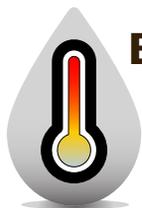


# Guide de surveillance physiologique du **STRESS THERMIQUE**

ÉDITION 2024

Version 1.0



Boîte à outils contre le  
**STRESS  
THERMIQUE**



## Reconnaissance des terres

Les rédacteurs et contributeurs de ce guide reconnaissent que leur travail se déroule sur les territoires autochtones traditionnels dans l'ensemble de la province. Nous reconnaissons qu'il existe 46 traités et autres accords qui couvrent le territoire aujourd'hui appelé Ontario. Nous sommes reconnaissants de pouvoir travailler et vivre dans ces territoires.

Nous remercions les Premières nations, les Métis et les Inuits qui ont pris soin de ces territoires depuis des temps immémoriaux et qui continuent de contribuer à la force de l'Ontario et de toutes les communautés de la province.

## Reconnaissance de financement

Ce guide a été financé par le ministère du Travail, de l'Immigration, de la Formation et du Développement des compétences de l'Ontario (MLITSD). Les opinions exprimées dans ce guide sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du MLITSD.

## Contributeurs

Sandra Dorman<sup>1</sup>, PhD, Courtney Lessel<sup>1</sup>, André Gauvin<sup>2</sup>, Megan Friesen<sup>2</sup>, Dominique Gagnon<sup>3</sup>, PhD, Margaret-Kanya-Forstner<sup>1</sup>, Eduardo Huesca<sup>2</sup>, Tobias Mankis<sup>1,4</sup>, Sabine Bouchard<sup>4</sup>, Kimberly O'Connell<sup>2</sup>, Erica Scime<sup>5</sup>, Lesley Scime, Caitlin Wittke<sup>2</sup>

1. Centre for Research in Occupational Safety and Health (CROSH), Sudbury, Ontario, Canada..
2. Cliniques de santé au travail pour les travailleurs de l'Ontario (OHCOW), Toronto, Ontario, Canada.
3. Université d'Helsinki, Helsinki, Finlande.
4. Studio URSU, Sudbury, Ontario, Canada.
5. Archetype Creative, Waterford, Ontario, Canada.

## Citation

Dorman, S.C. et Lessel, C. (2024, mai). *Stress thermique : guide de surveillance physiologique* (Éds.

Gagnon, D. et Kanya-Forstner, M.). Centre for Research in Occupational Safety and Health (CROSH) : Sudbury, Ontario.

## À propos de ce guide

Les OHCOW se sont associées au CROSH pour réviser et mettre à jour le *Guide de sensibilisation au stress thermique* élaboré par les OHCOW en 2009. Avec le soutien des partenaires du système de prévention de la santé et de la sécurité en Ontario (par l'intermédiaire de l'Occupational Illness Prevention Steering Committee) et des syndicats locaux, nous avons identifié les domaines qui nécessitaient une amélioration ou une révision et le concept de boîte à outils est né!



Nous avons élaboré la [boîte à outils contre le stress thermique](#) pour aider les personnes qui soutiennent et protègent les travailleurs

- les employeurs • les cadres • les superviseurs • les collègues de travail
- les membres du Comité mixte de santé et de sécurité (CMSS)
  - les représentants de la santé et de la sécurité
  - les représentants syndicaux sur le lieu de travail

Les syndicats, les associations d'employeurs et les professionnels de la santé et de la sécurité peuvent également trouver ces informations utiles.

La [boîte à outils contre le stress thermique](#) comprend le présent *guide de surveillance physiologique du stress thermique*, un nouveau [guide de sensibilisation au stress thermique](#) et un [guide d'outils et de stratégies de prévention du stress thermique](#) mis à jour sur le site. Elle comprend également plusieurs affiches et infographies, des vidéos et un [calculateur de stress thermique](#) en ligne mis à jour.

Une liste de ressources supplémentaires est également disponible [en ligne sur la page web du projet](#).

## Clause de non-responsabilité

Les informations contenues dans ce guide de référence sont fournies à titre d'information et de référence uniquement et ne constituent pas des conseils juridiques ou professionnels. L'Université Laurentienne (UL), le Centre for Occupational Safety and Health (CROSH) et les Occupational Health Clinics for Ontario Workers (OHCOW) reconnaissent que les entreprises doivent élaborer des politiques et des plans de lutte contre le stress thermique qui s'appliquent à leurs lieux de travail et se conformer à la législation en vigueur.

L'UL, le CROSH ou les OHCOW n'offrent aucune garantie quant à l'exactitude absolue ou au caractère suffisant de toute information contenue dans ce guide. L'UL, le CROSH et les OHCOW n'assument aucune responsabilité à cet égard; on ne peut pas non plus supposer que toutes les mesures de sécurité acceptables sont contenues dans ce matériel, ou que d'autres

Les OHCOW n'assument aucune responsabilité quant à l'utilisation de ces informations.

ISBN : 978-1-7383931-1-4

**L'utilisation, la reproduction et la duplication de ce manuel sont recommandées et encouragées.**

© 2024. Ce travail est sous licence ouverte CC BY 4.0.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
Stress thermique .....	1
Pourquoi ce guide est-il nécessaire?.....	2
À qui s'adresse ce guide?.....	3
<b>Contexte professionnel pour la surveillance préventive .....</b>	<b>4</b>
Qu'est-ce que la surveillance préventive?.....	4
Niveaux de surveillance préventive.....	4
Fréquence de la surveillance préventive.....	5
Périodique.....	5
En continu.....	5
<b>Thermorégulation et physiologie du stress thermique .....</b>	<b>7</b>
<b>Outils de dépistage des marqueurs physiologiques du stress thermique .....</b>	<b>9</b>
Surveillance par le biais d'outils d'évaluation.....	9
Dépistage du stress thermique.....	9
Outil d'évaluation sur la récupération en cas de stress thermique.....	11
Surveillance de la température corporelle centrale.....	12
Température rectale.....	12
Température œsophagienne et pulmonaire.....	12
Capsule télémétrique.....	12
Estimation de la température corporelle centrale pour la surveillance....	14
Surveillance de la température buccale/sublinguale.....	14
Surveillance de la température temporale.....	14
Surveillance de la température au niveau de l'oreille (tympan et canal auditif).....	16
Surveillance de la température de la peau en temps réel.....	16
Surveillance de la température de la tête.....	17
Méthodes de mesure au niveau de la poitrine.....	18
Méthodes de mesure au niveau du poignet.....	19
Surveillance hybride : surveillance de la fréquence cardiaque et de la variabilité de la fréquence cardiaque.....	20

Fréquence cardiaque.....	20
Variabilité de la fréquence cardiaque.....	22
Technologie de surveillance de la FC et de la VFC (photopléthysmographie vs electrocardiogramme).....	23
Types de technologies portables FC/VFC.....	23
Portées à la poitrine .....	24
Dispositifs portés au bras ou au poignet .....	24
<b>Les limites des moniteurs physiologiques sur le lieu de travail .....</b>	<b>26</b>
Limites de l'utilisation des appareils sur le lieu de travail.....	26
Réglementation de l'entreprise ou du lieu de travail.....	26
Interprétation des données.....	26
Propriété des données et politique en matière de protection de la vie privée/de l'information sur l'entreprise.....	26
Fourniture d'un retour d'information.....	26
Contrôler la validité et la fiabilité.....	27
Robustesse .....	27
Taille et poids du dispositif.....	27
System usability.....	27
Facilité d'utilisation du système.....	28
Temps et formation.....	28
<b>Annexe A : Définitions .....</b>	<b>29</b>
<b>Annexe B : Références .....</b>	<b>31</b>
<b>Annexe C : Questionnaire de dépistage du stress thermique.....</b>	<b>45</b>
<b>Annexe D : Indice de contrainte perceptive (PeSi).....</b>	<b>46</b>
<b>Annexe E : Questionnaire sur la récupération en cas de stress thermique .....</b>	<b>47</b>
<b>Annexe F : Collecte et traitement des données VFC.....</b>	<b>48</b>
<b>Annexe G : Recherche et soutien.....</b>	<b>49</b>

# INTRODUCTION

## Introduction

Au Canada, la nécessité croissante de lutter contre l'exposition à la chaleur sur le lieu de travail devient une question de plus en plus importante. Malheureusement, en raison de la détérioration constante des conditions environnementales, causée par le réchauffement climatique, le nombre de personnes qui tombent malades ou qui meurent à cause du stress thermique continue d'augmenter (*Romanello et al. 2023*).

En fait, pour la période 2013-2022 par rapport à la période 1991-2000, il y a eu 241 heures supplémentaires par an pendant lesquelles la chaleur ambiante a présenté un risque modéré ou plus élevé de stress thermique lors d'une activité physique légère en plein air. L'exposition à la chaleur sur le lieu de travail a entraîné la perte de 490 milliards d'heures de travail potentielles en 2022, soit une augmentation de près de 42 % par rapport à la période 1991-2000. Entre 2013 et 2022, par rapport à la période 1991-2000, la mortalité moyenne estimée liée à la chaleur a augmenté de 85 %, sous l'effet du réchauffement et de l'évolution démographique (vieillesse de la population) (*Romanello et al. 2023*). « Les températures moyennes annuelles et saisonnières ont augmenté dans l'ensemble du Canada, le réchauffement le plus important se produisant en hiver. Entre 1948 et 2016, la meilleure estimation de l'augmentation de la température annuelle moyenne est de 1,7 °C pour l'ensemble du Canada et de 2,3 °C pour le nord du Canada » (*Zhang et al., 2019*).

D'après une synthèse de la littérature réalisée par Kipp et al. (2019), l'augmentation de la température a entraîné et continuera d'entraîner un risque accru d'effets sur la santé (fréquence et gravité) pour les travailleurs (dans les environnements de travail intérieurs et extérieurs).

De plus, la littérature met en évidence l'indigénité, l'âge, le sexe, le statut socio-économique et le nombre accru de personnes occupant des emplois en extérieur comme des facteurs clés influençant la vulnérabilité des travailleurs et des lieux de travail au changement climatique en Ontario, en particulier dans le nord de la province.

## Stress thermique

La chaleur est déjà un problème reconnu dans de nombreux lieux de travail, y compris, mais sans s'y limiter :

- Dans les fonderies, les aciéries, les usines de fusion, les verreries et les fours, où les matériaux extrêmement chauds ou en fusion constituent la principale source de chaleur.

**... l'augmentation de la température a entraîné et continuera d'entraîner un risque accru d'effets sur la santé pour les travailleurs**

- Dans les métiers de plein air, tels que la construction, la réparation de routes, l'exploitation minière à ciel ouvert, la lutte contre les incendies de forêt, la plantation d'arbres et l'agriculture, où le soleil d'été est la principale source de chaleur.
- Dans les blanchisseries, les cuisines de restaurants, les boulangeries et les conserveries, où l'humidité élevée ajoute à la charge thermique.

Les maladies aiguës liées à la chaleur comprennent, par ordre de gravité croissante : les crampes de chaleur, la syncope de chaleur, l'épuisement par la chaleur et le coup de chaleur (*Donoghue, 2004; Kenney et al., 2015; MLITSD, 2021; Taylor et al., 2014*). L'épuisement par la chaleur et le coup de chaleur sont des urgences médicales qui peuvent entraîner la mort (*Bouchama et Knochel, 2002; MLITSD, 2021*).

\* Pour une description complète des maladies aiguës dues à la chaleur, voir le [Guide de référence sur la sensibilisation au stress thermique](#).

En plus de ces effets immédiats, les maladies liées à la chaleur peuvent également avoir des effets à long terme, la gravité de la contrainte thermique présentant une corrélation positive avec la gravité des symptômes à long terme et des lésions organiques (*Bouchama et Knochel, 2002*). Pendant que la chaleur s'accumule dans le corps, la contrainte thermique peut endommager davantage les cellules du cerveau, du cœur, des reins et même des muscles (*Cheung et al., 2000; McArdle et al., 2007*). Il est important de noter qu'une maladie aiguë due à la chaleur peut augmenter de façon permanente le risque d'un futur coup de chaleur (*Wang et al, 2019*).

