. Les débits sanguins aux reins et au foie sont également diminués (Ballard, 1974). On observe également une diminution du volume plasmatique de l'ordre de 7 % et une augmentation du débit urinaire (Stocks et coll., 2004; Ballard, 1974). Le système nerveux sympathique exerce son effet par le biais des catécholamines, dont la norépinéphrine et l'épinéphrine, qui peuvent se lier aux adrénorécepteurs α et β . En général, la stimulation des récepteurs β augmente la thermogénèse alors que celle des récepteurs α augmente la vasoconstriction (Stocks et coll., 2004). L'hypothermie correspond à des T_c < 35 °C (Slevinski, 2007).

4.1.5 Effet de l'exposition concomitante aux contraintes thermiques sur la toxicocinétique et la toxicité des substances chimiques

Tel que mentionné dans les sections précédentes, l'exposition aux contraintes thermiques déclenche une série de réponses physiologiques compensatrices qui sont susceptibles de modifier l'absorption, la distribution, la biotransformation et l'excrétion des substances chimiques (Gordon et coll., 2008). Ces changements physiologiques peuvent être ultimement responsables d'une modification des niveaux tissulaires atteints et de la toxicité des xénobiotiques (Leon, 2008). Plusieurs études effectuées chez l'animal de laboratoire démontrent clairement qu'il existe un lien entre la température et la toxicité des xénobiotiques. Cependant, en raison des différences importantes dans le contrôle de la température interne entre l'animal de laboratoire et l'humain, l'extrapolation des résultats des études animales à l'humain est porteuse d'incertitudes (Leon, 2008). En conséquence, le présent bilan de la littérature considérera de façon prépondérante les données obtenues chez l'humain.

4.1.5.1 Substances chimiques et exposition à la chaleur

Absorption

Les quantités de xénobiotiques absorbés par les voies pulmonaire et cutanée lors du travail en ambiance chaude peuvent être accrues de façon significative en raison de l'augmentation de la ventilation pulmonaire et du débit sanguin cutané (vasodilatation) (Gordon et coll., 2008; Leon, 2008). L'impact sur l'absorption gastro-intestinale semble négligeable (Vanakoski et Seppälä, 1998).

Absorption cutanée. L'augmentation de la température et du flux sanguin cutanés, de même que la présence de sueur à la surface de la peau peuvent favoriser l'absorption percutanée des substances chimiques lors d'une exposition concomitante à la chaleur (Vanakoski et Seppälä, 1998; Wester et coll., 1996; Gordon, 2005). L'importance de cette augmentation est fonction des propriétés physico-chimiques de la substance, de la surface exposée et de l'intensité du stress thermique (Leon, 2008; Riviere et Williams, 1992). En effet, dans le domaine de la pharmacologie, des études ont mis en évidence que l'absorption cutanée de plusieurs médicaments était augmentée dans des environnements chauds (Lenz, 2011).

Vanakoski et Seppälä (1998) rapportent une augmentation de l'absorption cutanée de l'insuline (administration sous-cutanée), de la nitroglycérine, du salicylate de méthyle et de la nicotine (enduit ou timbres cutanés) sous l'effet de courtes expositions d'environ 30 min à la chaleur,

dans des saunas ou à une température ambiante de 40 °C. Une augmentation de 50 à 150% a pu être notée dans les concentrations plasmatiques de ces substances à la suite d'une exposition à la chaleur. En se basant sur ces résultats, les auteurs concluent que des températures ambiantes supérieures à 30 °C peuvent avoir un impact significatif sur l'absorption cutanée de plusieurs substances. Funckes et coll. (1963) ont mis en évidence une augmentation de l'absorption cutanée du parathion (sous forme de poudre) en fonction de la température chez des volontaires. Ces auteurs rapportent une augmentation de 25 % de l'excrétion urinaire du p-nitrophénol (métabolite du parathion) entre les expositions à 14 °C et 21 °C, de 17 % entre 21 °C et 28 °C et de 180 % entre 28 °C et 40,5 °C. Puisque les glandes sudoripares sont activées par stimulation cholinergique, le parathion, tout comme les autres pesticides inhibiteurs de la cholinestérase, pourrait favoriser directement la production de sueur et l'absorption cutanée de ces substances (Gordon, 2005). Selon Gordon (2005), il existe suffisamment de données dans la littérature pour conclure que la chaleur et l'exercice physique (ensemble ou séparément) favorisent l'absorption cutanée des pesticides chez l'humain.

Ces données suggèrent qu'une exposition à la chaleur est susceptible d'augmenter l'absorption percutanée des substances chimiques présentes en milieu de travail. Cette situation est susceptible de toucher davantage les substances pour lesquelles la voie cutanée contribue déjà à l'exposition globale des travailleurs en ambiance thermique neutre. Pour ces substances, les valeurs limites d'exposition proposées par plusieurs organismes sont souvent accompagnées de la notation « percutanée ». À titre d'exemple, selon l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH® (2012), le Règlement québécois sur la santé et la sécurité du travail (RSST, 2007) et l'Institut national de recherche en sécurité (INRS France 2008), 14 substances chimiques figurant dans le *Guide de surveillance biologique de l'exposition* de l'IRSST ont un potentiel d'absorption cutanée important soit le benzène, l'éther monoéthylique de l'éthylène glycol, l'acétate d'éthylglycol, l'éthylbenzène, le n-hexane, le mercure (vapeur et composés inorganiques), le méthanol, la méthyléthylcétone, les organophosphorés, le pentachlorophénol, le phénol, le styrène, le toluène et les xylènes (Truchon et coll., 2012). L'absorption cutanée de ces substances pourrait donc être significativement plus importante lors d'une exposition concomitante à la chaleur.

Absorption pulmonaire. Aucune information n'a pu être recensée relativement à l'effet de l'exposition à la chaleur sur l'absorption pulmonaire des médicaments ou des substances chimiques présentes en milieu de travail. Cependant, puisque l'exposition à la chaleur entraîne, tout comme l'exercice physique, une augmentation de la ventilation pulmonaire, il est permis de croire que l'absorption des substances chimiques sera accrue chez les individus exposés à la chaleur (Mautz, 2003). En effet, l'importance de la contribution de l'activité physique sur l'absorption pulmonaire a déjà été démontrée. L'absorption des solvants organiques dépend principalement de leur solubilité dans le sang, c'est-à-dire de leur coefficient de partage sang-air ($P_{\text{sang:air}}$). Selon Csanády et Filser (2001), une augmentation de la ventilation pulmonaire modifiera à la hausse l'absorption des solvants organiques présentant un $P_{\text{sang:air}}$ plus grand que six. Le tableau 3 présente les valeurs de $P_{\text{sang:air}}$ correspondant aux substances organiques figurant dans le *Guide de surveillance biologique de l'exposition* de l'IRSST (Truchon et coll., 2012). Ainsi, une exposition à la chaleur suffisamment intense pour déclencher les mécanismes de thermorégulation serait donc susceptible d'entraîner une augmentation de l'absorption de 12 des 14 substances organiques énumérées dans ce tableau. L'importance de cet accroissement doit cependant être documentée.

Les résultats de l'étude de Tardif et coll. (2008), réalisée chez des volontaires exposés à cinq solvants, ont permis de démontrer que l'augmentation de la ventilation pulmonaire associée à une activité physique pouvait entraîner une hausse de la concentration des indicateurs biologiques de l'exposition de l'ordre de 200 % pour les solvants les plus solubles dans le sang (p. -ex. toluène, acétone, trichloroéthylène, styrène). Les concentrations du n-hexane, une substance moins soluble dans le sang, étaient peu affectées. Compte tenu des similitudes dans les changements physiologiques associés à une activité physique ou à une exposition aux contraintes thermiques chaudes, il est permis de croire qu'une exposition simultanée à la chaleur et aux substances chimiques affectera, à la hausse, les données de surveillance biologique de l'exposition lorsque la substance est soluble dans le sang.

Tableau 3 : Influence attendue de la charge de travail ou de l'exposition à la chaleur sur l'absorption pulmonaire de différentes substances organiques en fonction de leur valeur de $P_{sang:air}$

<i>Substances dont l'absorption est influencée par la ventilation pulmonaire</i> $P_{sang:air} > 6$	<i>Substances dont l'absorption n'est pas ou peu influencée par la ventilation pulmonaire</i> $P_{sang:air} < 6$
Acétone	n-Hexane
Benzène	1,1,1-Trichloroéthane
Éther monoéthylique de l'éthylène glycol	
Éthylbenzène	
Méthanol	
Méthyléthylcétone	
Méthylisobutylcétone	
Styrène	
Tétrachloroéthylène	
Toluène	
Trichloroéthylène	
Xylènes	

L'augmentation de la ventilation pulmonaire affecte également le dépôt des particules dans les différentes régions de l'arbre respiratoire. La déposition pulmonaire dépend des différentes propriétés des particules, notamment de leur diamètre et du type de respiration (oral ou nasal) (Bennett et coll., 1985; ICRP, 1995). Comparativement aux substances organiques, peu de données quantitatives validées sont disponibles relativement à l'impact de l'augmentation de la ventilation pulmonaire sur l'absorption des xénobiotiques sous forme particulaire. Deux études rapportent que le nombre total de particules déposées peut être augmenté jusqu'à un facteur 4,5 lors d'un exercice modéré (Daigle et coll., 2003; Löndahl et coll., 2007). Puisque l'exposition à la chaleur entraîne une augmentation de la ventilation pulmonaire, on peut également s'attendre à une hausse de l'absorption pulmonaire des contaminants présents sous la forme particulaire.

Absorption gastro-intestinale. Dans un article de revue, Vanakoski et Seppälä (1998) rapportent que de courtes expositions à la chaleur (15 à 60 min), entraînant des températures cutanées de l'ordre de 39 °C, ont un impact mineur sur l'absorption gastro-intestinale, la biodisponibilité et l'élimination de plusieurs médicaments (midazolam, éphédrine, propranolol, tétracycline). Selon la revue de la littérature effectuée par Sidhu et coll. (2011), le temps de transit intestinal serait inchangé lors d'une exposition à la chaleur alors que les données disponibles en ce qui a trait à la vidange gastrique ne permettent de tirer aucune conclusion probante.