**Il est essentiel de reconnaître les premiers signes/stades des maladies liées à la chaleur pour prévenir un coup de chaleur complet et atténuer les dommages à court terme du stress thermique (CCOHS, 2024).**

Aujourd'hui, les seuls rapports professionnels recueillis sur le stress thermique concernent les cas d'épuisement dû à la chaleur ou de coup de chaleur. Cependant, les travailleurs exerçant des professions à haut risque sont régulièrement victimes de contraintes et de maladies dues à la chaleur qui ne sont pas signalées, mais qui pourraient être utilisées pour prédire ou prévenir l'épuisement dû à la chaleur ou le coup de chaleur.



En fait, on estime que 220 travailleurs meurent chaque année au Canada à cause du stress thermique professionnel et que 15 % des travailleurs qui ont généralement ou fréquemment travaillé dans des conditions de stress thermique (au moins 6 heures par jour, 5 jours par semaine, pendant 2 mois de l'année) ont souffert d'une maladie rénale chronique ou d'une lésion rénale aiguë (Flouris et al., 2018).

La maladie rénale chronique est une affection dans laquelle les reins sont endommagés et ne peuvent plus filtrer le sang aussi bien qu'ils le devraient.

L'excès de liquide et de déchets s'accumule alors dans l'organisme et peut entraîner d'autres problèmes de santé tels que des maladies cardiaques et des accidents vasculaires cérébraux.

## Pourquoi ce guide est-il nécessaire?

En vertu de la *loi sur la santé et la sécurité au travail (LSST)*, le lieu de travail doit prendre toutes les précautions raisonnables pour protéger les travailleurs (LSST, 1990), ce qui inclut fondamentalement la mise en place d'un plan de lutte contre le stress thermique. Les lieux de travail qui sont chauds en raison de la chaleur industrielle (p. ex., les boulangeries ou les usines de fusion) sont tenus de respecter les valeurs limites d'exposition (VLE) de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) pour le stress thermique et de mettre

en place un plan de contrôle du stress thermique en consultation avec le comité mixte de santé et de sécurité du lieu de travail ou le(s) représentant(s) de la santé et de la sécurité du travailleur. L'objectif des VLE liées à la chaleur est d'empêcher les températures corporelles centrales des travailleurs acclimatés de dépasser 38 °C (ACGIH, 2022). Les VLE sont données séparément pour les travailleurs acclimatés à la chaleur et correctement hydratés et pour les travailleurs non acclimatés; elles sont appelées valeurs limites d'action (LA). Les VLE et les LA sont déterminées en tenant compte du niveau d'activité physique du travailleur, dans le contexte de la température et de l'humidité ambiantes, et en appliquant une série de graphiques pour interpréter le niveau estimé de rendement métabolique (activité physique), qui peut être accompli pendant une période donnée, compte tenu des conditions ambiantes et des exigences en matière d'équipement de protection individuelle (EPI).

Cette approche pose trois problèmes. Tout d'abord, elle ne tient pas compte des différences individuelles, qui peuvent avoir un impact considérable sur la sensibilité au stress thermique et la protection contre celui-ci (p. ex., le sexe, l'âge, l'état de santé et la prise de médicaments). Deuxièmement, les directives de l'ACGIH ne s'appliquent pas aux environnements dynamiques ou aux environnements extérieurs où les conditions météorologiques au sol peuvent être affectées par l'ombre, la topographie, le vent, etc. Troisièmement, la stratégie actuelle n'intègre pas de retour d'information en temps réel sur les réactions physiologiques, afin de prévenir les épisodes de stress thermique.

Bien que largement inutilisée, l'ACGIH fournit des conseils sur les indicateurs physiologiques à surveiller pour prévenir les maladies dues à la chaleur. Selon l'ACGIH (2022), le stress thermique peut être défini par les conditions suivantes :

- Fréquence cardiaque soutenue (pendant plusieurs minutes) supérieure à 180 battements par minute (bpm) moins l'âge de l'individu en années (180 - âge), pour des individus en bonne santé ayant une réaction cardiaque normale.
- Température corporelle centrale mesurée ou estimée augmentant de plus de 1 °C par rapport à la température avant le travail, si la température avant le travail est inférieure à 37,5 °C.
- Fréquence cardiaque de récupération une minute après un effort maximal supérieure à 120 bpm.

L'exposition doit cesser en cas de signes et symptômes d'épuisement dû à la chaleur ou de coup de chaleur ou avec une demande d'arrêt, indépendamment de ce que peut indiquer la surveillance physiologique.

Avec le développement rapide des technologies, les travailleurs et les lieux de travail sont désormais prêts à mettre en œuvre de nouveaux systèmes de surveillance des symptômes physiologiques, en temps réel, dans un cadre préventif. Toutefois, si les capacités technologiques se sont améliorées, la mise en œuvre de politiques spécifiques aux maladies dues à la chaleur et de protocoles validés n'a pas suivi le même rythme. Il existe d'importantes lacunes dans les informations destinées aux travailleurs et aux lieux de travail qu'il convient de combler afin d'intégrer les technologies mises au point pour prévenir la contrainte thermique.

Il s'agit notamment, mais pas exclusivement, des éléments suivants :

- 1) créer des applications et des logiciels de surveillance spécifiques à la contrainte thermique, liés à des équipements validés;
- 2) tester toute technologie dans des applications spécifiques au terrain pour traiter les questions de conformité liées à l'hygiène, au confort, à la sécurité physique, à la sécurité psychosociale et aux questions de protection juridique;
- 3) élaborer du matériel de formation pour la mise en œuvre et l'évaluation de tout autre système de soutien nécessaire; et
- 4) veiller à ce que tout système de surveillance soit intégré dans un programme global de gestion du stress thermique (PSGT) sur le lieu de travail.

De plus, en supposant que la surveillance physiologique sera bientôt incorporée dans les groupes de travail les plus à risque, des informations doivent être fournies dès maintenant pour permettre aux travailleurs et aux lieux de travail de comprendre et d'examiner les possibilités de surveillance individuelle et d'appliquer des stratégies significatives sur la manière d'incorporer la surveillance en fonction du risque sur le lieu de travail. L'objectif de ce guide est donc de faire le point sur l'application des paramètres de l'ACGIH pour prévenir la contrainte thermique, dans le contexte des technologies disponibles, et leur capacité à évaluer ces paramètres.

**Il incombe à l'employeur d'identifier et de mettre en œuvre des mesures de contrôle des risques pour la santé sur le lieu de travail.**

## À qui s'adresse ce guide?

Il incombe à l'employeur d'identifier et de mettre en œuvre des mesures de contrôle des risques pour la santé sur le lieu de travail (OHS, 1990). Ce guide a été principalement conçu pour aider les spécialistes de la santé et de la sécurité au travail à comprendre la technologie disponible afin d'éclairer la prise de décision au sein de leur organisation en ce qui concerne la prévention des maladies dues à la chaleur. Bien qu'il soit complet, ce guide n'englobe pas tous les moyens possibles de surveiller la santé personnelle ou de minimiser et de prévenir l'exposition aux risques de maladies liées à la chaleur. Il doit donc être utilisé conjointement avec d'autres ressources (p. ex., un entretien confidentiel avec des professionnels de la santé et de la sécurité) afin de répondre à toutes les préoccupations dans ce domaine. Les informations contenues dans ce guide ne constituent pas des conseils juridiques ou professionnels. L'adoption des pratiques décrites dans ce guide peut ne pas répondre aux besoins, aux exigences ou aux obligations de tous les employés ou de tous les lieux de travail.

À des fins de conformité, le Ministère du Travail, de l'Immigration, de la Formation et du Développement des compétences (MLITSD) recommande la VLE actuelle pour le stress thermique et la contrainte thermique, publiée par l'ACGIH. Pour plus de détails, voir le document web du MLITSD intitulé « Prévenir ou limiter le stress dû à la chaleur dans les lieux de travail ». De plus, à compter du 1er août 2023, une nouvelle réglementation sur le stress thermique a été proposée (proposition n° 23-MLITSD003) en Ontario; la proposition concerne une réglementation autonome sur le stress thermique, dans le cadre de la LSST, avec des exigences spécifiques qui s'appliqueraient à tous les lieux de travail où la LSST est en vigueur. La proposition de règlement sur le stress thermique fait actuellement l'objet d'une analyse d'impact réglementaire.

# CONTEXTE PROFESSIONNEL POUR LA SURVEILLANCE PRÉVENTIVE

## Qu'est-ce que la surveillance préventive?

La surveillance préventive englobe les efforts administratifs qui imposent le dépistage des signes et symptômes de contrainte thermique, soit dans un délai prescrit, soit par une surveillance continue pendant une période de risque de stress thermique.

## Niveaux de surveillance préventive

Chaque lieu de travail connaît des schémas différents de stress thermique (p. ex., saisonnier ou constant) ainsi que des niveaux de risque différents, en fonction de la température, de l'humidité, de la charge de travail physique, de la durée du quart de travail, de l'utilisation d'EPI et d'autres facteurs liés au lieu de travail. Pour aider votre organisation à comprendre vos risques, nous vous encourageons à utiliser une

matrice des risques, couramment employée dans les évaluations formelles des risques (Joy, 2004; Komljenovic et Kecojevic, 2007). Nous recommandons que, dans la mesure du possible, les données quantitatives et l'expertise sur le terrain (données qualitatives) soient utilisées en combinaison pour sélectionner la probabilité d'une maladie due à la chaleur et la gravité de ses conséquences. Il convient de prendre en considération 1) la fréquence des maladies dues à la chaleur; 2) l'incidence de l'épuisement par la chaleur ou du coup de chaleur; et 3) la probabilité de développer une maladie due à la chaleur en tant que maladie professionnelle à long terme (p. ex., le risque de maladie rénale). L'utilisation d'une matrice des risques (tableau 1) peut aider les parties à appliquer un calendrier et un système de surveillance qui correspondent le mieux aux besoins de leur lieu de travail.

		IMPACT / CONSÉQUENCE DU DANGER			
		1 Mineur(e)	2 Modéré(e)	3 Majeur(e)	4 Maximal(e)
<b>MATRICE DE RISQUES</b>		Cas de premiers soins : exposition à un risque pour la santé mineur; peu ou pas de coûts économiques encourus	Traitement médical; blessure entraînant une perte de temps; impact réversible sur la santé; exposition à un risque pour la santé majeur; les coûts économiques sont faibles.	Perte de qualité de vie; impact irréversible sur la santé; coûts économiques modérés.	Un ou plusieurs décès; l'impact sur la santé s'avère fatal; les coûts économiques sont élevés.
PROBABILITÉ		CLASSEMENT DES RISQUES			
1 <b>Peu probable</b> (<10 %*)	L'incident s'est déjà produit dans le passé (rarement) et peut se produire dans des circonstances exceptionnelles.	BAS	BAS	MOYEN	ÉLEVÉ
2 <b>Possible</b> (<10-30 %*)	L'incident s'est produit à un moment donné (rarement) et se produira dans certaines circonstances.	BAS	MOYEN	MOYEN	ÉLEVÉ
3 <b>Probable</b> (<3-75 %*)	L'incident s'est produit fréquemment et est susceptible de se produire à nouveau	LOW	MOYEN	ÉLEVÉ	EXTRÊMEMENT ÉLEVÉ
4 <b>Presque certain</b> (>75 %*)	L'incident se produit régulièrement et continuera à se produire	MOYEN	ÉLEVÉ	EXTRÊMEMENT ÉLEVÉ	EXTRÊMEMENT ÉLEVÉ

\*Probabilité

Tableau 1. Matrice des risques (adaptée de : Bui et al., 2017).

Une fois que vous avez utilisé la matrice des risques pour déterminer votre niveau de risque, vous pouvez envisager les outils appropriés à utiliser pour surveiller les travailleurs en cas de maladie due à la chaleur (p. ex., le *tableau 2*).