Distribution

La redistribution du flux sanguin lors d'un stress thermique peut avoir un impact sur la distribution et l'accumulation de substances chimiques dans l'organisme (Gordon, 2005). Ainsi, l'exposition à la chaleur augmente la rétention des xénobiotiques dans les tissus mous en raison de la diminution de l'excrétion urinaire (Leon, 2008). Le volume de distribution des xénobiotiques peut être réduit à la suite d'une déshydratation. Cette situation affecte davantage les substances faiblement liposolubles qui présentent un petit volume de distribution correspondant, par exemple, au volume sanguin (Vanakoski et Seppälä, 1998). Une courte exposition à la chaleur (< 1 h) aurait cependant un effet négligeable sur le volume de distribution (Vanakoski et Seppälä, 1998). La liaison aux protéines peut être théoriquement augmentée en raison de la déshydratation et de l'accroissement des concentrations plasmatiques des protéines. Ceci peut modifier la distribution des substances fortement liées aux protéines (Lenz, 2011). Cependant, tout comme Sidhu et coll. (2011), nous n'avons recensé aucune étude confirmant cet effet. Globalement, selon la revue de la littérature effectuée par Vanakoski et Seppälä (1998), l'exposition à la chaleur aurait un effet négligeable sur la distribution de la plupart des xénobiotiques.

Biotransformation

La biotransformation des substances chimiques est un processus complexe qui dépend notamment de leurs propriétés physico-chimiques, du débit sanguin et de l'activité enzymatique (Lenz, 2011). La biotransformation des substances ayant un taux d'extraction hépatique élevé dépend grandement du flux sanguin hépatique. Puisque l'exposition à la chaleur diminue le débit sanguin hépatique, ceci devrait entraîner une diminution de la clairance hépatique (Vanakoski et Seppälä, 1998). Ainsi, la clairance du vert d'indocyanine, substance utilisée, entre autres, pour évaluer le flux hépatique, est diminuée de l'ordre de 30 % lors d'une exposition à la chaleur (41 °C, 3 h, au repos) (Swartz et coll., 1974). La demi-vie de plusieurs substances peut donc être augmentée lors d'une exposition simultanée à la chaleur (Schlaeffer et coll., 1984). Une courte exposition à la chaleur (< 1 h) a un effet négligeable sur le débit sanguin hépatique et donc la clairance des xénobiotiques n'est habituellement pas modifiée dans ces conditions (Vanakoski et Seppälä, 1998; Lenz, 2011).

La clairance des xénobiotiques plus faiblement extraits (< 20 %) du foie sera peu affectée par la modification du débit sanguin hépatique lors d'une exposition à la chaleur. La biotransformation de ces substances dépend essentiellement de l'activité enzymatique et de la fraction libre (non liée aux protéines) présente dans le plasma (Lenz, 2011). Une exposition à la chaleur est cependant susceptible d'entraîner une augmentation de l'activité enzymatique et de la liaison aux protéines, deux facteurs qui peuvent en théorie modifier la toxicocinétique de ces xénobiotiques (Lenz, 2011). Aucune donnée confirmant ces possibles effets n'a toutefois été recensée.

Excrétion

Lors d'une exposition à la chaleur, l'excrétion rénale des xénobiotiques peut être diminuée en raison de la déshydratation et de la diminution du débit sanguin rénal (Gordon, 2005; Vanakoski et Seppälä, 1998). Les substances les plus affectées sont celles qui sont éliminées telles quelles dans l'urine et celles dont l'élimination dépend de la fonction rénale (Lenz, 2011). Selon des études pharmacocinétiques, l'excrétion urinaire de plusieurs médicaments est diminuée ou retardée lorsque le débit sanguin rénal est réduit. Ceci se traduit dans certains cas par une augmentation des concentrations plasmatiques des médicaments (Vanakoski et Seppälä, 1998; Lenz, 2011).

Par ailleurs, l'augmentation de la sudation lors de l'exposition à la chaleur peut augmenter l'excrétion des substances éliminées par cette voie. Des métaux lourds et des métaux de trace tels le fer, l'aluminium, le cobalt, le cuivre, le plomb, le manganèse, le mercure, le molybdène, le nickel, l'étain et le zinc (Hohnadel et coll., 1973) et des substances organiques volatiles telles que l'acétone, l'éther, l'éthanol et le toluène sont excrétées dans la sueur (Naitoh et coll., 2002).

Excrétion urinaire de la créatinine. Dans le cadre des activités de surveillance biologique de l'exposition professionnelle, la correction par la créatinine est utilisée pour ajuster les concentrations urinaires des différents paramètres biologiques lorsque des prélèvements ponctuels sont effectués. Son utilisation repose sur l'hypothèse que son excrétion est constante, peu importe le débit urinaire, ce qui est remis en question par certains auteurs (Boeniger et coll., 1993). Puisque le travail en ambiance chaude entraîne une augmentation des pertes d'eau par transpiration, ceci peut résulter en une diminution du débit urinaire. Puisque la diminution du débit urinaire correspond souvent à une diminution de l'excrétion de la créatinine, ce mode de correction peut être moins précis dans ces circonstances (Boeniger et coll., 1993).

Toxicité

Tel que démontré principalement à partir d'études effectuées chez l'animal, une élévation de la Tc est accompagnée d'une augmentation de plusieurs processus biologiques (vitesse des réactions enzymatiques, liaison aux récepteurs, peroxydation des lipides, phosphorylation oxydative, etc.) ce qui est susceptible d'entraîner un accroissement de l'intensité des effets des médicaments ou des substances chimiques (Leon, 2008).

Seulement quelques études relatives à l'impact d'une exposition à la chaleur sur la toxicité des substances chimiques chez l'humain ont été recensées. Walker et coll. (2001) ont étudié l'effet d'une exposition combinée à la chaleur et au monoxyde de carbone chez les pilotes de voiture de course. Leur étude a permis de mettre en évidence que cette exposition entraînait une diminution plus importante des performances psychomotrices comparativement à une exposition au monoxyde de carbone ou à la chaleur uniquement. Wei et coll. (1988) rapportent également une toxicité accrue du monoxyde de carbone lorsque les travailleurs sont simultanément exposés au CO et à la chaleur. Une étude d'Attia et coll. (1988) rapporte que l'astreinte thermique chaude augmente la susceptibilité à l'intoxication par le plomb. L'Organisation mondiale de la santé (OMS 1981) rapporte que l'exposition combinée à la chaleur et aux solvants peut être tenue responsable de l'augmentation des effets sur la santé rapportés par les travailleurs. L'interaction chaleur/substances chimiques ne serait significative que lorsque les niveaux d'exposition se situent près des concentrations admissibles (TLV) et les effets seraient moins importants chez les travailleurs acclimatés (Freundt, 1990). Selon Freundt (1990), d'autres études sont requises afin

de confirmer ces résultats. Des études portant sur l'impact de l'exposition simultanée à la chaleur et à la pollution de l'air ont permis de mettre en évidence un effet significatif sur le taux de mortalité humaine ou les effets cardio-vasculaires (Rainham et Smoyer-Tomic, 2003; Qian et coll., 2010; Ren et coll., 2011).

Dans le domaine de la pharmacologie, une augmentation des effets cliniques de plusieurs médicaments est rapportée lors d'une exposition à la chaleur. Cette augmentation semble être associée à l'augmentation de la dose puisque l'absorption cutanée de plusieurs médicaments est accrue (Vanakoski et Seppälä, 1998; Sidhu et coll., 2011).

Enfin, selon Gordon (2005), un travailleur soumis à un environnement qui le force à dissiper activement de la chaleur (mécanismes de thermorégulation activés) est susceptible de présenter des manifestations toxiques à de plus faibles doses comparativement à lorsqu'il évolue dans un environnement thermo-neutre en raison principalement d'une absorption potentiellement augmentée des substances chimiques par les voies respiratoire et cutanée.

4.1.5.2 Substances chimiques et exposition au froid

L'impact d'une exposition au froid sur la cinétique et les effets des substances chimiques a été beaucoup moins étudié que celui de la chaleur. Les quelques informations colligées sont résumées dans les paragraphes suivants.

Absorption

La demande accrue de production de chaleur lors de l'exposition au froid résulte en une élévation de la fréquence respiratoire, ce qui peut conduire à une augmentation de l'absorption des contaminants par la voie respiratoire (Gordon, 2005). Cependant, cette situation n'est susceptible de se produire que dans des conditions rarement rencontrées en milieu de travail et aucune étude ayant quantifié cet impact théorique n'a pu être recensée.

Distribution, métabolisme et élimination

Dû au ralentissement des différents processus métaboliques qu'elle entraîne, l'exposition au froid s'accompagne habituellement d'une diminution de la biotransformation et de l'excrétion des xénobiotiques prolongeant ainsi leur séjour dans l'organisme (Gordon et coll., 2008). Cependant, ce ralentissement des activités métaboliques ne se rencontre que dans les cas d'hypothermie sévère, ce qui est peu probable de se produire en milieu de travail.

Toxicité

Une diminution de la Tc peut réduire la toxicité de plusieurs substances chimiques puisque les réactions biochimiques menant aux dommages cellulaires, tels que la formation d'espèces réactives de l'oxygène, la peroxydation des lipides ou la formation de métabolites toxiques, sont ralenties au fur et à mesure que la Tc s'abaisse (Gordon et coll., 2008; Leon, 2008). Ainsi, Leon (2008) rapporte un cas d'intoxication sévère au monoxyde de carbone où l'individu a été sauvé en induisant une hypothermie. Ces conclusions semblent s'appliquer à la plupart des agents chimiques, sauf le DDT et les pyréthrinoides, des insecticides qui touchent spécifiquement aux canaux sodiques impliqués au niveau de la polarisation membranaire (Gordon, 2005). Ces agents chimiques bloquent l'entrée de ces canaux en les maintenant en position ouverte ce qui entraîne

une dépolarisation prolongée des membranes. Ce processus est accentué lorsque la température diminue (Gordon, 2005).

Malgré que l'exposition au froid puisse entraîner une augmentation de l'absorption des agents chimiques par les voies respiratoires et une diminution de leur biotransformation et de leur excrétion, la résultante finale semble être une baisse de la toxicité de plusieurs substances chimiques (Gordon, 2005).

4.1.6 Effet des substances chimiques sur les mécanismes de thermorégulation

Lorsque l'exposition à une substance chimique entraîne une hypo- ou une hyperthermie ceci signifie que les structures nerveuses thermosensibles de l'organisme, et donc les mécanismes de thermorégulation (thermogénèse métabolique, évaporation de l'eau, vasomotricité périphérique), sont affectés (Leon, 2008; Gordon, 2005). Bien que très fréquent chez l'animal de laboratoire, ce type de réponse est cependant plus rarement rencontré chez l'humain (Gordon et coll., 2008). Des cas d'intoxications accidentelles à certains xénobiotiques ont toutefois permis de mettre en évidence ce type de réponse chez l'humain. Ainsi, certains agents chimiques peuvent affecter les mécanismes de thermorégulation, ce qui pourrait diminuer la capacité des travailleurs à s'adapter à un stress thermique (Johnson Rowsey et coll., 2003).