OUTILS DE SURVEILLANCE			
BAS	MOYEN	ÉLEVÉ	EXTRÊMEMENT ÉLEVÉ
Liste de contrôle d'auto-surveillance	Liste de contrôle pour l'auto-surveillance Contrôle de la température Liste de contrôle pour la surveillance par la deuxième personne	Surveillance continue en cas d'alerte du travailleur Liste de contrôle d'auto-surveillance Liste de contrôle pour la surveillance par la deuxième personne Liste de contrôle pour le suivi de la récupération Contrôle de la température	Surveillance continue en cas d'alerte du travailleur et du lieu de travail Liste de contrôle d'auto-surveillance Liste de contrôle pour la surveillance par la deuxième personne Liste de contrôle pour le suivi de la récupération Contrôle de la température

Tableau 2. Niveaux de surveillance préventive, évalués à l'aide d'une matrice des risques. Voir les *annexes C à E* pour des exemples de listes de contrôle.

## Fréquence de la surveillance préventive

### Périodique

La surveillance périodique nécessite la mise en œuvre de pratiques de dépistage programmées afin de détecter les signes précoces de maladie due à la chaleur et de favoriser la prévention. L'ajout de listes de contrôle sous forme d'applications ou de documents papier pour le dépistage programmé des signes et symptômes peut constituer une stratégie rentable pour prévenir la progression de la contrainte thermique, identifier les accidents évités de justesse et aider à mieux comprendre les pratiques organisationnelles et leurs effets sur l'accumulation de chaleur chez un travailleur.

Le dépistage peut inclure tout ou partie des éléments suivants : auto-surveillance par le travailleur, contrôle de la récupération après le travail, surveillance par une deuxième personne (p. ex., chef d'équipe/responsable) et contrôle de la température (voir « Outils de dépistage des marqueurs physiologiques du stress thermique » pour les considérations relatives aux outils de contrôle de la température). Le choix du dépistage doit être guidé par le niveau évalué du risque. La surveillance continue nécessite l'application d'une technologie portable et devrait être envisagée sur les lieux de travail ou pour les tâches présentant un risque élevé ou extrêmement élevé lié à la chaleur.

### En continu

Les dispositifs de surveillance de la santé personnelle sont définis comme des « dispositifs qui peuvent être portés ou associés à la peau humaine pour surveiller continuellement et étroitement les activités et les réactions d'un individu, sans interrompre ou limiter les mouvements de l'utilisateur » (*Haghi et al., 2017; Gao et al., 2016*). Dans la plupart des cas, les capteurs du dispositif de surveillance de la santé se connectent à des plateformes informatiques qui peuvent stocker, analyser et partager des données (*Hussain et Hussain, 2016; Kaisti et al., 2019*).



Ces appareils utilisent souvent des algorithmes (propriétaires) pour estimer les mesures de la fonction physiologique (Goldsack et al., 2020; Manta et al., 2020).

Jusqu'à présent, la plupart des appareils ont été conçus pour être portés par le public ou les athlètes, dans le but de fournir une multitude de données à l'individu. Certains ont été développés dans le but de fournir des informations à un professionnel de la santé ou à une autre entité (Carrier et al., 2020).

Il est essentiel de décider comment une organisation partagera les données (c.-à-d. si les données personnelles ne sont partagées qu'avec le travailleur ou si le lieu de travail reçoit directement les données), car cette décision aura de vastes implications, notamment en ce qui concerne : le respect de l'outil par le travailleur, les exigences légales de l'entreprise, la portée des données, le nombre d'heures de travail, la durée du travail, l'analyse qui peut être effectuée et les résultats en matière de sécurité.

Les technologies de détection actuellement disponibles pour mesurer les symptômes physiologiques de la contrainte thermique, en particulier :

- la température élevée du cœur ( $T_{\text{centrale}}$ ),
- la température élevée de la peau ( $T_{\text{peau}}$ ),
- une augmentation de la fréquence cardiaque (FC), et
- la réduction de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC).

En outre, les dispositifs doivent être examinés en fonction de leur capacité à répondre aux besoins pratiques d'un lieu de travail, notamment :

- aucune charge supplémentaire pour les EPI existants;
- hygiénique et confortable pour une utilisation prolongée;
- mesures exactes (valides) et précises (répétables) (peu de « fausses » alarmes ou d'alarmes « manquées »);
- possibilité/besoin de couplage via Bluetooth pour se connecter à un appareil secondaire;
- accès aux données;

- l'autonomie de la batterie; et
- aucun risque supplémentaire n'est introduit.

De plus, pour les besoins de l'examen du dispositif, il est reconnu que les variations individuelles (y compris les différences entre les sexes) font que des personnes différentes ressentent différemment le risque de maladies liées à la chaleur malgré le même niveau de stress thermique. Cela signifie que les symptômes de stress thermique ( $T_{\text{centrale}}$ ,  $T_{\text{peau}}$  et FC) varient d'un individu à l'autre dans les mêmes conditions environnementales.

Les différences individuelles comprennent le niveau d'acclimatation, la condition physique, l'âge, le sexe, la prise ou non de médicaments, les conditions



médicales préexistantes, l'anthropométrie et la composition du corps, ainsi que la génétique. En raison des différences individuelles et celles fondées sur le sexe, les lieux de travail peuvent avoir besoin d'établir des données de base pour chaque travailleur, afin de pouvoir comparer les changements par rapport à la « normale » en tant que composante des symptômes de stress thermique. Pour établir cette base, les travailleurs devront faire l'objet d'un suivi ou d'un dépistage régulier, y compris pendant les journées les plus chaudes et les plus humides. De plus, les lieux de travail devront élaborer et mettre en œuvre des sessions de formation sur l'utilisation de tout dispositif de surveillance qu'ils mettent en place.

# THERMORÉGULATION ET PHYSIOLOGIE DU STRESS THERMIQUE

La thermorégulation est la réaction physiologique adaptative conçue pour empêcher le corps de devenir trop froid ou trop chaud (Kenney *et al.*, 2015) par le biais de mécanismes homéostatiques tels que la vasoconstriction, la vasodilatation, les frissons et la transpiration.

Cette section n'est pas un examen complet de la thermorégulation, mais plutôt une vue d'ensemble des changements physiologiques pertinents dans le contexte des principaux marqueurs du stress thermique qui sont surveillés (c.-à-d., FC, VFC,  $T_{\text{peau}}$ ,  $T_{\text{centrale}}$ ).

Le corps est toujours en train d'équilibrer la production et la perte de chaleur, le résultat étant le maintien de la température corporelle à environ 37 °C. La mesure de

la température corporelle peut être importante pour éviter les troubles dus à des températures internes élevées (p. ex., épuisement par la chaleur/accident vasculaire cérébral) (Dias et Paulo Silva Cuhna, 2018; Teng *et al.*, 2008).

La température corporelle peut être représentée par la  $T_{\text{centrale}}$  et la  $T_{\text{peau}}$ , bien que la plupart des dispositifs de santé personnels ne mesurent que la

$T_{\text{peau}}$ , étant donné que la mesure directe de la  $T_{\text{centrale}}$  peut être difficile sans un capteur interne invasif.

La  $T_{\text{peau}}$  est liée à la fois à la FC et au taux métabolique, car elle est affectée par la circulation sanguine (Buller *et al.*, 2010; Dias et Paulo Silva Cuhna, 2018) : ces mesures combinées peuvent permettre des estimations calculées de la  $T_{\text{centrale}}$ .

La  $T_{\text{centrale}}$  est la température des structures les plus profondes du corps; elle est maintenue par divers mécanismes homéostatiques (p. ex. la transpiration, les frissons et la redistribution du flux sanguin par vasoconstriction ou vasodilatation des vaisseaux sanguins) (Cheung, 2010; Kenney *et al.*, 2015).

Le corps commence à activer les mécanismes de perte de chaleur lorsque la  $T_{\text{centrale}}$  augmente.

Il existe quatre mécanismes de perte de chaleur : le rayonnement, la conduction, la convection et l'évaporation.

Le premier mécanisme, le rayonnement, représente une part importante de la perte de chaleur du corps (Gagnon, 2011; Kenny, 2010; Cramer, 2022; Lim *et al.*, 2008).

Le rayonnement fonctionne sur la base du gradient thermique qui existe entre la peau et l'environnement ambiant (la chaleur rayonne des endroits chauds vers les endroits plus froids); dans la plupart des endroits, l'environnement est plus froid que la température du corps (Diaz et Becker, 2010; Lim *et al.*, 2008).

Dans les professions où les travailleurs se trouvent dans un environnement chaud et portent des EPI, cette méthode de dissipation de la chaleur est entravée parce que le gradient thermique est faible et parce que les EPI interfèrent avec lui.

Dans un environnement externe très chaud, le gradient thermique est inversé, de sorte que la chaleur peut être transférée de l'air ambiant au travailleur (Levy et Roelofs, 2019).

Les pertes de chaleur par conduction et convection sont similaires et représentent ensemble une petite partie des pertes de chaleur totales.

Pour qu'il y ait conduction, les objets

doivent être en contact **direct** (McArdle *et al.*, 2007).

Le corps perd donc de la chaleur en l'échangeant avec les molécules d'air environnantes ou en entrant en contact avec des surfaces plus froides dans l'environnement (p. ex., une veste rafraîchissante). Dans le cas de la conduction, le taux de dissipation dépend de la durée pendant laquelle les objets sont en contact et des propriétés thermiques des objets.

La convection, quant à elle, dépend du contact avec de l'air **en mouvement** (par exemple, le vent ou un ventilateur) ou un fluide (par exemple, l'eau), et le taux de dissipation dépend du débit (un débit plus rapide entraîne une dissipation plus importante), du gradient de température et des propriétés thermiques du fluide (Kenney *et al.*, 2015; McArdle *et al.*, 2007).

Le dernier mécanisme est l'évaporation, qui est un autre moyen important pour le corps de perdre de la chaleur (Diaz et Becker, 2010).

**La mesure de la température corporelle peut être importante pour éviter les troubles dus à des températures internes élevées.**

L'évaporation consiste à **transformer** la sueur de la peau d'un liquide en un gaz. Cette transformation nécessite beaucoup d'énergie, qui est prélevée sur le corps sous forme de chaleur et perdue dans l'environnement, ce qui refroidit le corps. L'humidité de l'environnement joue un rôle important dans l'efficacité de cette méthode, car une forte teneur en humidité dans l'air empêche la conversion de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux, ce qui rend la transpiration moins efficace dans les environnements humides. L'utilisation d'EPI peut également compromettre gravement la capacité du corps à utiliser l'évaporation pour réduire la température corporelle globale. Par exemple, la sueur peut être absorbée ou essuyée par l'EPI; par conséquent, la sueur qui est essuyée ou absorbée ne contribue pas au refroidissement (Cheung, 2010).

Trois des mécanismes de dissipation de la chaleur (rayonnement, conduction, convection) dépendent de l'augmentation de la circulation sanguine des organes centraux chauds du corps vers la surface de la peau, ce qui impose une charge supplémentaire au cœur. L'un des principaux défis cardiovasculaires lors d'un travail physique à la chaleur est de fournir simultanément un débit cardiaque suffisant (maintien de l'apport d'oxygène aux organes et aux cellules) à la fois aux muscles squelettiques (pour effectuer le travail

physique) et à la peau (pour dissiper la chaleur) (Périard, et al., 2016).

Le débit cardiaque (DC) est défini comme le produit du volume systolique (VS : volume sanguin pompé par battement) et de la FC (nombre de contractions cardiaques par minute) exprimés en L/min ( $DC [L/min] = VS [L/battement] \times FC [batttements/min]$ ). En outre, la transpiration est nécessaire pour évacuer la chaleur pendant une période prolongée d'exposition à la chaleur et augmente les risques de déshydratation. Les pertes de liquide dues à la **transpiration entraînent une perte d'eau dans le sang (volume plasmatique); le résultat de cette diminution du volume sanguin total est que le volume systolique (VS) est encore réduit et qu'une augmentation compensatoire de la fréquence cardiaque est observée pour maintenir la demande du corps en sang et en oxygène** (Davies et Maconochie, 2009; Jacklitsch, et al., 2016). Finalement, si la réduction du volume de plasma sanguin est suffisamment importante, l'augmentation de la tension cardiovasculaire entraîne une diminution de la capacité à effectuer un travail aérobique (Périard et al., 2016).