4.1.6.1 Substances vasoconstrictrices

Les substances vasoconstrictrices sont susceptibles d'inhiber la capacité de l'organisme à dissiper la chaleur par le biais de la vasodilatation des vaisseaux sanguins cutanés (Leon, 2008). Parmi les substances citées dans le RRSSTQ, seuls le plomb et ses composés inorganiques (poussières et fumées) ont été identifiés comme étant des substances vasoconstrictrices (Vyskocil et coll., 2005). Un agent vasoconstricteur aura peu d'effets sur la Tc dans un environnement froid, car il y a déjà une vasoconstriction périphérique. Cependant, dans un environnement chaud, la circulation sanguine au plan cutané est habituellement élevée afin de favoriser les pertes de chaleur. Dans de telles circonstances, la vasoconstriction des vaisseaux sanguins peut nuire à la dissipation de la chaleur (Gordon, 2005).

4.1.6.2 Substances vasodilatatrices

Les substances produisant un effet vasodilatateur favorisent les pertes de chaleur. L'exposition à de tels agents chimiques peut donc favoriser l'hypothermie (Slevinski, 2007). Parmi les substances citées dans le RRSSTQ, le dinitrate de propylène glycol, le dinitrate d'éthylène glycol, l'enflurane, l'halothane, le nitrate de propyle normal, la nitroglycérine et l'azoture de sodium ont été identifiés comme étant des substances vasodilatatrices (Vyskocil et coll., 2005). L'éthanol a déjà été mis en cause dans des cas de décès accidentel par hypothermie chez des individus exposés au froid (Leon, 2008). L'exposition à l'éthanol entraîne une augmentation du flux sanguin cutané ce qui peut mener à un effet hypothermique. Cependant, cet effet est habituellement faible ou négligeable en milieu de travail (Gordon, 2005).

4.1.6.3 Composés organophosphorés et carbamates

Le mécanisme d'action associé à la toxicité des composés organophosphorés et des carbamates est l'inhibition de l'acétylcholinestérase. La fonction de cette enzyme consiste à dégrader l'acétylcholine laquelle se lie à des récepteurs du système nerveux central. Cette liaison a pour effet de modifier une variété de réponses associées au maintien de la Tc telles que le débit sanguin cutané, la fréquence cardiaque, la respiration et la sécrétion de sueur (Leon, 2008). Les données disponibles chez l'humain ont été principalement obtenues dans des situations d'urgence à la suite de cas d'intoxications aiguës au parathion et méthylparathion. Dans les cas d'intoxications sévères, on observe une hypothermie dans les premières heures, suivie d'une hyperthermie qui peut durer jusqu'à une semaine (Gordon, 2005). L'hypothermie observée dans les premières heures est due à une stimulation de la voie cholinergique muscarinique, ce qui conduit à une augmentation de la sudation et de la vasodilatation périphérique (Gordon, 2005; Gordon et coll., 2005). La fièvre qui s'en suit est, pour sa part, attribuée aux mécanismes mis en place par les structures nerveuses thermosensibles, afin de réduire les pertes de chaleur et augmenter la Tc (Gordon, 2005).

4.1.6.4 Métaux

Chez l'humain, les fumées de métaux peuvent être à l'origine de manifestations toxiques caractérisées, entre autres, par de la fièvre (Fine et coll., 1997). L'exposition aux oxydes métalliques présents dans les fumées de soudage, les fonderies ou émis lors des opérations de galvanisation peuvent engendrer une série de symptômes dont de la fièvre. L'oxyde de zinc semble être le plus toxique. Selon Fine et coll. (1997), une exposition à l'oxyde de zinc par voie pulmonaire pour une période de 2 h à une concentration de 5 mg/m³ a entraîné, chez des travailleurs, 11 h après l'exposition, une augmentation de la Tc. Parmi les autres oxydes métalliques produisant le même effet on retrouve l'aluminium, l'antimoine, le cadmium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et l'étain (Gordon, 2005).

4.1.6.5 Pentachlorophénol

Le pentachlorophénol (PCP), comme d'autres agents de découplage de la phosphorylation oxydative, entraîne une élévation du métabolisme. Des augmentations importantes et prolongées de la Tc ainsi qu'une sudation importante ont été notées à la suite d'une exposition aiguë d'un travailleur au PCP (Gordon, 2005).

4.1.6.6 Arsenic

Un cas d'hyperthermie (39 °C) a été rapporté chez l'humain à la suite d'une exposition aiguë à l'arsine (Wilkinson et coll., 1975). L'exposition à l'arsenic est associée au développement du syndrome de Raynaud qui est caractérisé par une réduction du débit sanguin périphérique. Puisque l'exposition au froid entraîne également une diminution du débit sanguin périphérique ceci peut favoriser le développement de ce syndrome. Les fondeurs, soit les métallurgistes œuvrant dans les usines de fabrication d'objets en métaux, constituent un groupe de travailleurs à risque à l'égard de cette problématique lors de l'exposition aiguë ou chronique à l'arsenic à des températures ≤ à 10-15 °C (Lagerkvist et coll., 1986, 1988).

4.1.6.7 Autres substances

Des études rapportent qu'une exposition à des produits de pyrolyse de plastiques est responsable de la « fièvre des polymères » (Kuntz et McCord, 1974; Williams et coll., 1974). De l'hyperthermie a été observée chez l'humain à la suite d'une exposition au chlordane et aux insecticides néonicotinoïdes. Le mécanisme d'action impliqué n'est cependant pas connu (Gordon, 2005).

4.2 Identification des travailleurs exposés simultanément aux contraintes thermiques et aux substances chimiques

Très peu d'études traitent de l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques en milieu professionnel. Les quelques données recensées sont décrites dans les paragraphes qui suivent en ciblant certains emplois.

Agriculteurs et épandeurs de pesticides. Les agriculteurs et les travailleurs œuvrant à l'épandage des pesticides, substances souvent absorbées de façon importante par voie cutanée, sont très concernés par le travail en ambiance chaude. De plus, il est souvent rapporté dans la littérature que ces travailleurs renoncent à porter leurs équipements de protection en raison de leur inconfort dans un environnement chaud, ce qui peut favoriser l'absorption des substances chimiques (Gordon, 2005).

Pompiers/combattants du feu. Ces travailleurs sont exposés aux contraintes thermiques non seulement parce qu'ils s'activent à proximité du feu, mais également parce qu'ils travaillent occasionnellement dans des espaces clos et qu'ils portent des vêtements ou des équipements parfois très contraignants. Ils sont simultanément exposés aux différents produits chimiques se retrouvant sur les lieux où ils ont à intervenir : monoxyde de carbone, benzène, particules, amiante, cyanures, chlorure d'hydrogène, hydrocarbures polycycliques aromatiques, fumées, produits entreposés, produits utilisés pour maîtriser les incendies, etc. (Melius, 2001; Leon, 2008).

Pilotes de voiture de course. Ces pilotes sont souvent exposés à des concentrations de monoxyde de carbone (CO) pouvant atteindre 200 ppm, simultanément à des contraintes thermiques puisque la température intérieure des voitures de course peut facilement atteindre les 50 °C (Gordon, 2005; Leon, 2008). Les vêtements de protection portés par les pilotes peuvent également contribuer à augmenter la contrainte thermique en diminuant l'évacuation de la chaleur. Walker et coll. (2001) ont démontré clairement que l'exposition concomitante à la chaleur et au CO augmentait le nombre d'erreurs. Le CO semble exacerber la réponse au stress thermique. Cependant, le mécanisme impliqué n'a pas encore été élucidé. Selon des données récentes obtenues à partir d'expérimentations animales, le CO pourrait jouer un rôle de médiateur dans le déclenchement de la fièvre. Peu de données sont disponibles chez l'humain comme chez l'animal relativement à l'effet du CO sur le contrôle de la Tc lors de l'exposition à de faibles concentrations (Gordon, 2005).

Artistes céramistes. Ces travailleurs peuvent être exposés simultanément à la chaleur, aux métaux (p.ex. plomb), aux poussières fibrogéniques (p.ex. silice) et autres émissions toxiques provenant des fours (Dorevitch et Babin, 2001).

Travailleurs dans le secteur des matières plastiques. Selon l'OMS (1981), l'exposition combinée à la chaleur et aux substances chimiques utilisées dans la production des matières plastiques peut être tenue responsable d'une augmentation de plusieurs effets sur la santé dont des modifications objectives des paramètres fonctionnels neurologiques, cardio-vasculaires ou hématologiques.

En complément aux données de la littérature, un deuxième volet de cette étude visait à identifier les travailleurs québécois exposés de façon importante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Ainsi, le potentiel d'exposition aux contraintes thermiques a été documenté pour 1010 emplois répartis dans plus de 35 secteurs ou sous-secteurs d'activité économique du SCIAN. Seulement huit de ces 1010 emplois présentaient un potentiel d'exposition au froid. Pour ceux-ci, la cote de risque attribuée pour le stress thermique était négligeable ou tolérable.

Le risque d'un stress thermique dû à la chaleur a été évalué critique ou important pour 257 emplois. Les secteurs de la foresterie et l'exploitation forestière, de la construction, de la première transformation des métaux, des pâtes et papiers, de la plasturgie, des mines, carrières, pétroles et gaz, des services publics, de l'agriculture, l'élevage et la pêche sont ceux où figurent les risques de stress thermique les plus importants. Dans ces secteurs, les emplois visés sont le plus souvent liés à la production, à la manutention et aux travaux de maintenance. De ces 257 emplois, 136 ont été retenus à l'égard du potentiel important d'exposition concomitante aux substances chimiques. Ces emplois et les effectifs de travailleurs qui leur sont associés sont présentés à l'annexe 3. Les effectifs de travailleurs présentés sont ceux associés aux professions CNP en utilisant la codification à quatre chiffres (CNP-4) qui correspondait le plus adéquatement aux titres d'emploi prioritaires identifiés par notre groupe de recherche. Il est important de noter que ces effectifs correspondent à l'ensemble des professions associées à un code CNP-4 et non spécifiquement aux titres d'emploi retenus prioritaires, lesquels ne constituent souvent qu'un sous-ensemble de ces différentes classes de professions, ce qui résulte dans la plupart des cas en une surestimation de l'effectif réel.

La moyenne des cotes attribuées par chacun des experts a été calculée pour ces 136 emplois. Rappelons qu'une cote de risque égale à 1 est associée aux emplois pour lesquels l'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques est jugée très importante. L'ensemble des cotes moyennes calculées se situait entre 2,1 et 7,5 (annexe 3). Le tableau 4 présente les 22 emplois pour lesquels la cote moyenne attribuée par les experts était inférieure à 3, donc les plus susceptibles de placer les travailleurs dans une situation d'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques.

Tableau 4 : Emplois priorités par les experts en fonction de leur risque potentiel découlant d'une exposition concomitante aux substances chimiques et aux contraintes thermiques

Emplois	Cote				n ⁴
	Moyenne	Écart -type	Min	Max	
Couleur d'or ¹	2,1	1,5	1	6	11
Couvreur de toiture ²	2,2	1,1	1	4	13
Couleur ¹	2,3	1,5	1	6	13
Fondeur ¹	2,3	1,6	1	5	13
Aide-forgeur ¹	2,4	1,0	1	5	13
Pompier ³	2,4	1,8	1	7	12
Manœuvre en traitement des métaux ¹	2,5	1,1	1	5	13
Manœuvre dans les fours à cuisson ¹	2,5	1,3	1	5	13
Aide opérateur de four en fusion ¹	2,5	1,3	1	5	13
Manœuvre en fonderie ¹	2,5	1,3	1	5	13
Aide mouleur ¹	2,5	0,9	2	5	13
Mouleur ¹	2,5	1,3	1	6	13
Préposé au four ¹	2,5	1,6	1	6	13
Opérateur de four en céramique ¹	2,6	1,4	1	5	12
Opérateur de four à briques ¹	2,7	1,4	1	5	12
Opérateur de machines à fabriquer le métal ¹	2,7	1,6	1	6	13
Opérateur de fournaise ¹	2,7	1,7	1	6	13
Trempeur d'acier ¹	2,8	1,5	1	6	13
Extruseur ¹	2,8	1,6	1	6	12
Opérateur de four à fusion ¹	2,9	1,6	1	6	13
Opérateur d'une machine à couler sous pression ¹	2,9	1,6	1	6	12
Chaudronnier ¹	2,9	1,5	1	5	12

¹ Secteur de la fabrication de produits minéraux non métalliques / Première transformation des métaux / Fabrication de produits métalliques

² Secteur de la construction

³ Secteur des services publics / Administrations publiques

⁴ Nombre d'experts qui ont attribué une cote

Cette démarche a permis de mettre en évidence que les emplois du secteur de la fabrication des produits minéraux non métalliques / première transformation des métaux / fabrication de produits métalliques (FPF) sont ceux où le risque potentiel est le plus élevé pour les travailleurs simultanément exposés aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Dans ce secteur les couleurs d'or, les couleurs, les fondeurs et les aides-forgeurs viennent en tête de liste en occupant respectivement les positions 1, 3, 4 et 5 alors que les couvreurs de toiture occupent la 2^e position.

5. DISCUSSION

5.1 Bilan de la littérature

Un des objectifs de cette recherche visait à effectuer un bilan de la littérature afin de documenter l'impact d'une exposition à un stress thermique sur l'absorption, la distribution, la biotransformation, l'excrétion et la toxicité des substances chimiques en milieu de travail. En dépit de nombreuses informations théoriques, très peu de données quantitatives ont été publiées sur cette question. Cependant, en intégrant les informations publiées notamment dans les domaines de la pharmacologie et de la toxicologie, il a été possible d'effectuer un bilan des modifications attendues dans la cinétique et la toxicité des substances chimiques à la suite des réponses physiologiques déclenchées lors d'une exposition au froid ou à la chaleur.

L'impact d'une exposition au froid sur la cinétique et la toxicité des substances chimiques serait négligeable. L'exposition au froid peut, en théorie, mener à une augmentation de l'absorption des xénobiotiques par voie pulmonaire en raison de l'élévation de la fréquence respiratoire associée à la demande accrue de production de chaleur (Gordon, 2005). Elle peut aussi entraîner, en théorie, une diminution de leur biotransformation et de leur excrétion (Gordon et coll., 2008). Cependant, ces changements prennent place dans les cas d'hypothermie sévère, ce qui est peu susceptible de se produire en milieu de travail.

En fait, la plupart des études recensées concernaient les effets potentiels d'une exposition à la chaleur sur la cinétique et la toxicité des substances chimiques. De façon globale, il est permis de conclure qu'une exposition à la chaleur conduit à une absorption et une toxicité accrues de la plupart des substances chimiques. Cette toxicité accrue est, dans la plupart des cas, associée à l'augmentation de l'absorption des contaminants par les voies pulmonaire et cutanée, mais elle peut aussi être attribuable à l'augmentation des concentrations ambiantes des substances plus volatiles, souvent associée à une augmentation des températures (OMS, 1981). De plus, considérant que la chaleur entraîne une augmentation significative du débit sanguin cutané, les substances chimiques pour lesquelles les valeurs limites d'exposition sont accompagnées de la notation « percutanée » sont à prioriser à l'égard de cette problématique puisqu'elles sont reconnues comme traversant facilement la peau.

À l'instar de l'activité physique, l'exposition à la chaleur entraîne une augmentation de la ventilation pulmonaire, ce qui est susceptible d'entraîner une hausse de l'absorption pulmonaire des xénobiotiques. En effet, une étude portant sur l'effet de l'activité physique sur la toxicocinétique de cinq solvants a mis en évidence qu'une augmentation de la ventilation pulmonaire entraînait une augmentation de l'absorption des substances les plus solubles dans le sang. Les concentrations biologiques de ces substances pouvaient être augmentées d'un facteur 2 (Tardif et coll., 2008). Ainsi, une exposition à la chaleur suffisamment intense pour déclencher les mécanismes de thermorégulation et entraîner une augmentation de la ventilation pulmonaire pourrait entraîner un accroissement de l'absorption des substances chimiques par cette voie. L'absorption des substances chimiques les plus solubles dans le sang ($P_{\text{sang:air}} > 6$) serait davantage affectée (Csanády et Filser, 2001). L'augmentation de la ventilation pulmonaire est également susceptible d'affecter, à la hausse, le dépôt pulmonaire des contaminants chimiques présents sous la forme de particules (Daigle et coll., 2003; Löndhal et coll., 2007).

L'exposition à la chaleur semble avoir peu d'impact sur la distribution des substances chimiques. Cependant, elle peut retarder leur excrétion ou ralentir la biotransformation des substances fortement extraites par le foie en raison de la diminution des débits sanguins rénal et hépatique qu'elle entraîne (Vanakoski et Seppälä, 1998). Ces deux derniers facteurs peuvent contribuer à l'augmentation des concentrations sanguines (Vanakoski et Seppälä, 1998; Lenz, 2011).

Tel que mentionné précédemment, l'impact global d'une exposition à la chaleur se traduit dans la plupart des cas par une augmentation de la concentration des xénobiotiques dans les fluides biologiques. Cette hausse est associée principalement à une absorption accrue des xénobiotiques mais aussi, de façon moindre, à une élimination ralentie (Vanakoski et Seppälä, 1998). Ainsi, puisque la « dose interne » d'un contaminant est augmentée, plus d'effets sur la santé peuvent être rapportés par les travailleurs (OMS, 1981). L'interaction substances chimiques/chaleur aurait un impact significatif sur la toxicité des contaminants surtout lorsque les niveaux d'exposition se situent près des concentrations admissibles (Freundt, 1990). De façon similaire, le respect de la réglementation sur les contraintes thermiques devrait permettre à la plupart des travailleurs de maintenir leur Tc en dessous des seuils menant à l'activation des mécanismes de thermorégulation (ACGIH, 2009). Il est toutefois bon de noter que certains facteurs associés aux individus (section 4.1.1.1) ou à l'environnement de travail (section 4.1.1.2) peuvent affecter le seuil ou la réponse physiologique des travailleurs. De plus, un individu exposé de façon répétée à la chaleur développera des mécanismes d'adaptation qui le rendront plus résistant aux températures chaudes. L'exposition à certaines substances chimiques peut aussi perturber les mécanismes de thermorégulation, ce qui pourrait diminuer la capacité des travailleurs à s'adapter à un stress thermique (section 4.1.6). L'ensemble de ces facteurs fait en sorte qu'il est parfois difficile de prédire l'impact physiologique d'une co-exposition à la chaleur et aux substances chimiques pour un individu.

La surveillance biologique de l'exposition peut être utilisée afin de mettre en évidence, pour une même concentration ambiante de contaminant, une augmentation de l'absorption en raison de l'exposition simultanée à la chaleur. Puisque les changements observés dans la toxicocinétique des substances chimiques sont habituellement de courte durée et se produisent simultanément aux réponses physiologiques compensatrices induites par une exposition à la chaleur, cette approche sera principalement utile lorsque des indicateurs fiables et variant rapidement dans le temps sont documentés. En effet, pour les xénobiotiques présentant de plus longues demi-vies, tel les métaux, l'impact sur la mesure des indicateurs biologiques ne sera significatif que si l'exposition simultanée à ces deux agresseurs se poursuit dans le temps. Ainsi, une exposition à la chaleur affectera principalement la toxicité aiguë des substances chimiques.

Les données quantitatives disponibles actuellement indiquent que la quantité de contaminant absorbé pourrait être augmentée d'un facteur 2, selon l'intensité de la réponse physiologique associée au stress thermique et les caractéristiques physico-chimiques de la substance (Vanakoski et Seppälä, 1998; Tardif et coll., 2008; Funckes et coll., 1963). L'impact quantitatif de ces changements doit cependant être documenté davantage. Des études quantifiant précisément la contrainte thermique et les réponses physiologiques sont requises afin de mieux prédire les conséquences d'une exposition à la chaleur sur la cinétique et sur la toxicité des substances chimiques de même que sur les données de surveillance biologique. La surveillance environnementale, soit la mesure de la concentration ambiante du contaminant dans l'environnement de travail, ne permet pas de mettre en évidence l'augmentation potentielle de

l'exposition interne des travailleurs. La surveillance biologique constitue donc, dans ces circonstances, l'approche à privilégier. Toutefois, il est important de considérer que la chaleur, au même titre que la charge de travail ou que les caractéristiques anatomiques, physiologiques et biochimiques des individus, n'est qu'un des nombreux facteurs pouvant affecter les données de surveillance biologique.

5.2 Identification des emplois

Le second objectif de cette recherche visait à identifier des emplois où les travailleurs pouvaient être potentiellement exposés de façon concomitante aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Puisque peu de données ont été publiées dans ce domaine, nous avons fait appel à une approche similaire à la méthode Delphi, approche basée sur le jugement d'experts (Cuhls et coll., 2002). Elle repose sur le principe que les prédictions faites par un groupe d'experts sont fiables. Toutefois, bien que la méthode Delphi puisse faire appel à des consultations successives, dans cette étude, le groupe d'experts n'a été consulté qu'une seule fois. En effet, dès la première consultation il a été possible d'identifier clairement des emplois qui étaient plus à risque à l'égard de l'exposition aux contraintes thermiques et aux substances chimiques. Il existe toujours une part de subjectivité dans une approche basée sur le jugement professionnel. Cependant, l'utilisation de matrices de risque dans le cadre de la présente étude a conféré une dimension plus systématique à l'évaluation des paramètres de stress thermique. De plus, les données présentées au tableau 4 montrent qu'il peut exister des écarts importants dans les cotes attribuées par les experts pour un même emploi. Pour cette raison, aucune comparaison fine n'a été effectuée entre les cotes moyennes calculées. Nous avons plutôt fait le choix de présenter comme prioritaires l'ensemble des emplois présentant une cote moyenne inférieure à 3.