Au fur et à mesure que la contrainte thermique augmente, le corps perd sa capacité à maintenir une température normale, ce qui provoque des élévations de la  $T_{centrale}$  et de la  $T_{peau}$ . **Pendant ce temps, le cœur continue d'augmenter son rythme pour tenter de faire baisser la température, ce qui entraîne les signes et symptômes associés à la maladie due à la chaleur. L'idéal est donc de mettre en place une surveillance préventive comprenant la surveillance de la fréquence cardiaque et de la température corporelle ( $T_{centrale}$  ou  $T_{peau}$ ) en temps réel.**

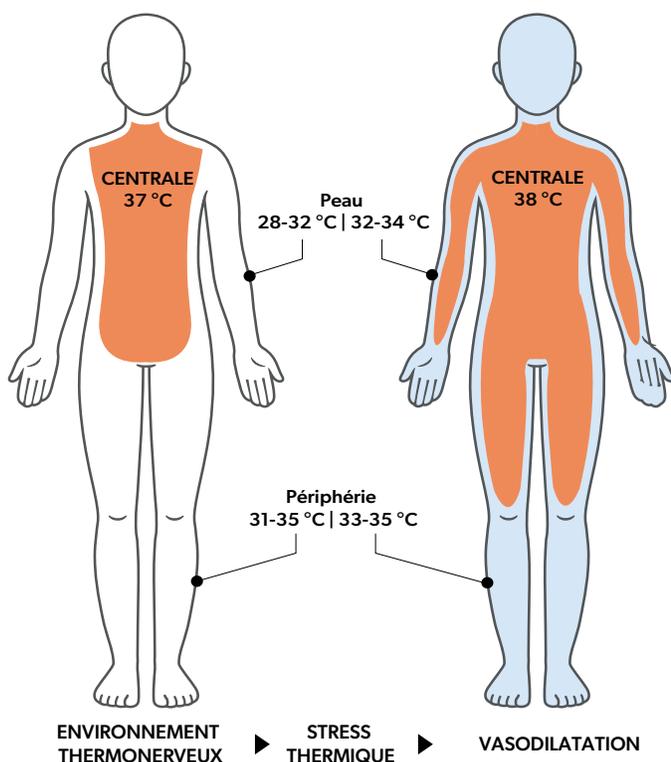


Figure 1. Illustration des changements de la température de la peau et de la répartition de la chaleur, lorsque la température corporelle centrale augmente.

# OUTILS DE DÉPISTAGE DES MARQUEURS PHYSIOLOGIQUES DU STRESS THERMIQUE

## Surveillance par le biais d'outils d'évaluation

Outre la surveillance directe des facteurs physiologiques, la surveillance indirecte, par le biais d'outils d'évaluation, peut fournir des informations utiles pour évaluer le risque de stress thermique chez les travailleurs. Le dépistage subjectif du stress thermique peut constituer un outil rapide et accessible. La littérature a montré que les travailleurs font preuve de discernement quant à leurs perceptions personnelles de l'accumulation de chaleur (Cheung, 2007; Dehghan et al., 2013), et que les perceptions thermiques des travailleurs devraient être prises en compte (Cheung, 2007; Dehghan et al., 2013).

C'est pourquoi les annexes C à E présentent des questions avec des documents à l'appui qui pourraient être utilisés sur les lieux de travail. Ainsi, poser des questions peut permettre aux travailleurs de mieux comprendre « ce » qu'ils ressentent et les aider à réagir de manière appropriée et opportune. Les outils d'évaluation sont également un moyen peu coûteux et non invasif d'améliorer un programme de prévention des maladies liées à la chaleur. Il est important de noter que les informations recueillies par le biais d'outils d'évaluation peuvent fournir aux décideurs sur le lieu de travail davantage d'informations sur l'incidence des manifestations plus légères des maladies liées à la chaleur (p. ex., les crampes de chaleur), ainsi que sur l'élaboration de politiques visant à améliorer la récupération quotidienne lors des jours de forte chaleur et d'humidité. Toutefois, compte tenu de la charge supplémentaire que représente la collecte de données sur le lieu de travail, il convient de réfléchir à la durée, au moment de la journée et à la méthode utilisée pour effectuer les évaluations, afin de minimiser la perturbation du temps de travail et du temps personnel, tout en améliorant la reconnaissance des signes précoces de stress thermique (OHSCO, 2009).

Un outil d'évaluation autonome pour la surveillance du stress thermique doit encore être développé et publié dans la littérature. C'est pourquoi les annexes C à E présentent des questions avec des documents à l'appui qui pourraient être utilisés sur les lieux de travail.

## Dépistage du stress thermique

Le dépistage du stress thermique devrait être envisagé sur certains lieux de travail en prenant en compte des facteurs tels que les longs quarts de



travail, en association avec le travail à l'extérieur dans des conditions de chaleur et d'humidité élevées, ou sur des lieux de travail intérieurs soumis à une chaleur industrielle élevée. La littérature de recherche donne un aperçu des facteurs personnels que les gens ressentent et décrivent lorsqu'ils ont trop chaud. Par exemple, chez les pompiers forestiers, la fatigue a été identifiée comme un problème et une corrélation positive a été établie entre la durée des quarts/heures de travail et l'apparition d'un ou plusieurs symptômes de stress dû à la chaleur, notamment : maux de tête, vertiges, nausées et

crampes musculaires (Kim et al., 2019).

En outre, selon une étude portant sur 1 719 personnes faisant partie de la population active australienne, les trois quarts des personnes interrogées sur le stress thermique ont ressenti de la fatigue et des maux de tête (Zander et al., 2018). Des symptômes plus graves, tels que des vertiges, des éruptions cutanées, de la confusion et des nausées, ont également été signalés par des personnes exposées à des niveaux élevés de stress thermique. En outre, selon le NIOSH (Jacklitsch et al., 2016), un rythme cardiaque rapide, une faiblesse ou une fatigue extrême, des vertiges, une confusion et des crampes musculaires sont évidents à différents niveaux d'exposition à la chaleur et peuvent conduire à différentes maladies liées à la chaleur.



Une étude réalisée par Dehghan et ses collègues (2013) a mis en évidence la corrélation entre les perceptions des travailleurs sur les maladies liées à la chaleur et la mesure de l'accumulation de chaleur grâce à la validation d'un questionnaire pour l'évaluation de la contrainte thermique chez les femmes. Dans cette étude, les chercheurs ont mesuré la fréquence cardiaque et la température buccale toutes les cinq minutes pendant 120 minutes pendant que les femmes travaillaient. Ils ont également remis un questionnaire de 45 questions à remplir toutes les 30 minutes pendant les pauses, ainsi que pendant les heures de travail. Ils ont constaté une corrélation significative entre les résultats du questionnaire et la température buccale ainsi que la fréquence cardiaque. Le seuil qu'ils ont identifié est de 17, ce qui indiquait l'existence d'une contrainte thermique chez la personne. Seize variables de leur questionnaire se sont révélées efficaces pour identifier le début du stress thermique; il s'agit des perceptions personnelles de :

- la température de l'air sur le lieu de travail
- le taux d'humidité du lieu de travail
- la température personnelle (p. ex., je me sens à l'aise)
- l'intensité du travail/le niveau d'activité physique
- le flux d'air sur le lieu de travail
- le niveau de transpiration
- le niveau de fatigue
- le niveau de soif
- l'intensité de la souffrance due à la chaleur
- la performance du système de ventilation du lieu de travail
- s'il y a des sources de chaleur sur le lieu de travail, que ressentez-vous lorsque vous y êtes exposé?
- l'exposition à la lumière du soleil (pleine, partielle, ombre)
- le temps que la personne a passé dans l'environnement chaud (heures)
- si elle a déjà subi un coup de chaleur
- la posture corporelle la plus fréquente au travail (assis, debout/faible mobilité, debout/grande mobilité, marche)
- l'espace disponible dans l'aire de travail

D'autres études ont suggéré des thèmes similaires pour la mise en œuvre d'une mesure subjective de détection du stress thermique. Bethea et Parsons (2002) suggèrent des paramètres tels que la température ambiante, l'humidité, la température radiante moyenne, le mouvement de l'air et le taux d'activité physique. Rodriguez (2010) a montré que le taux de transpiration était une réaction de refroidissement importante au stress thermique; par conséquent, les paramètres tels que la température ambiante, la vitesse de l'air et l'humidité ont été considérés comme des facteurs importants liés au taux de transpiration. Ces études confirment que le stress thermique est un sous-produit multifactoriel et que, dans un environnement dynamique, de multiples paramètres doivent également être pris en compte pour évaluer le risque; cela devrait inclure des méthodes subjectives, même avec les progrès des technologies portables, en tant qu'outil supplémentaire. Ensemble, nous avons proposé un questionnaire de dépistage du stress thermique qui peut être utilisé par des travailleurs individuels ou des personnes secondaires pour les aider à déterminer si un travailleur présente des symptômes de maladie due à la chaleur et les guider dans les mesures à prendre (voir l'[annexe C](#)).

Tikuisis et ses collègues (2002) ont également mis au point un indice de stress thermique (Perceptual Strain Index – PeSI), qui mesure le stress thermique chez les individus en fonction de la sensation thermique perçue et de l'évaluation de Borg de l'effort perçu pour le niveau d'intensité de l'activité physique. Cet indice est une autre méthode d'évaluation qui peut être utilisée pour évaluer le risque de stress thermique en temps réel par le biais de la perception, et il peut être utilisé pour déterminer si une action est nécessaire (p. ex., refroidissement, pause) (Tikuisis et al., 2002). Cet indice a été testé et présente une corrélation acceptable avec des indices fiables de stress thermique ( $r=0,94$  entre le PeSI et l'indice de stress physiologique et  $r=0,9$  entre le PeSI et la fréquence cardiaque) (Dehghan et Sartang, 2015) (voir l'annexe D).

### Outil d'évaluation sur la récupération en cas de stress thermique

Outre le dépistage des symptômes lors des journées de forte chaleur/humidité identifiées, il convient de prendre en compte le dépistage quotidien de la récupération, par exemple en cas de longues heures de travail (p. ex., déploiements prolongés) sur plusieurs journées de forte chaleur (Kim et al., 2019). L'importance du dépistage a été soulignée par le fait qu'une victime de la chaleur dans un groupe signifie et suggère que le reste de l'équipe est également en danger de stress thermique (Kelley, 2003). Étant donné que l'exposition quotidienne à de fortes chaleurs peut induire des effets chroniques de fatigue due à la chaleur, ces effets doivent également être surveillés dans le cadre d'un programme de prévention des maladies dues à la chaleur (Budd et al., 1997; Ruby et al., 2002). Par exemple, en appliquant le calculateur humidex, notamment lorsque la valeur humidex atteint  $37\text{ }^{\circ}\text{C}+$ , les lieux de travail pourraient mettre en place un questionnaire quotidien de récupération en cas de stress thermique. En outre, les lieux de travail pourraient envisager d'utiliser ce questionnaire en fonction de l'intensité du travail, un dépistage quotidien de la récupération pouvant s'avérer utile pour les journées de travail plus intenses, tandis qu'un dépistage du stress thermique pourrait être mis en place pour les journées de travail moins intenses.

Une proposition de questionnaire sur la récupération en cas de stress thermique figure à l'annexe E. Il est recommandé de compléter cet outil d'évaluation (ou un

outil similaire) à la fin de chaque journée de travail, afin de suivre la perception subjective de l'état environnemental et physiologique et d'aider les travailleurs à prendre les mesures qui s'imposent. Les activités spécifiques à la récupération de chaleur pourraient faire l'objet d'un examen plus approfondi. Par exemple, l'utilisation de douches ou de techniques d'immersion dans l'eau à la fin de chaque période de travail pourrait constituer une méthode efficace de récupération après des journées de forte chaleur, ainsi qu'une stratégie de prévention pour les journées et les nuits de forte chaleur chronique.

La création d'un programme basé sur une application que les travailleurs pourraient compléter sur un appareil personnel rationaliserait ce processus et devrait réduire la charge administrative.