Les 22 emplois priorisés sont énumérés au tableau 4. Ils incluent 20 emplois appartenant au secteur de la FPF de même que les couvreurs de toiture et les pompiers. Il est difficile d'estimer l'effectif réel lié aux emplois prioritaires dans le secteur de la FPF car d'autres emplois sont également associés aux mêmes CNP-4. Ainsi, plus de 14 000 travailleurs seraient associés aux professions CNP-4 incluant les titres d'emploi figurant à l'annexe 3, pour ce secteur d'activité. Bien que l'effectif réel de travailleurs exposés simultanément aux contraintes thermiques et aux substances chimiques soit en dessous de ce nombre, il est légitime d'estimer à quelques milliers le nombre de travailleurs québécois œuvrant dans le secteur de la FPF qui seraient concernés. À cela s'ajoutent les 3 000 couvreurs de toitures et poseurs de bardeaux ainsi que les 4 900 pompiers.

Le port d'équipements de protection individuelle peut contribuer à augmenter l'astreinte thermique des travailleurs, mais d'un autre côté, il permet souvent de réduire sinon d'éliminer l'exposition aux substances chimiques. Également, l'impact des épisodes de froid intense et de canicule n'a pas été considéré dans l'évaluation de la contrainte thermique des travailleurs associés aux emplois réalisés à l'extérieur. Ceci constitue une limite à la présente étude puisque plusieurs des 136 emplois figurant dans la liste soumise aux experts sont exécutés à l'extérieur (p.ex. agriculture, foresterie, construction). Ces facteurs interviennent, parfois de façon importante, au niveau du stress thermique. Ainsi, certains travailleurs œuvrant à l'extérieur ou portant des équipements de protection personnelle et ne faisant pas partie des emplois priorisés dans le cadre de cette étude peuvent aussi être à risque. Puisque la priorisation des emplois repose sur une approche théorique, sans observations ni mesures, il se peut que cette priorisation

ait été différente à la suite d'interventions en milieu de travail impliquant des mesures objectives des différentes contraintes affectant les travailleurs. En effet, le port d'équipement de protection individuelle, l'isolement vestimentaire, l'acclimatation ou non des travailleurs, leur état de santé et leur condition physique, les épisodes de froid ou de canicule de même que la vitesse de la circulation de l'air sont des facteurs à prendre en compte dans l'évaluation du stress thermique, lesquels sont tous susceptibles d'influencer la réponse de l'organisme en situation réelle de travail.

Tel que mentionné précédemment, l'exposition à certaines substances chimiques peut affecter les mécanismes de thermorégulation et ainsi diminuer la capacité des travailleurs à s'adapter à la chaleur. Ainsi, les artistes céramistes peuvent être exposés au plomb, les agriculteurs et les épandeurs de pesticides aux organophosphorés et aux carbamates et les travailleurs des 20 emplois prioritaires pour le secteur de la FPF aux fumées d'oxyde de métal, soit des substances pouvant affecter les mécanismes de thermorégulation. Pour des niveaux d'exposition se situant près des concentrations ambiantes admissibles, les travailleurs exposés à ces substances chimiques pourraient s'adapter plus difficilement à la chaleur.

6. CONCLUSION, APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES

Au terme de cette recherche, il appert que l'exposition simultanée au froid et aux substances chimiques est en général associée à une diminution de la toxicité des xénobiotiques. Quant à l'exposition concomitante à la chaleur et aux substances chimiques, elle entraîne une augmentation de l'absorption pulmonaire et cutanée des xénobiotiques, ce qui se traduit par une hausse de la concentration des différents paramètres de surveillance biologique de l'exposition et de la toxicité. L'importance de ces augmentations dépend de l'intensité du stress thermique, des niveaux d'exposition et des caractéristiques physico-chimiques des substances chimiques. Puisque les données recensées dans la littérature correspondent dans plusieurs cas à des situations d'exposition intense aux contraintes thermiques, des modèles toxicocinétiques mériteraient d'être développés et validés pour apprécier le poids de chacun de ces facteurs en tenant compte des conditions de température et d'exposition aux substances chimiques telles que rencontrées en milieu de travail. Des études en milieu de travail pourraient être également menées afin de documenter, en situation réelle, l'influence d'une exposition à la chaleur sur l'absorption et la toxicocinétique des substances chimiques; la surveillance biologique constituant un outil de choix dans l'étude de cette problématique.

Sur la base des résultats obtenus dans le cadre de la présente étude, les emplois et les travailleurs les plus concernés au Québec par cette problématique seraient ceux du secteur de la fabrication des produits minéraux non métalliques/première transformation des métaux/fabrication de produits métalliques, les couvreurs de toiture ainsi que les pompiers. Ces secteurs devraient d'ailleurs être priorisés dans le cadre de recherches ultérieures visant à mieux caractériser le risque.

Ce bilan devrait permettre de guider les intervenants en santé au travail dans leurs démarches d'évaluation du risque lors de situations d'exposition simultanée aux contraintes thermiques et aux substances chimiques, notamment en ayant permis de cibler certains emplois plus à risque.

BIBLIOGRAPHIE

- ACGIH[®], Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, Cincinnati, Ohio, 2012.
- ACGIH, Documentation of Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices, Cincinnati, Ohio, 2009.
- Ainsworth BE, Haskell WL, Herrmann SD, Meckes N, Bassett Jr DR, Tudor-Locke C, Greer JL, Vezina J, Whitt-Glover MC, Leon AS. The Compendium of Physical Activities Tracking Guide. Healthy Lifestyles Research Center, College of Nursing & Health Innovation, Arizona State University. Site WEB: <http://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/> consulté en juillet 2011.
- Albert, C., Proulx, R. et Richard, P. Chaleur accablante et usage de médicaments. Étude exploratoire en Estrie. Bulletin d'information en santé environnementale (BISE) 17 (3), mai-juin 2006.
- Attia, M., Osman, OS, Abusalma, OY. et Onsa, SH. Occupational lead poisoning and heat stress. Sudan ed. J. 22, supplément, résumé n^o 27, 1988.
- Ballard, BE. Pharmacokinetics and temperature. J. Pharmaceutical Sci. 63(9): 1345-1358, 1974.
- Bennett, W.D., Mesina, M.S., Smaldone, G.C. Effect of exercise on deposition and subsequent retention of inhaled particles. J. Appl. Physiol. 59(4): 1046-1054, 1985.
- Boeniger, MF., Lowry, LK., Rosenberg, J. Interpretation of urine results used to assess chemical exposure with emphasis on creatinine adjustments : a review. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 54: 615-627, 1993.
- Cabanac, M., White, MD. Core temperature thresholds for hyperpnea during passive hyperthermia in humans. Eur. J. Appl. Physiol. 71 : 71-76, 1995.
- Commission de la construction du Québec (CCQ). Métiers, occupations et perspectives d'emploi, 2011. Site WEB: www.ccq.org/H_Metiers.aspx?sc_lang=fr-CA&profil=GrandPublic consulté en juin 2011.
- Csanády, G.A., Filser, J.G. The relevance of physical activity for the kinetics of inhaled gaseous substances. Arch. Toxicol. 74: 663-672, 2001.
- Cuhls, K., Blind, K., Grupp, H. *Innovations for our future: Delphi'98: new foresight on science and technology*. Vol. 13. Physica Verlag, 2002.
- Daigle, C.C., Chalupa, D.C., Gibb, F.R., Morrow, P.E., Oberdörster, G., Utell, M.J., Frampton, M.W. Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise. Inhal. Toxicol. 15: 539-552, 2003.

- Dorevitch, S. Babin, A. Health hazards of ceramic artists. *Occup. Med.* 16(4): 563-575, 2001.
- Fine, JM., Gordon, T., Chen, LC., Kinney, P., Falcone, G., Beckett, WS. Metal fume fever : characterization of clinical and plasma IL-6 responses in controlled human exposures to zinc oxide fume at and below the threshold limit value. *J. Occup. Med.* 39: 722-726, 1997.
- Freundt, K.J. Exposition combinée aux produits chimiques et à la chaleur. *Cahiers de notes documentaires* 140, 3^e trimestre :671-678, 1990.
- Fujii, N., Honda, Y., Hayashi, K., Soya, H., Kondo, N., Nishiyasu, T. Comparison of hyperthermic hyperpnea elicited during rest and submaximal moderate-intensity exercise. *J. Appl. Physiol.* 104 : 998-1005, 2008.
- Funckes, AJ., Hayes, GR., Jr., Hartwell, WV. Urinary excretion of paranitrophenol by volunteers following dermal exposure to parathion at different ambient temperatures. *J. Agric. Food Chem.* 11: 455-457, 1963.
- Ganem, Y., Meyer, JP., Luzeaux, N., Brasseur, G., Laborde, L., Pomian, JL. Ambiances thermiques: travail en période de fortes chaleurs. *Documents pour le médecin du travail* 97: 51-68, 1^{er} trimestre 2004.
- Ganem, Y., Pomian, JL., Laborde, L., Brasseur, G. Ambiances thermiques: travailler au froid. *Documents pour le médecin du travail* 107: 279-295, 3^{ième} trimestre 2006.
- Gordon, CJ. *Temperature and toxicology. An integrative, comparative, and environmental approach.* Taylor and Francis, Boca Raton, Floride, 2005, 338p.
- Gordon, CJ., Mack, CM., Rowsey, PJ. Temperature regulation in experimental mammals and humans exposed to organophosphate and carbamate agents. In *Toxicology of Organophosphate and Carbamate Compounds*, Gupta R (ed.). Academic Press: New York; 549-566, 2005.
- Gordon, CJ., Spencer, PJ., Hotchkiss, J., Miller, DB., Hinderliter, PM, Pauluhn, J. Thermoregulation and its influence on toxicity assessment. *Toxicol.* 244: 87-97, 2008.
- Haldane, JS. The influence of high air temperatures. *J. Hyg.* 55: 497-513, 1905.
- Hohnadel, DC., Sunderman, FW., Jr., Nechay, MW, McNeely, MD. Atomic absorption spectrometry of nickel, copper, zinc, and lead in sweat collected from healthy subjects during sauna bathing. *Clin. Chem.* 19: 1288-1292, 1973.
- ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. International Commission on Radiological Protection. Oxford : Elsevier Science, 1995.
- Ingram, DL., Mount, LE. *Man and animals in hot environments.* New York, Springer-Verlag, 1975.

INRS. Institut national de recherche et de sécurité. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984, Aide-mémoire technique. 2008.

Japke Claessens, AM. Human Thermoregulation. Individual differences in cold induced thermogenesis. Thesis performed at the Nutrition and Toxicology research institute Maastricht, Netherlands, 2008.

Johnson, JM. Exercise in a hot environment : the skin circulation. Scand. J. Med. Sci. Sports 20 (suppl. 3): 29-39, 2010.