En conclusion, la perception personnelle du stress thermique est un élément important d'un programme de gestion du stress thermique, en particulier dans les



environnements de travail dynamiques où une surveillance empirique supplémentaire est problématique (c.-à-d., température au thermomètre mouillé renouvelé). Les perceptions personnelles peuvent renforcer les programmes de dépistage sur le lieu de travail et fournir aux travailleurs des questions spécifiques sur les symptômes de la chaleur pour guider leurs actions, ainsi qu'un programme de surveillance de la récupération pendant les périodes de température élevée. L'intégration de ces outils d'évaluation dans une application peut faciliter la

mise en œuvre des outils d'évaluation et fournir une nouvelle source de données pour l'élaboration et la planification de politiques à long terme.

## Surveillance de la température corporelle centrale

Les maladies liées à la chaleur sont une cause majeure de morbidité et de mortalité évitables. Les travailleurs exposés à une chaleur intense peuvent être incapables d'activer des mécanismes compensatoires, ce qui met leur santé en danger. Les sources de stress thermique dans certaines professions dynamiques (p. ex., les pompiers, les agriculteurs, etc.) comprennent à la fois la production de chaleur physiologique et environnementale et sont probablement aggravées par la présence d'EPI. Par conséquent, dans ces professions, la mesure et le dépistage des marqueurs physiologiques indiquant l'apparition d'une contrainte et d'un stress dus à la chaleur sont primordiaux et peuvent prévenir les blessures et sauver des vies. À des fins de conformité, le ministère du Travail, de l'Immigration, de la Formation et du Développement des compétences (MLTSD) recommande que les directives relatives au stress thermique empêchent les travailleurs non acclimatés de voir leur  $T_{\text{centrale}}$  dépasser  $38^{\circ}\text{C}$  (Deming et al., 2020; Hunt et al., 2019b; Jacklitsch et al., 2016; Petruzzello et al., 2009).

La mesure de la  $T_{\text{centrale}}$  est considérée comme l'approche de référence pour l'évaluation et la prévention du stress thermique. Cependant, de nombreuses difficultés techniques et pratiques rendent cette approche peu pratique sur le terrain. Néanmoins, étant donné que la surveillance de la  $T_{\text{centrale}}$  est reconnue comme l'étalon-or de la prévention des maladies liées à la chaleur, les méthodes de mesure suivantes sont passées en revue : rectale, œsophagienne, pulmonaire et télémétrique. Outre l'aptitude à l'utilisation sur le terrain, les sections suivantes s'attachent à décrire l'exactitude (c.-à-d. la proximité des mesures par rapport à la valeur réelle; la validité) et la précision (c.-à-d. la proximité des mesures entre elles; la fiabilité) de ces techniques de mesure.

### Température rectale

La température rectale ( $T_{\text{rec}}$ ) est l'une des représentations de référence de la  $T_{\text{centrale}}$  et la méthode la plus fréquemment utilisée en laboratoire (Casa et al., 2007; Hunt et al., 2016, 2019a; Seo et al., 2016).

Par exemple, l'application des mesures de  $T_{\text{rec}}$  parmi les pompiers d'incendie urbain et un groupe de

pompiers forestiers qui effectuaient des tâches de lutte contre les incendies de forêt dans des conditions d'incendie simulées a été évaluée (Golbabaie et al., 2013; Hunt et al., 2016, 2019a). Cependant, pour les applications sur le terrain, les principales limites de cette méthode sont les préférences personnelles, les problèmes sanitaires et le flux de données. Bien que la littérature fasse état d'une facilité et d'un confort d'utilisation en laboratoire, il serait difficile de convaincre les travailleurs d'utiliser cette méthode pour un contrôle régulier de la température sur le terrain. Le risque de contamination bactérienne est également lié à ce problème; si les conditions sanitaires sont relativement faciles à maintenir dans un laboratoire, cela peut s'avérer difficile dans un environnement professionnel. Enfin, les données relatives à la température devraient être communiquées sans fil à un système portable pour que les données soient significatives en temps réel. À ce jour, cette technologie n'existe pas pour une utilisation sur le terrain. Par conséquent, bien qu'elle produise des estimations précises et exactes de la  $T_{\text{centrale}}$ , la nature peu pratique de cette méthode interdit son utilisation dans un cadre professionnel.

### Température œsophagienne et pulmonaire

Température œsophagienne et pulmonaire  
La thermométrie œsophagienne et la thermométrie pulmonaire sont également considérées comme des mesures de référence de la  $T_{\text{centrale}}$  en raison de leur emplacement central dans le corps (près du cœur) et de leur réaction rapide aux changements thermiques. Pour la télémétrie œsophagienne, on peut utiliser un tube flexible de surveillance de la température, un lubrifiant et un thermomètre calibré (Pasquier et al., 2020). Pour les mesures de l'artère pulmonaire, un cathéter est nécessaire. Bien que ces méthodes produisent des relevés exacts et précis (Bootsma et al., 2022; Launey et al., 2016), elles sont toutes deux invasives en raison de la difficulté qu'il y a à insérer le thermomètre : 1) au-delà des voies nasales et dans l'œsophage (ce qui provoque une irritation des voies nasales et une gêne générale); ou 2) dans l'artère pulmonaire, ce qui provoque une gêne générale chez le sujet. Ni l'une ni l'autre ne pourraient être utilisées dans un cadre professionnel.

### Capsule télémétrique

Étant donné que la  $T_{\text{centrale}}$  est définie comme la température des structures profondes du corps (Cheung, 2010; Hunt et al., 2016; Kenney et al., 2015; Taylor et al., 2014), les appareils qui peuvent être situés à proximité des organes internes du corps

indiquent une  $T_{\text{centrale}}$  plus précise. Une approche innovante consiste en une capsule thermomètre ingérable. Ces capsules sont avalées et passent sans être digérées dans le tube digestif. Elles sont équipées de la technologie Bluetooth et mesurent en permanence la température interne, relayant l'information à un dispositif secondaire, parfois en temps réel. Cet outil permet non seulement d'obtenir des mesures de haute qualité par rapport à la mesure de référence du stress thermique ( $T_{\text{rec}}$ ), mais l'ingestion de la capsule ne provoque aucune gêne et permet une mesure continue jusqu'à 12 heures (Easton et al., 2007; Roossien et al., 2020; Steck et al., 2011; Towey et al., 2017). La recherche a montré que les capsules pour mesurer et évaluer la  $T_{\text{centrale}}$  sont courantes dans la recherche sur le terrain et ont été validées comme une méthode pratique et non invasive pour mesurer la  $T_{\text{centrale}}$  par rapport aux sondes  $T_{\text{rec}}$  (Al-Bouwarthan et al., 2020; Bogerd et al., 2018; Budd, 2001; Casa et al., 2007; Easton et al., 2007; Gumieniak et al., 2018; Hunt et al., 2019a; Materna et al., 1992; Parker et al., 2017; Petruzzello et al., 2009; Steck et al., 2011; Taylor et al., 2021; West et al., 2020; Wilkinson et al., 2008; Williams-Bell et al., 2017). Une étude a analysé les données de 301 pompiers forestiers pendant des quarts de travail complets (de différentes durées); les pompiers ont reçu une capsule de température corporelle centrale (VitalSense) avant le début de leur période de travail. Les chercheurs ont observé que plus les tâches sont ardues, plus le risque de maladies liées à la chaleur est élevé, comme l'indique une augmentation constante de la  $T_{\text{centrale}}$  au-dessus de 38 °C (West et al., 2020).

Les mesures de la  $T_{\text{centrale}}$  effectuées à l'aide d'une pilule thermométrique n'étaient pas significativement différentes de la  $T_{\text{rec}}$  dans des conditions de repos et dynamiques (Bogerd et al., 2018; Bridges et Thomas, 2009; Casa et al., 2007; Easton et al., 2007). Toutefois, des études indiquent que les valeurs de la  $T_{\text{centrale}}$  peuvent être influencées par l'endroit du tractus gastro-intestinal où se trouve la capsule ou par l'interaction de celle-ci avec les liquides ou les aliments présents dans le corps, ce qui fausse les résultats (Casa et al., 2007; Taylor, 2014; Taylor et al., 2014; O'Brien et al., 2024). Par exemple, il a été démontré que la consommation d'une boisson froide déclenche une

erreur dans les mesures jusqu'à 32 minutes après la consommation (Taylor et al., 2014; Wilkinson et al., 2008). Il faut également environ deux heures après l'ingestion pour obtenir une mesure précise de la température; par conséquent, une composante administrative est nécessaire pour administrer la capsule à un moment qui correspond aux besoins de mesure.

En résumé, bien qu'il soit utile de mesurer la  $T_{\text{centrale}}$  par télémetrie dans le cadre d'un plan de prévention des maladies liées à la chaleur, cette méthode présente des incompatibilités majeures en tant qu'outil sur le lieu de travail. La seule option pratique est la capsule télémetrique; cependant, comme la capsule passe dans le tube digestif dans les 24 à 48 heures, pour surveiller régulièrement la  $T_{\text{centrale}}$  avec cette méthode, les travailleurs devraient ingérer une capsule presque



tous les jours, ce qui serait coûteux (coût approximatif de 75 à 100 dollars canadiens) et peu pratique. Par conséquent, ces appareils ne sont pas conçus pour une utilisation continue. Enfin, la thermométrie télémetrique est contreindiquée chez les personnes atteintes d'une maladie intestinale ou porteuses d'un pacemaker (Monnard et al., 2017; Taylor et al., 2014; Wilkinson et al., 2008). Une attention particulière peut être accordée aux situations à haut risque ou d'urgence, ou aux situations dans lesquelles les travailleurs sont tenus de dépasser l'intensité normale de la charge de travail ou les délais habituels.

Par conséquent, bien que l'évaluation directe de la  $T_{\text{centrale}}$  soit une méthode de référence standard et qu'elle puisse fournir des informations précieuses pour la surveillance du stress thermique si elle est fournie en temps réel, il n'existe actuellement aucun moyen pratique de la mettre en œuvre dans un cadre professionnel.

## Estimation de la température corporelle centrale pour la surveillance

Compte tenu du potentiel et des limites de la surveillance en temps réel de la  $T_{\text{centrale}}$  (section précédente), des efforts ont été faits pour **estimer** la



$T_{\text{centrale}}$  de manière non invasive mais précise, dans le but de prévenir ou d'atténuer les maladies dues à la chaleur en empêchant la  $T_{\text{centrale}}$  de dépasser 38 °C. Les méthodes d'estimation de la  $T_{\text{centrale}}$  visent généralement à mesurer des endroits du corps ou des artères où la dissipation de la chaleur est minimale, de sorte que la valeur de la température mesurée soit une estimation proche de la  $T_{\text{centrale}}$ . Les méthodes suivantes d'estimation de la  $T_{\text{centrale}}$  sont examinées ci-dessous : orale/sublinguale; temporelle (front); axillaire (aisselle); auriculaire (canal tympanique ou auditif) et cutanée (tête, poitrine, poignet ou bras).

## Surveillance de la température buccale/sublinguale

La poche sublinguale de la bouche est proche de l'artère sublinguale; il est donc possible d'obtenir une estimation de la  $T_{\text{centrale}}$  en plaçant un thermomètre sur la partie postérieure de la langue pendant cinq minutes. S'il a été démontré que la température buccale avait une précision acceptable (mesure répétée), cette approche ne permet pas d'obtenir une grande exactitude (mesure réelle) (Mazerolle et al., 2011). La méthode orale peut être affectée par des facteurs internes et environnementaux tels que les boissons chaudes et froides et les

maladies buccales, ce qui en fait une mauvaise estimation de la  $T_{\text{centrale}}$  (Mazerolle et al., 2011). Elle est également modifiée par la respiration, ce qui rend son utilisation peu pratique pendant ou après l'exercice, et la température buccale pose des problèmes d'hygiène dans de nombreux environnements professionnels. En résumé, le contrôle de la température sublinguale n'est pas recommandé comme méthode standard de contrôle de la température en milieu professionnel.

## Surveillance de la température temporelle

La température frontale peut être prise à l'aide de plusieurs outils, notamment des thermomètres à cristaux liquides, des enregistreurs de données autonomes et des thermomètres infrarouges sans contact.

### Thermomètres à cristaux liquides

Les thermomètres à cristaux liquides sont des bandes collantes que l'on place sur le front, au-dessus des sourcils, pendant 30 secondes, au cours desquelles leur barre de couleur change pour indiquer la  $T_{\text{peau}}$ . Lors des essais cliniques, cette méthode a donné une grande précision, mais une faible exactitude; son utilisation n'est donc pas recommandée (Casa et al., 2007; Imamura et al., 1998; Kimberger et al., 2007; Lacoumenta et Hall, 1984; Scholefield et al., 1982; Yaron et al., 1995). Outre le fait qu'elle ne permet

pas d'obtenir des mesures précises, cette méthode n'est pas pratique pour de nombreuses professions, en particulier celles qui nécessitent l'utilisation d'un EPI pour la tête (p. ex., un casque, un casque de protection), ou les professions dynamiques.

## Enregistreurs de données autonomes

Les enregistreurs de données autonomes sont composés de puces informatiques thermosensibles enfermées dans de l'acier inoxydable durable qui peuvent être programmés pour enregistrer les températures lorsqu'ils sont portés (-40 à 85 °C) (Langer et Fietz, 2014; Roossien et al., 2020). Ces dispositifs peuvent être collés sur la peau et portés à plusieurs endroits du corps, mais ils sont généralement placés sur le front. L'avantage de ces enregistreurs de données est que, contrairement aux thermistances (utilisées pour mesurer la température dans les équipements), ils sont sans fil, petits (16 X 6 mm<sup>2</sup>) et peuvent enregistrer les données de température hors ligne; ils sont donc capables d'effectuer de longues périodes de mesure et ont une maintenance hygiénique facile (Langer et Fietz, 2014; Raymann et al., 2005; van Marken Lichtenbelt et al., 2006). Les recherches examinant la validité de différents modèles d'enregistreurs de données autonomes ont montré une grande précision de -0,09 °C; cependant, un inconvénient majeur est leur incapacité à mesurer et à rapporter les données en direct, ce qui serait essentiel pour fournir des informations permettant des réactions rapides (c.-à-d. l'atténuation du stress thermique) (Langer et Fietz, 2014; Raymann et al., 2005; Stoop et al., 2020; van Marken Lichtenbelt et al., 2006). Tant que les données ne peuvent pas être transmises sans fil et en temps réel, ces enregistreurs de données auront des applications limitées dans de nombreux environnements professionnels dynamiques.

## Thermomètres infrarouges sans contact (TISC)

Les TISC mesurent la température à distance à l'aide d'un laser. La peau, y compris le front, émet des radiations infrarouges, car la chaleur est dissipée du sang vers l'extérieur. Les TISC mesurent la  $T_{\text{peau}}$  en fonction de la quantité d'énergie infrarouge émise. Les progrès récents et les innovations technologiques ont rendu les TISC plus abordables et ils sont devenus un outil courant pour évaluer la température en relation avec les maladies infectieuses (c.-à-d. pour la détection de la fièvre). Les avantages des TISC sont les suivants :

mesure d'une large gamme de températures, possibilité d'intégrer un système d'alarme, lecture immédiate et un seul pointeur laser pour cibler le centre de la zone de mesure. Toutefois, l'exactitude de l'utilisation de la  $T_{\text{peau}}$  du front comme mesure de substitution pour estimer la  $T_{\text{centrale}}$  est discutable.

Une revue systématique réalisée entre 2002 et 2015 a comparé la précision et la fiabilité des méthodes de thermométrie invasive, y compris les TISC, pour les adultes hospitalisés (Kiekkas et al., 2016). Cette étude est intéressante, car elle ne rend pas seulement compte de la performance des TISC, mais aussi de la concordance entre la thermométrie infrarouge de l'artère temporale et les méthodes de thermométrie invasives et non invasives. La mesure de la chaleur rayonnée (méthode TISC) à partir de l'artère temporale dans les régions frontale et temporale est considérée comme l'une des meilleures méthodes pour mesurer la  $T_{\text{peau}}$  dans la région du front, mais sa capacité à détecter l'hyperthermie est discutable (Kiekkas et al., 2016). L'étude indique que la précision et l'exactitude des thermomètres infrarouges de l'artère temporale ne sont pas satisfaisantes et les auteurs suggèrent que ces thermomètres ne peuvent pas remplacer les méthodes de thermométrie invasives et non invasives (Kiekkas et al., 2016). En outre, l'emplacement de l'artère temporale sur le front n'est pas un lieu de mesure idéal pour la  $T_{\text{peau}}$  afin d'estimer l'hyperthermie. Dans d'autres études, les mesures de l'artère temporale avaient une sensibilité de 0 % (identification précise) à l'hyperthermie par rapport aux mesures invasives et non invasives de la température (Fountain et al., 2008; Furlong et al., 2015; Kiekkas et al., 2016; Kimberger et al., 2007; Stelfox et al., 2010; Sulemon et al., 2002; Winslow et al., 2012; Wolfson et al., 2013). En résumé, les techniques de TISC, y compris la thermométrie de l'artère temporale, ne fournissent pas une mesure exacte ou précise de la  $T_{\text{peau}}$  comme estimation de l'indice la  $T_{\text{centrale}}$ .

## Contrôle de la température axillaire

La méthode axillaire consiste à placer un thermomètre dans l'aisselle pendant cinq minutes pour obtenir une mesure. La sonde doit être soigneusement positionnée sur l'artère axillaire et les bras doivent être placés sur le côté du patient (Wartzek et al. 2011). La mesure de la température axillaire a une précision acceptable, mais une faible exactitude, par rapport

aux mesures réelles de la  $T_{centrale}$  d'environ 1 à 2 °C (Chaturvedi et al., 2004; Inslar et Sessler, 2006).

Ainsi, bien que la méthode axillaire soit une méthode courante, simple et accessible, elle ne constitue pas une bonne alternative pour l'estimation de la  $T_{centrale}$ .

### Surveillance de la température au niveau de l'oreille (tympa et canal auditif)

La méthode du tympa est non invasive et présente une forte corrélation avec la  $T_{centrale}$  et la température du cerveau, car la membrane du tympa reçoit du sang de l'artère carotide interne. L'artère carotide alimente également l'hypothalamus, région du cerveau responsable de la régulation de la température corporelle. Les mesures tympaniques sont reproductibles, l'erreur de mesure d'une lecture à l'autre étant acceptable, de l'ordre de 0,1 à 0,2 °C. Goggins et al. (2022) ont démontré que la température tympanique était la mesure la plus cohérente de la température corporelle centrale chez les adultes non fébriles, quelle que soit la température ambiante, avec une lecture moyenne de 36,8 (±0,18) °C. Cependant, la concordance entre l'oreille droite et l'oreille gauche est médiocre, probablement en raison de la technique de l'utilisateur, et les mesures doivent donc être limitées à l'une des deux oreilles dans la mesure du possible (Childs et al., 1999). La précision dépend également de l'habileté de la personne qui effectue la lecture, en raison du positionnement de l'appareil par rapport à la membrane. Childs et al. (1999) ont mis en évidence des schémas de fièvre caractéristiques en utilisant des mesures de température tympanique, axillaire et rectale chez des enfants fébriles, suggérant que les mesures tympaniques reflètent les changements de la  $T_{centrale}$ . Cependant, des inquiétudes subsistent, car la mesure du tympa n'a pas été testée sur des personnes soumises à une chaleur extrême (Casa et al., 2007) et Casa et ses collègues (2007) ont constaté que la température du tympa restait significativement plus basse à mesure que la  $T_{rec}$  augmentait pendant l'exercice. Cette méthode est donc facile à utiliser, accessible et permet d'éviter les infections grâce à l'utilisation d'embouts jetables. Ses principaux inconvénients sont qu'elle ne peut pas être utilisée pour la surveillance continue de la  $T_{centrale}$  et que son rôle dans le cadre d'une stratégie de prévention sur un lieu de travail dynamique n'a pas été testé sur le terrain. Cependant, elle peut être utilisée dans certaines professions pour l'évaluation après le quart de travail en cas de suspicion de maladie due à la chaleur.

### Surveillance de la température de la peau en temps réel

La température de la peau joue un rôle important dans le confort thermique, grâce à la stimulation des thermosenseurs afférents. La peau joue également un rôle majeur dans la dissipation de la chaleur, en particulier lors d'un travail physique à des températures élevées (Périard et al., 2016; Taylor et al., 2014) et est très accessible en tant que point de mesure, ce qui en fait un point d'intérêt commun pour l'estimation de la  $T_{centrale}$ . La  $T_{peau}$  est le plus souvent mesurée à l'aide de capteurs filaires fixés à la surface de la peau (Taylor et al., 2014). En général, les mesures de la  $T_{peau}$  en un seul point ne sont pas des représentations exactes de la  $T_{centrale}$ . Pendant l'exercice, en particulier dans un environnement chaud, le flux sanguin vers la peau augmente, ce qui provoque des sensations de chaleur, de transpiration et d'inconfort. Schlader et ses collègues (2011) ont déclaré qu'avant de commencer à faire de l'exercice, l'individu utilise sa  $T_{peau}$  et sa perception thermique comme déterminants de l'intensité de travail qu'il choisit lui-même. Des études antérieures ont montré que la  $T_{peau}$  et la fréquence cardiaque influencent également la perception de l'effort et du risque (Casa et al., 2007). Ainsi, les informations sur les perceptions thermiques devraient être incorporées dans la formation sur les signes de contrainte thermique.

La surveillance de la  $T_{peau}$  à plusieurs endroits (tête, poitrine, bras, poignet) semble fournir de meilleures estimations de la température de la  $T_{centrale}$  et de l'apparition d'un malaise dû à la chaleur, en particulier lorsqu'elle est combinée à d'autres mesures physiologiques. L'emplacement est important, car le gradient de la température de la peau par rapport à la température corporelle centrale diffère en fonction des types d'artères qui circulent à cet endroit, ainsi que de la proximité du site cutané par rapport aux structures centrales du corps (Taylor et al., 2014). Ce concept a conduit à la division des différents tissus corporels en « structures thermiquement stables, profondes (centrales) et plus variables, superficielles (enveloppe) » (Benedict et Slack, 1851; Jay et al., 2007; Kenny et Jay, 2013; Taylor et al., 2014). Par conséquent, les différentes parties de la peau sont irriguées par différents vaisseaux sanguins provenant de différents endroits des structures corporelles. En outre, certaines régions du corps, comme les mains et les pieds, présentent des caractéristiques exclusives qui leur

## TEMPÉRATURE CORPORELLE

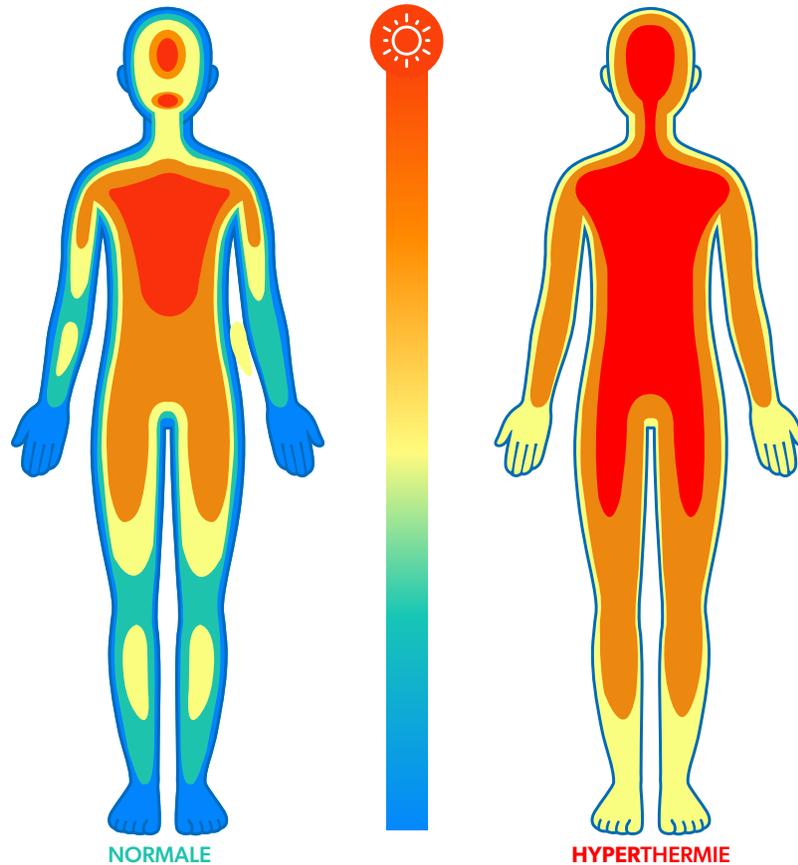


Figure 2. Cette figure illustre comment la température corporelle centrale du corps reste stable alors que les enveloppes qui l'entourent changent (deviennent plus chaudes) en relation avec la chaleur ambiante et la production/dissipation de chaleur interne. Cet effet a une incidence sur la différence entre les relevés  $T_{\text{peau}}$  et  $T_{\text{centrale}}$  et sur l'interprétation des données. Il a été démontré que la  $T_{\text{eau}}$  est en corrélation avec la direction de changement de la  $T_{\text{centrale}}$  pour tout site et des algorithmes sont ensuite appliqués pour estimer la  $T_{\text{centrale}}$ .

permettent d'agir comme des « radiateurs physiologiques » (Taylor, 2014; Taylor et al., 2014, 2021). La surveillance de la  $T_{\text{peau}}$  est donc une application courante de la surveillance du stress thermique sur le terrain. Toutefois, étant donné que les différents emplacements offrent des sensibilités différentes pour l'estimation de la  $T_{\text{centrale}}$ , les sections suivantes examinent les dispositifs qui mesurent en continu la  $T_{\text{peau}}$  sur la tête, la poitrine et le poignet.