Johnson Rowsey, P., Metzger, BL., Carlson, J., Gordon, CJ. Effect of exercise conditioning on thermoregulatory responses to repeated administration of chlorpyrifos. Environ. Res. 92: 27-34, 2003.

Katsouyanni, K., Pantazopoulou, A., Touloumi, G., Tselepidaki, I., Moustris, K., Asimakopulos, D., Pouloupoulou, G., Trichopoulos, D. Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality. Arch. Environ. Health 48: 235-242, 1993

Kenefick, R.W. et Sawka, M.N. Hydratation at the work site. Journal of the American College of Nutrition. 26(5): 597-603, 2007.

Kuntz, WD., McCord, CP. Polymer – fume fever. J. Occup. Med. 16: 480-482, 1974.

Lagerkvist, B., Linderholm, H., Nordberg, GF. Vasospastic tendency and Raynaud's phenomenon in smelter workers exposed to arsenic. Environ. Res. 39: 465-474, 1986.

Lagerkvist, B., Linderholm, H., Nordberg, GF. Arsenic and Raynaud's phenomenon. Arch. Occup. Environ. Health 60: 361-364, 1988.

Lenz, TL. The effects of high physical activity on pharmacokinetic drug interactions. Expert Opinion on Drug Metabolism & Toxicology 7: 257-266, 2011.

Leon, LR. Thermoregulatory responses to environmental toxicants : The interaction of thermal stress and toxicant exposure. Toxicol. Appl. Pharmacol. 233: 146-161, 2008.

Leon, LR., Gordon, CJ. Thermal stress. Encyclopedia of environmental health, JO. Nriagu ed., Elsevier, 2011.

Löndahl, J., Massling, A., Pagels, J., Swietlicki, E., Vaclavik, E., Loft, S. Size-resolved respiratory-tract deposition of fine and ultrafine hydrophobic and hygroscopic aerosol particles during rest and exercise. Inhal. Toxicol. 19: 109-116, 2007.

Mairiaux, Ph., Malchaire, J. Chapitre II. Régulation physiologique de l'équilibre thermique, dans *Le travail en ambiance chaude*, Masson, Paris, 1990, p. 23-45.

Malchaire J. Travail à la chaleur. Encyclopédie médico-chirurgicale, 16-782-A-10, Paris, Elsevier, 2004.

Mautz, WJ. Exercising animal models in inhalation toxicology: Interaction with ozone and formaldehyde. Environ. Res. 92: 14-26, 2003.

Melius, J. Occupational health for firefighters. Occup. Med. 16(1): 101-108, 2001.

Miller, V.S. et Bates, G.P. Hydratation, hydratation, hydratation. Ann. Occup. Hyg. 54(2): 134-136, 2009.

Mulhausen, J., Damiano, J., Pullen, E.L. Chap. 6 Further information gathering. In: *A strategy for assessing and managing occupational exposures*. Third edition, AIHA, 2006.

Naitoh, K., Inai, Y., Hirabayashi, T., Tsuda, T. Exhalation behavior of four organic substrates and water absorbed by human skin. Biol. Pharm. Bull. 25: 867-871, 2002.

NIOSH. National Institute for Occupational Safety and Health. National Occupational Exposure Survey Conducted from 1981 to 1983 (NOES). Potential Exposure to Agents by Occupation. 1990. Site WEB: www.cdc.gov/noes/noes2/occs0000.html consulté en juillet 2011.

OMS. Organisation Mondiale de la Santé. Health factors involved in working under conditions of heat stress, Genève, OMS, Séries de Rapports Techniques 412. 1969.

OMS. Organisation Mondiale de la Santé. Effet sur la santé de l'exposition professionnelle à des agressions multiples, Genève, OMS, Séries de Rapports Techniques 662. 1981.

Ostiguy C., Fournier M., Petitjean-Roget T., Lesage J. et Lajoie A. Résultats des analyses de substances chimiques produites à l'IRSST pour la période 2001-2005. IRSST. Études et recherches, Rapport R-485, 2007a.

Ostiguy C., Fournier M., Petitjean-Roget T., Lesage J. et Lajoie A. Résultats des analyses de substances chimiques produites à l'IRSST en 2005. IRSST Études et recherches Rapport B-075, 2007b.

Pandolf, KB. Aging and heat tolerance at rest or during work. Exp. Aging Res. 17(3): 189-204, 1991.

Qian Z, He Q, Lin HM, Kong L, Zhou D, Liang S, Zhu Z, Liao D, Liu W, Bentley CM, Dan J, Wang B, Yang N, Xu S, Gong J, Wei H, Sun H, Qin Z. Part 2. Association of daily mortality with ambient air pollution, and effect modification by extremely high temperature in Wuhan, China. Res. Rep. Health Eff. Inst. 154: 91-217, 2010.

Ramphal, L. Heat stress in the workplace. Proceedings (Baylor University. Medical Center). 13(4): 349, 2000.

Rainham, DG, Smoyer-Tomic, KE. The role of air pollution in the relationship between a heat stress index and human mortality in Toronto. *Environ. Res.* 93: 9-19, 2003.

Ren C, O'Neill MS, Park SK, Sparrow D, Vokonas P, Schwartz J. Ambient temperature, air pollution, and heart rate variability in an aging population. *Am. J. Epidemiol.* 173(9): 1013-21, 2011.

Ressources humaines et développement des compétences Canada (RHDC). Classification nationale des professions 2006. Site WEB:
www5.hrsdc.gc.ca/NOC/Francais/CNP/2006/Bienvenue.aspx. Site consulté en juin 2011.

Riviere, JE., Williams, PL. On pharmacokinetic implication of changing blood in the skin. *J. Pharm. Sci.* 81: 601-602, 1992.

Rodahl, K. Occupational health conditions in extreme environments. *Ann. Occup. Hyg.* 47(3): 241-252, 2003.

Rowell, LB. *Human circulation regulation during physical stress*. Oxford University Press, Oxford, 1986.

RSST. Règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail. Décret 1120-2006. Éditeur officiel du Québec, 2007.

Schlaeffer, F., Engelberg, I., Kaplanski, J. Effect of exercise and environmental heat on theophylline kinetics. *Respiration* 45: 438-442, 1984.

Schreiber L., Charbonneau JP., Deshaies P., Dessureault PC. Chapitre 11 : Contraintes et confort thermiques, dans *Manuel d'hygiène du travail : du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque*, Roberge, B., Deadman, J.É., Legris, M., Ménard, L., Baril, M. (éds), Mont-Royal, Modulo-Griffon, 2004, p. 185-209.

Semenza, J., Rubin, C., Falter, K. Heat related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England J. Med.* 335(2): 84-90, 1996.

Sidhu, P., Peng, HT., Cheung, B., Edginton, A. Simulation of differential drug pharmacokinetics under heat and exercise stress using a physiologically based pharmacokinetic modeling approach. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 89: 365-382, 2011.

Slevinski, R. Chapter 29. Hypothermia and hyperthermia, dans *Primary care geriatrics*, 5^{ième} édition, Elsevier, New York, 2007, p385-390.

Statistique Canada. Le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) 2007. SiteWEB: www.statcan.gc.ca/subjects-sujets/standard-norme/naics-scian/2007/list-liste-fra.htm consulté en juin 2011.

Stocks, JM., Taylor, NAS., Tipton, MJ., Greenleaf, JE. Human physiological responses to cold exposure. *Aviation, Space, and Environ. Med.* 75(5): 444-457, 2004.

Swartz, RD., Sidell, FR., Cucinell, SA. Effects of physical stress on the disposition of drugs eliminated by the liver in man. *J. Pharmacol. Exp. Ther.* 188(1): 1-7, 1974.

Tardif, R., Charest-Tardif, G., Truchon, G., Brochu, M. Influence de la charge de travail sur les indicateurs biologiques d'exposition de cinq solvants. *Études et recherches, Rapport R-561, IRSST, 2008.*

<http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-561.pdf>

Truchon, G., Tardif, R., Lavoué, J., Drolet, D., Lévesque, M., Boucher, J. Guide de surveillance biologique de l'exposition. Stratégie de prélèvement et interprétation des résultats. *Études et recherches, Guide technique T-03, 7^{ième} édition, Montréal, IRSST, 2012*

Vanakoski, J., Seppälä, T. Heat exposure and drugs. A review of the effects of hyperthermia on pharmacokinetics. *Clin. Pharmacokinet.* 34(4): 311-322, 1998.

Vyskocil, A., Viau, C., Tardif, R., Bégin, D., Gérin, M., Gagnon, F., Drolet, D., Lemay, F., Truchon, G., Baril, M., Lapointe, G. et Gagnon, N. Impact des interactions toxicologiques sur la gestion des situations d'exposition à des contaminants multiples. *Études et recherches, Rapport R-425, Montréal, IRSST, 2005.*

Walker, SM., Ackland, TR., Dawson, B. The combined effect of heat and carbon monoxide on the performance of motorsport athletes. *Comp. Biochem. Physiol. Part A* 128: 709-718, 2001.

Wei, Z., Lei, Y., Hansen, H., Guogao, Z. A study of combined effects of occupational hazards. The experimental research on combined effects of high temperature and carbon monoxide. *Sudan Med. J. supplement, résumé n° 119, 1988.*

Wester, RC., Quan, D., Maibach, HI. In vitro percutaneous absorption of model compounds glyphosate and malathion from cotton fabric into and through human skin. *Food. Chem. Toxicol.* 34: 731-735, 1996.

Wilkinson, SP., McHugh, P., Horsely, S., Tubbs, H., Lewis, M., Thould, A., Winterton, M., Parson, V., Williams, R. Arsine toxicity aboard the Asiafreighter. *Br. Med. J.* 3: 559-563, 1975.

Williams, N., Atkinson, W., Patchefsky, AS. Polymer-fume fever: not so benign. *J. Occup. Med.* 16: 519-522, 1974.

ANNEXE 1 : EXEMPLE DE COTATION DU RISQUE THERMIQUE

SECTEUR D'ACTIVITÉ (SCIAN) 111-112-114: AGRICULTURE, ÉLEVAGE ET PÊCHE							
EMPLOIS	TEMPÉRATURE	HUMIDITÉ	RAYONNEMENT	CHARGE DE TRAVAIL	PROBABILITÉ	SÉVÉRITÉ	COTE DE RISQUE
Apiculteur	normale	normale	normal	légère	moyenne	faible	négligeable
Aide agricole (ouvrier non spécialisé)	élevée	élevée	chaud	lourde	très élevée	très élevée	critique
Aquaculteur	normale	élevée	normal	moyenne	faible	faible	négligeable
Arboriculteur (milieu urbain)	élevée	élevée	chaud	moyenne	élevée	moyenne	important
Aide en acériculture	basse	élevée	froid	lourde	moyenne	moyenne	tolérable
Ouvrier spécialisé en production acéricole	basse	élevée	froid	lourde	moyenne	moyenne	tolérable
Aide en aquaculture	normale	élevée	normal	lourde	moyenne	faible	négligeable
Ouvrier spécialisé en production céréalière et fourragère	élevée	élevée	très chaud	très lourde	très élevée	très élevée	critique
Ouvrier spécialisé en production de bovins	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Aide en production bovine	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Ouvrier spécialisé en production horticole	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Ouvrier spécialisé en production laitière	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Aide en production laitière	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Ouvrier spécialisé en production piscicole	normale	élevée	normal	moyenne	moyenne	faible	négligeable
Ouvrier spécialisé en production porcine	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Aide en production porcine	élevée	élevée	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Ouvrier en production avicole	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	moyenne	tolérable
Aide en production avicole	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	moyenne	tolérable
Ouvrier en production ovine	élevée	élevée	très chaud	lourde	très élevée	très élevée	critique
Aide en production ovine	élevée	élevée	très chaud	lourde	très élevée	très élevée	critique
Aide en sericulture	élevée	élevée	chaud	lourde	très élevée	moyenne	important
Agriculteur	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Cultivateur	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Ouvrier de vignoble	élevée	normale	chaud	lourde	élevée	élevée	important
Technicien en mariculture	normale	normale	chaud	lourde	moyenne	élevée	important

ANNEXE 2 : EXEMPLE D'APPRÉCIATION DE L'EXPOSITION CONCOMITANTE AUX SUBSTANCES CHIMIQUES ET AUX CONTRAINTES THERMIQUES À L'AIDE DE COTES DE PRIORITÉ

SECTEUR D'ACTIVITÉS (SCIAN)	GROUPE D'EMPLOI LES PLUS À RISQUE AU STRESS THERMIQUE	PRÉSENCE DE SUBSTANCES CHIMIQUES								COTE DE PRIORITÉ ²
		SOLVANTS	POUSSIÈRES	PESTICIDES	HPA ¹	GAZ	MÉTAUX LOURDS	AMIANTE/ SILICE	RÉACTIFS/ AUTRES SUBSTANCES	
AGRICULTURE, ÉLEVAGE ET PÊCHE	Aide agricole (ouvrier non spécialisé)	✓	✓	✓	✓	✓			✓	1
	Arboriculteur (milieu urbain)			✓			✓			5
	Ouvrier spécialisé en production céréalière et fourragère	✓	✓	✓	✓	✓			✓	1
	Ouvrier spécialisé en production de bovins		✓	✓					✓	5
	Aide en production bovine		✓	✓					✓	5
	Ouvrier spécialisé en production horticole		✓	✓			✓		✓	4
	Ouvrier spécialisé en production laitière	✓							✓	2
	Aide en production laitière	✓							✓	2
	Ouvrier spécialisé en production porcine					✓				3
	Aide en production porcine			✓		✓				3
	Ouvrier en production ovine		✓	✓						1
	Aide en production ovine		✓	✓						1
	Aide en sericulture			✓			✓		✓	3
	Agriculteur	✓	✓	✓	✓	✓			✓	1
	Cultivateur	✓	✓	✓	✓	✓			✓	1
	Ouvrier de vignoble		✓	✓						3
	Technicien en mariculture								✓	4

¹HPA : Hydrocarbures polycycliques aromatiques

² Cote 1 : plus important - cote 5 : moins important

ANNEXE 3 : PRIORISATION DES EMPLOIS EN FONCTION DE LEUR RISQUE POTENTIEL DECOULANT D'UNE EXPOSITION CONCOMITANTE AUX SUBSTANCES CHIMIQUES ET AUX CONTRAINTES THERMIQUES

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
1	Agriculture, foresterie, pêche et chasse (à l'exception des activités de soutien)	Ouvriers agricoles (nb=12 780)	Aide agricole (ouvrier non spécialisé)	5,0	2,7	1	10	9	13
2			Ouvrier en production ovine	4,6	1,9	1	8	7	13
3			Aide en production ovine	4,4	1,9	1	8	7	13
4			Ouvrier spécialisé en production céréalière et fourragère	4,9	2,2	1	10	9	13
5			Ouvrier spécialisé en production laitière	5,2	2,0	1	8	7	13
6			Aide en production laitière	5,1	2,0	1	8	7	13
7		Exploitants agricoles et gestionnaires d'exploitation agricole (nb=15 861)	Agriculteur	5,9	2,3	1	10	9	13
8			Cultivateur	5,9	2,3	1	10	9	13
9	Fabrication d'aliments, de boissons et de produits du tabac	Manutentionnaires (nb=1 927)	Journalier (réception des marchandises)	7,0	2,2	1	10	9	13
10		Manœuvres à la transformation des aliments, des boissons et du tabac (nb=14 300)	Manœuvre en transformation des aliments	7,3	1,9	3	10	7	13
11	Construction	Aides de soutien des métiers et manœuvres en construction (nb=15 135)	Journalier (chantier)	4,9	1,6	2	8	6	13
12			Manœuvre de chantier de génie civil (journalier)	4,7	1,7	2	8	6	13
13		Couvreurs et poseurs de bardeaux (nb=3 007)	Couvreur de toitures	2,2	1,1	1	4	3	13
14		Conducteurs d'équipement lourd (sauf les grues) (nb=5 687)	Opérateur d'équipements lourds (excavatrice, niveleuse, pelle mécanique, etc)	5,9	2,2	2	9	7	13
15		Briqueteurs-maçons (nb=2 900)	Briqueteur-maçon	4,6	2,3	1	10	9	13
16		Finisseurs de béton (nb=1 250)	Cimentier-applicateur	4,4	1,7	1	7	6	13

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
17		Monteurs de charpentes métalliques (nb=805)	Poseur d'armatures de béton	5,1	2,2	2	8	6	13
18		Chaudronniers (nb=180)	Chaudronnier (assemblage de grues, réservoirs, chaudières pour chantiers)	3,7	2,2	2	8	6	13
19	Réparation et entretien	Manutentionnaires (nb=89)	Manutentionnaire (entrepôt, cour, etc.)	6,8	1,9	2	9	7	13
20		Débrosseurs et réparateurs de carrosserie (nb=4 496)	Réparateur de carrosserie-carrossier	5,7	1,4	4	8	4	13
21			Aide carrossier	5,6	1,6	3	8	5	13
22			Polisseur-ponceur de véhicules	5,6	1,8	3	9	6	13
23	Fabrication de machines	Opérateurs de machines à travailler les métaux légers et lourds (nb=75)	Opérateur de machines à travailler les métaux	5,3	1,7	3	8	5	13
24			Opérateur de machines industrielles	5,5	1,7	2	8	6	13
25		Autres manœuvres des services de transformation, de fabrication et d'utilité publique (nb=328)	Journalier-aide opérateur	5,3	1,6	2	7	5	12
26		Manutentionnaires (nb=323)	Manutentionnaire (entrepôt)	6,6	2,1	2	10	8	13
27		Ajusteurs de machines (nb=478)	Ajusteur de machines	5,8	1,8	2	9	7	12
28		Foresterie et exploitation forestière et Activités de soutien à la foresterie	Manœuvres de l'exploitation forestière (nb=1 145)	Débroussailleur(euse)	4,4	1,8	2	8	6
29	Manœuvre en exploitation forestière			4,6	2,1	2	8	6	13
30	Planteur saisonnier d'arbres			4,9	2,5	2	10	8	13
31	Ouvriers en sylviculture et en exploitation forestière (nb=2 466)		Ouvrier(ère) en aménagement forestier	5,0	1,9	2	8	6	13
32			Ouvrier(ère) sylvicole	5,2	1,8	3	8	5	13
33			Reboiseur(euse)	4,9	2,0	2	8	6	13
34	Conducteurs de machines d'abattage (nb=1 547)		Débardeur(euse) forestier	4,9	2,0	2	8	6	13
35	Conducteurs de scies à chaîne et d'engins de débardage (nb=1 406)		Abatteur(euse) forestier	4,3	1,9	2	8	6	13

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
36		Mécaniciens de chantier et mécaniciens industriels (sauf l'industrie du textile) (nb=347)	Mécanicien(e) d'engins de chantier	5,2	1,6	2	7	5	13
37		Manœuvres dans le traitement des pâtes et papiers et la transformation du bois (nb=66)	Manœuvre de scierie	4,9	1,9	2	8	6	13
38	Fabrication de matériel de transport	Opérateurs de machines à travailler les métaux légers et lourds (nb=236)	Opérateur de machines à travailler les métaux	5,4	1,9	2	8	6	13
39		Opérateurs de machines de traitement des matières plastiques (nb=118)	Opérateur de machines à travailler les plastiques (pièces de véhicules)	4,9	1,5	3	8	5	13
40		Autres manœuvres des services de transformation, de fabrication et d'utilité publique (nb=393)	Journalier à la production	5,9	1,3	4	8	4	12
41		Manutentionnaires (nb=505)	Manutentionnaire (magasin-entrepôt)	7,5	2,4	2	10	8	13
42	Fabrication de meubles et de produits connexes	Manutentionnaires (nb=2 239)	Manutentionnaire (entrepôt, cour, etc)	6,5	1,9	2	9	7	13
43		Autres manœuvres des services de transformation, de fabrication et d'utilité publique (nb=4 131)	Manœuvre en atelier de fabrication de produits en bois	5,9	1,7	3	8	5	13
44	Extraction minière, exploitation en carrière, et extraction de pétrole et de gaz	Mineurs d'extraction et de préparation, mines souterraines (nb=1 609)	Mineur d'extraction	3,9	1,9	1	7	6	12
45			Mineur des mines souterraines	4,0	2,0	1	7	6	12
46		Opérateurs de machines dans le traitement des métaux et des minerais (nb=244)	Opérateur de machines de traitement des minerais	4,4	2,2	1	7	6	12
47		Manœuvres des mines (nb=346)	Fendeur de roches	4,4	2,3	1	8	7	12
48		Foreurs et personnel de mise à l'essai et des autres services relatifs à l'extraction de pétrole et de gaz (nb=226)	Opérateur en forage directionnelle	4,7	2,0	2	7	5	13
49		Mécaniciens de chantier et mécaniciens industriels (sauf l'industrie du textile) (nb=489)	Mécanicien de chantier	5,2	1,7	3	7	4	13