### Surveillance de la température de la tête

La tête représente 7 % de la masse et de la surface totale du corps (Cross et al., 2008; Elabbassi et al., 2002; Hindle et al., 2015; James, 2013; Rasch et al., 1991; Shin et al., 2015; Wickwire et al., 2012). Sa grande surface, son faible volume de tissu adipeux sous-cutané et son système vasculaire étendu permettent une dissipation rapide de la chaleur (Cross et al., 2008; Elabbassi et al., 2002; Hindle et al., 2015;

James, 2013; Rasch et al., 1991; Shin et al., 2015; Wickwire et al., 2012).

La température du cerveau est un facteur critique qui affecte la prise de décision et l'activité motrice pendant l'exercice dans des conditions chaudes. Pendant l'exercice à des températures élevées, la production de chaleur dans le cerveau est estimée à  $7 \pm 2$  % plus élevée, tandis que la température du cerveau est estimée à  $0,2$  °C plus élevée que la  $T_{\text{centrale}}$ , en tant que mécanisme de protection contre la chaleur, pendant un exercice aérobique soutenu dans des conditions normales ou chaudes et humides (O'Hara et al., 2008).

Ainsi, le port d'un casque (ou d'un casque de protection) peut avoir un effet négatif sur la thermorégulation en réduisant le refroidissement par évaporation, convection et rayonnement. Compte tenu de l'impact potentiel de la conception du casque sur la thermorégulation, le choix du casque doit être soigneusement étudié, notamment en ce qui

concerne les caractéristiques permettant d'améliorer la dissipation de la chaleur (p. ex., l'aération). La tête est également un endroit accessible et non invasif pour surveiller la température dans les milieux professionnels où les travailleurs sont déjà tenus de porter un casque, car elle offre un emplacement pour l'insertion d'un dispositif de surveillance de la température.

Une thermistance, qui évalue la température comme un changement dans la résistance d'un matériau semi-conducteur, peut être insérée sous le rembourrage d'un casque standard pour surveiller en permanence la température de la tête tout en transmettant des données en temps réel à un assistant numérique personnel (ANP) portable de surveillance sur le terrain. Idéalement, le capteur devrait être encapsulé, afin de le protéger de l'influence de la transpiration et des températures ambiantes qui peuvent fausser les données (James, 2013; Mitchell et al., 2015; Wickwire et al., 2012).

Ces appareils évaluent la  $T_{\text{centrale}}$  à l'aide d'un algorithme propriétaire (formulé par le fabricant sur la base de protocoles de test et de validation internes). La précision et l'exactitude de certains modèles ont été testées dans des conditions de laboratoire, par rapport à une véritable mesure de  $T_{\text{rec}}$ , telle que la  $T_{\text{rec}}$ . La surveillance de la température de la tête, dans un casque et à l'abri de l'influence de la transpiration, est mieux corrélée avec les changements de la  $T_{\text{centrale}}$  que les autres mesures de la  $T_{\text{peau}}$  (à l'exception de la poitrine). Toutefois, cela ne se reflète pas systématiquement dans toutes les conditions de test ou de travail (voir Falcone et al., 2021).

En résumé, la surveillance de la température de la tête peut offrir un suivi en temps réel et certains dispositifs ont fait preuve de précision et d'une bonne corrélation avec la  $T_{\text{centrale}}$  lors d'essais en laboratoire (James, 2013; Mitchell et al., 2015; Wickwire et al., 2012). Toutefois, il convient de tenir compte des limites liées à des facteurs tels que la transmission à longue distance des données de la température et la durée de vie des piles.

## Méthodes de mesure au niveau de la poitrine

La poitrine est la zone du corps la plus proche des structures internes du corps et constitue donc un endroit idéal pour mesurer la  $T_{\text{peau}}$  en tant qu'approximation de la  $T_{\text{centrale}}$ . Ce site propose un jumelage avec des appareils qui mesurent avec précision la FC, la fréquence respiratoire et la VFC. Toutefois, contrairement à la tête, où les dispositifs peuvent être fixés au casque, la surveillance de la

poitrine exige que les travailleurs portent un dispositif supplémentaire sous leurs vêtements de travail, généralement sous la forme d'une sorte de sangle portée autour de la poitrine. Différentes technologies ont été mises au point à ce jour pour mesurer la  $T_{\text{peau}}$  du thorax.

Les moniteurs thoraciques ne sont pas invasifs et sont fixés à la poitrine soit par une sangle élastique, soit par des coussinets adhésifs de qualité médicale, afin de fournir une mesure continue de la  $T_{\text{peau}}$ . Les dispositifs sont capables de surveiller en permanence et de transmettre des données en temps réel à des dispositifs secondaires. La durée de vie de la batterie sera un élément à prendre en compte, tout comme le confort, les réactions cutanées au port constant et l'hygiène de l'appareil liée à la durée du port. Ces appareils ont d'abord été développés pour les athlètes, les entraîneurs et les scientifiques du sport afin de surveiller la  $T_{\text{centrale}}$  dans le but d'améliorer les performances, mais ils ont depuis été adaptés aux travailleurs et aux environnements professionnels.

Des études en laboratoire ont été menées sur certaines marques et ont validé leurs estimations de la  $T_{\text{centrale}}$  par rapport à la  $T_{\text{rec}}$  (Eggenberger et al. 2018; Kim et Lee 2019). Falcone et ses collègues (2021) ont émis l'hypothèse que la corrélation plus élevée était probablement due à l'isolement des capteurs de l'environnement par les vêtements pour la poitrine. En outre, la littérature indique qu'en général, la précision des capteurs de flux thermique de l'appareil pour estimer la  $T_{\text{centrale}}$  est bonne. Par exemple, Zhang et ses collègues (2015) ont examiné l'exactitude, la précision et la réaction d'un ensemble de capteurs de flux de chaleur; les résultats ont indiqué une compétence accrue en matière de temps de réaction pour ces capteurs, ainsi qu'une exactitude et une précision élevées.

Les lieux de travail qui envisagent de mettre en place un dispositif de surveillance de la poitrine dans le cadre d'un système de surveillance du stress thermique doivent tenir compte de plusieurs éléments. Tout d'abord, l'exactitude et la précision des capteurs de flux thermique n'ont pas été étudiées en milieu professionnel. Cependant, des dispositifs similaires ont été portés par des pompiers en continu sur le terrain dans le cadre d'une étude (Robertson, 2015), et par des Chefs de file lors d'un voyage de camping prolongé (S. Ritchie, Laurentian University: Personal Communication). Ces dispositifs n'ont pas bien résisté sur le terrain,

principalement en raison de la défaillance de la sangle ou de l'irritation de la peau due au port chronique de timbres médicaux adhésifs. En outre, peu d'attention a été accordée aux travailleuses qui éprouvent des difficultés à porter leur soutien-gorge sur le harnais, ce qui peut entraîner une gêne plus importante que pour les travailleurs masculins.

Il est important de noter que presque aucune des études réalisées à ce jour sur la prédiction de la  $T_{\text{centrale}}$  à partir de la  $T_{\text{peau}}$  n'a porté sur des femmes (voir *Falcone et al., 2021*).

Cependant, grâce à un dialogue collaboratif avec le fabricant, des ceintures spécifiques à la profession pourraient contribuer à résoudre ces problèmes. Ainsi, les entreprises pourraient consulter leur service de recherche et développement pour collaborer avec les développeurs afin de concevoir un dispositif compatible avec les travailleuses et l'environnement professionnel. En outre, compte tenu de l'utilisation limitée de la technologie Bluetooth sur le terrain, ces dispositifs seront soumis à des contraintes concernant l'autonomie de la batterie et la distance de transmission, bien qu'il existe une technologie basée sur les satellites (*Banos et al., 2014; Equivital, 2023*).

En résumé, la surveillance de la température thoracique peut offrir un suivi en temps réel et certains dispositifs ont donné des résultats prometteurs lors d'essais en laboratoire. Il convient toutefois de tenir compte des limites liées à des facteurs tels que le confort, la transmission de données de température sur de longues distances et la durée de vie de la batterie.

## Méthodes de mesure au niveau du poignet

Les dispositifs portés au poignet sont considérés comme faciles à utiliser et à porter, souvent dans une gamme de prix inférieure, ce qui rend leur utilisation plus répandue (*Cosoli et al., 2020; Kamišalić et al., 2018; Sim et al., 2016*). Les meilleurs modèles de bracelets sont généralement conçus pour surveiller la fréquence cardiaque, la dépense énergétique et le sommeil, mais certains modèles contiennent également des capteurs de température corporelle. Cependant, la faisabilité de l'utilisation de la  $T_{\text{peau}}$  au poignet dans le but de contrôler la sensation thermique subjective et d'estimer la  $T_{\text{centrale}}$  est actuellement limitée (*Choi et Loftness, 2012; Jacquot et al., 2014; Sim et al., 2016*).

L'avantage des dispositifs portés au poignet est que le suivi des données se fait en temps réel et peut être visualisé par le porteur sur la face du dispositif. Ils

peuvent également se connecter à d'autres systèmes de surveillance via Bluetooth. Ainsi, les données relayées peuvent être analysées par un système secondaire pour décider si l'état thermique ou de stress des utilisateurs a changé par rapport aux valeurs prédéfinies (*Appelboom et al., 2014; Dias et Paulo Silva Cunha, 2018; Lukowicz et al., 2002; Pantelopoulos et Bourbakis, 2010; Scheffler et Hirt, 2005*). Cependant, la capacité à établir une corrélation entre la  $T_{\text{peau}}$  et la  $T_{\text{centrale}}$  rapportées n'a pas été couronnée de succès dans les tests de laboratoire (*Anliker et al., 2004*). Cela est dû en partie à l'emplacement du capteur (poignet) ainsi qu'à la variabilité de sa température par rapport à celle de la  $T_{\text{centrale}}$  en raison de différents facteurs tels que la température ambiante, l'activité physique et l'état de santé (*Anliker et al., 2004*). D'autres modèles portés sur le corps qui tentent d'estimer la  $T_{\text{centrale}}$  sont équipés d'autres capteurs (par exemple, de la FC, de la dépense énergétique estimée, du flux sanguin, de la réaction galvanique de la peau, etc.) mais ne parviennent pas à démontrer la fiabilité de bon



nombre de ces variables secondaires, y compris la  $T_{\text{peau}}$  (*Bai et al., 2016; Cosoli et al., 2020; Ferguson et al., 2015; Lee, 2013; Storm et al., 2015; Tucker et al., 2015*).