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
50		Manutentionnaires (nb=180)	Manutentionnaire (entrepôt, cour, etc.)	6,1	2,2	2	9	7	13
51	Fabrication du papier	Opérateurs au contrôle de la fabrication du papier et du couchage (nb=811)	Opérateur(trice) d'unité de production de pâtes et papiers	4,0	1,73=	2	8	6	13
52		Opérateurs au contrôle de la réduction en pâte des pâtes et papiers (nb=246)	Opérateur(trice) de blanchisseuse à papier	3,5	1,7	2	8	6	12
53			Préparateur(trice) de pâte à papier	3,9	1,8	2	8	6	13
54		Manœuvres dans le traitement des pâtes et papiers et la transformation du bois (nb=4 372)	Manœuvre (journalier)	3,5	1,1	2	5	3	13
55		Opérateurs de machines dans les usines de pâte à papier (nb=973)	Conducteur(trice) de désencreuse	3,6	0,7	3	5	2	11
56			Opérateur(trice) aux produits chimiques	3,5	0,9	3	6	3	11
57			Opérateur en désencrage	3,6	0,9	2	5	3	11
58		Manutentionnaires (nb=926)	Manutentionnaire en pâtes et papiers (fabrication)	4,6	1,3	3	7	4	13
59			Manutentionnaire d'entrepôt	5,5	2,2	2	9	7	13
60			Débardeur	5,3	2,0	2	8	6	13
61	Fabrication de produits en plastique et en caoutchouc	Opérateurs de machines de traitement des matières plastiques (nb=2 829)	Opérateur de machinerie	5,0	1,2	3	7	4	12
62			Opérateur de pulvérisateur	4,5	1,2	3	7	4	12
63			Opérateur de calendre	4,7	1,4	2	7	5	13
64			Opérateur machine extrudeuse	4,4	1,5	2	7	5	13
65			Opérateur machine à mouler	4,2	1,6	2	7	5	13
66		Manœuvres dans la fabrication des produits en caoutchouc et en plastique (nb=4 965)	Aide opérateur	4,6	1,7	2	7	5	13
67		Assembleurs, finisseurs et contrôleurs de produits en plastique (nb=2 610)	Finisseur-contrôleur	5,1	1,6	2	8	6	12

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
68		Surveillants dans la fabrication de produits en caoutchouc et en plastique (nb=1 743)	Chef d'équipe	6,0	1,6	3	8	5	13
69		Mécaniciens de chantier et mécaniciens industriels (sauf l'industrie du textile) (nb=689)	Mécanicien industriel	5,0	1,6	3	8	5	13
70		Expéditeurs et réceptionnaires (nb=771)	Préposé à l'entrepôt	6,7	1,9	2	9	7	13
71	Fabrication de produits minéraux non métalliques / Première transformation des métaux / Fabrication de produits métalliques	Chaudronniers (nb=248)	Chaudronnier	2,9	1,5	1	5	4	12
72		Mouleurs, noyauteurs et fondeurs de métaux dans les aciéries (nb=1 489)	Fondeur	2,3	1,6	1	5	4	13
73			Couleur	2,3	1,5	1	6	5	13
74			Couleur d'or	2,1	1,5	1	6	5	11
75			Préposé au four	2,5	1,6	1	6	5	13
76			Opérateur de fournaise	2,7	1,7	1	6	5	13
77			Opérateur d'une machine à couler sous pression	2,9	1,6	1	6	5	12
78			Mouleur	2,5	1,3	1	6	5	13
79		Opérateurs de machines dans le traitement des métaux et des minerais (nb=3 010)	Opérateur d'un four à fusion	2,9	1,6	1	6	5	13
80			Opérateur de machines à fabriquer le métal	2,7	1,6	1	6	5	13
81			Trempeur d'acier	2,8	1,5	1	6	5	13
82			Extruseur	2,8	1,6	1	6	5	12
83		Manœuvres dans le traitement des métaux et des minerais (nb=3 862)	Manœuvre en fonderie	2,5	1,3	1	5	4	13
84			Aide opérateur de four à fusion	2,5	1,3	1	5	4	13
85			Manœuvre dans les fours à cuisson	2,5	1,3	1	5	4	13
86		Manœuvres en métallurgie (nb=2 237)	Aide forgeur	2,4	1,0	1	5	4	13

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
87			Manœuvre en traitement des métaux	2,5	1,1	1	5	4	13
88			Aide mouleur	2,5	0,9	2	5	3	13
89		Manutentionnaires (nb=2 070)	Manutentionnaire en entrepôt	5,2	2,2	2	8	6	13
90		Opérateurs de machines dans le façonnage et la finition des produits en béton, en argile ou en pierre (nb=1 341)	Opérateur de four à briques	2,7	1,4	1	5	4	12
91			Opérateur de four à céramique	2,6	1,4	1	5	4	12
92			Opérateur de machines à fabriquer le ciment	3,0	1,0	2	5	3	12
93			Ouvrier en fabrication du béton	3,0	1,3	2	6	4	12
94	Fabrication de produits du pétrole et du charbon / de produits chimiques		Chaudronniers (nb=76)	Chaudronnier	3,2	1,3	1	5	4
95		Manutentionnaires (nb=694)	Manutentionnaire	4,2	1,7	2	7	5	11
96		Manœuvres dans le traitement des produits chimiques et les services d'utilité publique (nb=1 251)	Journalier (entretien)	4,0	1,1	2	5	3	11
97			Journalier (manœuvre) à la production	4,4	1,4	2	6	4	11
98		Opérateurs d'installation de traitement des produits chimiques (nb=4 311)	Préparateur de matières chimiques	4,1	1,3	3	7	4	11
99			Opérateur machine à traitement produits chimiques	4,4	1,4	3	7	4	11
100			Opérateur de tour de distillation	4,3	2,1	1	8	7	11
101	Services publics / Administrations publiques	Ouvriers en sylviculture et en exploitation forestière (nb=199)	Émondeur	5,5	2,4	2	10	8	13
102		Pompiers (nb=4 903)	Pompier	2,4	1,8	1	7	6	12
103		Manœuvres en aménagement paysager et en entretien des terrains (nb=1 064)	Préposé à l'entretien des terrains	5,1	1,7	3	8	5	13
104		Manœuvres à l'entretien des travaux publics (nb=8 507)	Préposé aux parcs (entretien)	5,8	1,6	3	8	5	13

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²	
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue		
105			Journalier (entretien et travaux publics)	5,5	2,0	3	9	6	13	
106			Préposé à la voirie (réfection-entretien des rues)	4,2	1,9	2	8	6	13	
107		Conducteurs d'équipement lourd (sauf les grues) (nb=1 306)	Opérateur de pelles mécaniques	6,2	2,3	2	10	8	13	
108		Techniciens et spécialistes de l'aménagement paysager et de l'horticulture (nb=786)	Jardinier/paysagiste	4,8	1,6	3	8	5	13	
109		Monteurs de lignes électriques et de câbles (nb=2 200)	Monteur de lignes de distribution	6,1	2,4	2	10	8	13	
110			Monteur de lignes de transport	6,1	2,4	2	10	8	13	
111			Dépanneur (lignes)	6,3	2,6	2	10	8	13	
112		Conducteurs de machinerie d'entretien public (nb=344)	Chauffeur d'équipements motorisés (entretien et travaux publics)	6,3	2,1	2	10	8	13	
113		Manutentionnaires (nb=269)	Manutentionnaire (entrepôt municipal)	6,7	2,1	2	9	7	13	
114		Usines de textiles et de produits textiles / en cuir et de produits analogues	Teinturiers et finisseurs de produits textiles (nb=1 122)	Blanchisseur	3,8	1,5	1	6	5	13
115				Calandreur de textiles	4,3	1,6	2	8	6	12
116			Opérateurs de machines de préparation de fibres textiles et de filés (nb=1 225)	Opérateur de machines de préparation des fibres textiles	4,2	1,6	2	7	5	12
117			Ouvriers spécialisés dans le traitement du cuir et des peaux (n=47)	Ouvrier en fabrication de vêtements de cuir	4,8	2,1	1	8	7	12
118	Manutentionnaires (nb=807)		Manutentionnaire d'entrepôt	7,0	2,6	2	10	8	12	
119	Transport et entreposage	Manutentionnaires (nb=4 930)	Manutentionnaire de marchandises	6,9	2,2	2	10	8	13	
120			Préposé à l'entreposage	7,2	2,3	2	10	8	13	
121		Matelots de salle des machines du transport par voies navigables (nb=40)	Matelot de la salle des machines	4,3	3,0	1	10	9	13	
122	Hébergement et services de restauration	Cuisiniers (nb=37 934)	Cuisinier	4,9	1,9	3	8	5	13	

#	Description SCIAN	Description CNP-4 ¹	Emplois prioritaires	Cote de priorité					n ²
				Moyenne	Écart-type	Min	Max	Étendue	
123			Aide-cuisinier	5,0	2,0	3	8	5	13
124		Serveurs au comptoir, aides de cuisine et personnel assimilé (nb=44 498)	Laveur de vaisselle (plongeur)	5,2	2,5	2	10	8	13
125	Soins de santé et assistance sociale	Cuisiniers (nb=7 952)	Cuisinier	5,3	1,8	3	8	5	13
126			Aide-cuisinier	5,4	1,9	3	8	5	13
127		Serveurs au comptoir, aides de cuisine et personnel assimilé (nb=8 553)	Laveur de vaisselle (plongeur)	5,9	2,7	2	10	8	13
128	Magasins d'alimentation	Boulangers-pâtisseries (nb=3 200)	Boulangier	4,5	1,7	2	8	6	13
129			Pâtissier	4,9	1,5	3	8	5	13
130	Ensemble des SCIAN	Personnel de blanchisseries et d'établissements de nettoyage à sec (nb=4 246)	Presseur-nettoyeur	3,5	1,6	1	6	5	13
131			Préposé à la buanderie	3,9	1,7	1	7	6	13
132		Repasseurs, presseurs et finisseurs (nb=2 638)	Presseur-nettoyeur	3,4	1,6	1	6	5	13
133			Préposé à la buanderie	4,3	1,7	2	7	5	13
134		Entrepreneurs et gestionnaires de l'aménagement paysager et de l'entretien de terrain (nb=528)	Paysagiste d'entretien	5,3	1,8	3	8	5	13
135		Manœuvres en aménagement paysager et en entretien des terrains (nb=13 082)	Paysagiste d'entretien	4,8	1,8	2	8	6	13
136		Personnel exclusif aux Forces armées (nb=11 428)	Militaire - soldat	4,8	1,2	2	6	4	12

¹ Les effectifs de travailleurs (nb) présentés sont liés aux CNP-4 et aux SCIAN auxquels ils ont été rattachés, et non uniquement aux titres d'emploi qui ont été jugés prioritaires. Ainsi, les diverses professions CNP-4 retenues, et leur effectif de travailleurs respectif, incluent souvent, en plus des titres d'emploi prioritaires, d'autres titres d'emploi non retenus comme prioritaires dans cette étude. Pour obtenir une description plus complète de toutes les professions et titres d'emploi couverts par un code CNP, le lecteur peut se référer au site suivant: <http://www.statcan.gc.ca/subjects-sujets/standard-norme/soc-cnp/2006/noc2006-cnp2006-menu-fra.htm> (consulté en janvier 2012).

² Nombre d'experts qui ont attribué une cote