L'utilisation commerciale des dispositifs portés au poignet a progressé au cours des dernières années et ils sont bien acceptés par le public en tant que dispositifs de surveillance de la santé. Ainsi, les lieux de travail pourraient toujours envisager d'utiliser la technologie du port au poignet comme outil de suivi personnel des données de base pour aider à l'évaluation des symptômes personnels et au dépistage des individus sur le lieu de travail pour la prévention et l'atténuation du stress dû à la chaleur. Bien que les mesures de la  $T_{\text{peau}}$  au poignet soient une mauvaise estimation de la  $T_{\text{centrale}}$ , elles peuvent encore être utiles sur le lieu de travail :

Tableau 3. Évaluation sommaire des différentes mesures et estimations de la  $T_{centrale}$  en fonction de : la précision, la fiabilité, la praticité, le flux de données et le coût.

		Précis	Fiable	Pratique pour une utilisation sur le terrain	Flux de données en temps réel	Coût relatif
<b>Mesures directes de <math>T_{centrale}</math> (surveillance continue)</b>	Rectale	☒	☒	☒	☒	Bas
	Œsophagienne	☒	☒	☒	☒	Élevé
	Pulmonaire	☒	☒	☒	☒	Élevé
	Capsule téléométrique	☒	☒	☒	Possible	Élevé
<b>Estimations de <math>T_{centrale}</math> (surveillance périodique)</b>	Voie orale / sublinguale	☒	☒	☒	☒	Bas
	Thermomètres à cristaux liquides (temporal)	☒	☒	☒	☒	Bas
	Enregistreurs de données autonomes (temporaires)	☒	☒	☒	☒	Bas
	TISC (temporal)	☒	☒	☒	☒	Bas
	Axillaire (aisselle)	☒	☒	☒	☒	Bas
	Auriculaire	☒	☒	☒	☒	Bas
<b>Estimations of <math>T_{centrale}</math> (surveillance continue)</b>	Surveillance de la température de la tête (peau)	☒*	☒	☒	☒	Modéré à élevé
	Surveillance de la température thoracique (peau)	☒*	☒	☒	☒	Modéré à élevé
	Porté au poignet (peau) Contrôle de la température	☒	☒	☒	☒	Modéré à élevé
	Porté au bras (peau) Contrôle de la température	☒	☒	☒	☒	Modéré à élevé

\* Des études comparant la surveillance continue de la  $T_{peau}$  sur ces sites ont montré une bonne corrélation avec la température corporelle centrale (ce qui signifie qu'elles changent de manière fiable dans la même direction que la  $T_{centrale}$ ). Toutefois, à un moment donné, la  $T_{peau}$  peut être supérieure ou inférieure à la  $T_{centrale}$ . Ces estimations sont donc meilleures que celles d'autres sites, mais ne sont pas aussi précises que les mesures directes de la  $T_{centrale}$ .

1) probablement uniquement dans le contexte de mesures hybrides (voir la section suivante); et 2) le lieu de travail devra peut-être s'associer à une entreprise qui a déjà validé ses autres mesures pour ajouter un capteur de la  $T_{peau}$  du poignet. Enfin, pour des raisons pratiques, le lieu de travail devrait prendre en compte les aspects de sécurité liés au port d'un dispositif au poignet et déterminer si les travailleurs sont disposés à remplacer les dispositifs qu'ils portent actuellement au poignet.

## Surveillance hybride : surveillance de la fréquence cardiaque et de la variabilité de la fréquence cardiaque

La mesure d'autres facteurs physiologiques peut fournir des informations supplémentaires qui peuvent aider les lieux de travail à surveiller et donc à atténuer le stress.

thermique, soit en tant que mesure autonome, soit dans le contexte des mesures de la température corporelle. Deux variables clés bien établies sont utilisées : la FC et la VFC.

La FC est le nombre de battements cardiaques par unité de temps (généralement en minutes) et la VFC est définie comme la variation de l'intervalle de temps (en millisecondes) entre deux battements cardiaques consécutifs. Dans un cœur normal et sain, la durée des battements cardiaques varie d'un battement à l'autre. La FC et la VFC sont influencées par l'exercice, l'arythmie sinusale respiratoire, les réactions hormonales, les processus métaboliques, les processus cognitifs, le stress, la récupération et la température ambiante; pour les besoins de ce rapport, nous nous concentrerons sur la chaleur.

### Fréquence cardiaque

Il est bien documenté que le stress thermique

passif augmente la FC (Crandall et Wilson, 2015). La recherche montre une augmentation de la FC de  $7,15 \pm 0,19$  bpm par  $1^\circ\text{C}$  d'élévation de la température interne du corps au repos. Ces changements sont dus à des augmentations directes de la température du cœur et à l'activation du système nerveux sympathique (augmentation de la FC) avec le retrait du système nerveux parasympathique (diminution de la FC) du cœur (Liu et al., 2015; Ren et al., 2011; Yamamoto et al., 2007). Lors d'expositions environnementales à la chaleur, le système cardiovasculaire doit également compenser les demandes accrues d'approvisionnement en sang associées au besoin accru de dissipation de la chaleur, ce qui nécessite une augmentation du flux sanguin vers le système vasculaire de la peau. Toutefois, l'augmentation du flux sanguin vers la peau peut s'accompagner d'une diminution relative du flux sanguin vers d'autres organes internes. En plus de la déshydratation, la diminution du retour du sang vers le cœur nécessite une augmentation de la fréquence cardiaque pour maintenir l'apport d'oxygène dans le corps. Il convient de noter que les travailleurs soumis à des exigences physiques élevées font travailler leur cœur encore plus fort lorsqu'ils sont déshydratés, ce qui peut altérer la réaction cardiovasculaire aux changements posturaux. La diminution de la tolérance orthostatique (changements de posture) et de la circulation sanguine cérébrale due au stress thermique peut entraîner une syncope (perte de conscience causée par une baisse temporaire de la quantité de sang qui afflue vers le cerveau).

En général, la fréquence cardiaque est plus élevée lorsque l'on travaille dans la chaleur, car le cœur travaille plus fort pour soutenir les mécanismes de perte de chaleur et maintenir la  $T_{\text{centrale}}$  dans une fourchette normale. Ainsi, dans le cadre de l'évaluation de la maladie due à la chaleur, la surveillance de la température à un stade précoce (c.-à-d. en cas d'éruption cutanée due à la chaleur, de crampes de chaleur, de syncope due à la chaleur et même d'épuisement dû à la chaleur) peut ne pas permettre d'observer des changements significatifs de la  $T_{\text{centrale}}$ ; cependant, la FC augmente considérablement et peut donc être utilisée comme signe d'alerte précoce pour la prévention.

La FC moyenne au repos est de 60 à 80 battements par minute (bpm) (bien que certains athlètes aient des fréquences au repos aussi basses que 30 à 40 bpm). La FC au repos varie en fonction de nombreux facteurs, notamment l'âge, la condition physique,

l'environnement, les émotions, l'état de santé et la prise de médicaments (Arena et al., 2016; Ross et al., 2010). La FC maximale d'une personne est le nombre le plus élevé de battements que le cœur peut supporter, exprimé en battements par minute (bpm). La FC maximale peut être estimée en calculant votre FC maximale prédite par l'âge (FCMPA) : en utilisant soit l'estimation simple de Fox «  $220 - \text{âge}$  » (Fox et al., 1971), soit le calcul plus robuste de Tanaka «  $208 - (0,7 * \text{âge})$  » (Tanaka et al., 2001). Une autre référence utile est la FC maximale de 80 %, car travailler ou s'exercer à 80 % de sa FC maximale est « dur à très dur » et il n'est pas recommandé de le maintenir pendant de longues périodes (Arena et al., 2016). Moran et ses collègues (1998) ont constaté que la  $T_{\text{centrale}}$  suit une tendance similaire à la FC, et dans des expériences impliquant 100 jeunes adultes, une  $T_{\text{rec}}$  de  $38^\circ\text{C}$  était associée à une FC de 140 bpm, tandis qu'une  $T_{\text{rec}}$  de  $38,6^\circ\text{C}$  était associée à une FC de 159 bpm pendant un exercice à la chaleur à 25-30 % de l'effort maximum.



Les auteurs ont déclaré que la  $T_{\text{rec}}$  reflète le stockage de la chaleur corporelle, qui est élevé lorsque l'on travaille à la chaleur, et que la FC reflète les exigences élevées du système circulatoire. Il a été régulièrement démontré qu'il existe une relation directe entre la  $T_{\text{rec}}$  et la FC dans des conditions de stress thermique. En fait, plusieurs études ont considéré la FC comme une seule donnée pour estimer la  $T_{\text{centrale}}$ . Comme l'indiquent Falcone et ses collègues (2021), quatre études (Buller et al., 2013, 2015; Hunt et al., 2019; Seo et al., 2016) ont estimé la  $T_{\text{centrale}}$  à partir des mesures de la FC en utilisant le filtre de Kalman « ... obtenant des résultats raisonnablement prometteurs en termes de performance ».

Cet algorithme a également été testé dans de multiples conditions, notamment l'environnement, les vêtements, l'hydratation, l'activité et l'acclimatation (Buller et al., 2013, 2015). La méthode semble présenter une concordance similaire avec la  $T_{centrale}$  mesurée dans les phases d'exercice et de récupération (Hunt et al., 2019), mais semble sous-estimer la  $T_{centrale}$  pour les faibles rythmes de travail (Buller et al., 2013; Seo et al., 2016) et la surestimer pour les rythmes de travail très élevés (Buller et al., 2013). L'application de ces lignes directrices et l'intégration de variables physiologiques personnelles offrent une approche potentiellement significative de la prévention du stress thermique par le biais de la surveillance de la FC.

**En résumé, il existe actuellement des preuves de l'utilisation réussie de la surveillance de la FC de la main-d'œuvre dans les cas où le coup de chaleur est un risque, principalement en tant que guide pour alerter les travailleurs de la nécessité de prendre des mesures actives pour se rafraîchir ou faire une pause afin d'éviter les risques pour la santé (Ruas et al., 2020).**

## Variabilité de la fréquence cardiaque

Il est bien documenté que le stress thermique passif diminue la VFC chez les hommes en bonne santé (Carrillo et al., 2016). Cette section examine le rôle potentiel de la VFC en tant qu'indicateur de la prévention du stress thermique.

La VFC fait référence à la variation de l'intervalle R-R des battements cardiaques séquentiels (c.-à-d. l'intervalle entre l'initiation d'un battement et l'initiation du battement suivant) et indexe la fonction neurocardiaque telle qu'elle est dictée par un système de communication cœur-cerveau et des voies dynamiques du système nerveux autonome (Carrillo et al., 2016). La mesure de la VFC est une méthode non invasive de surveillance de la modulation autonome cardiaque et constitue un indicateur utile de la santé et du bien-être cardiovasculaires.

Dans ce contexte, il est peut-être possible d'utiliser la mesure de la VFC sur le lieu de travail, non pas comme un prédicteur immédiat d'un coup de chaleur naissant, mais comme une indication de l'accumulation chronique nocive de facteurs de stress, y compris le stress thermique, qui peut accroître la prédisposition des travailleurs à un coup de chaleur, alors que dans d'autres circonstances, ils n'auraient pas été à risque (Flouris et al., 2014). Dans la pratique, la mesure et l'interprétation des données VFC sont émergentes et les applications se multiplient dans la littérature; en

même temps, l'interprétation des données VFC reste un défi et nécessiterait, au minimum, un système logiciel capable d'interpréter les données, en plus de la formation du personnel à l'utilisation du logiciel.

L'évaluation de la VFC exige que les intervalles R-R (pics de signaux sur l'électrocardiogramme pour évaluer les intervalles entre les battements cardiaques) soient mesurés en continu, et que ces données soient analysées par un logiciel spécialisé utilisant des algorithmes pour calculer et comparer les différences de longueur des battements sur des périodes de temps spécifiques. C'est pourquoi les données VFC peuvent être considérées sur des durées variables qui peuvent être très courtes (p. ex. 2 minutes) ou très longues (p. ex. 24 heures). Les mesures de la VFC sont présentées à l'aide de trois types d'analyse : domaine temporel; domaine fréquentiel; et mesures non linéaires (Shaffer et Ginsberg, 2017). Voir l'[annexe F](#).

Compte tenu des informations ci-dessus, les mesures de la VFC sont généralement utilisées dans les études de recherche sur les lieux de travail comme indication des facteurs de stress sur le lieu de travail et/ou d'une récupération adéquate, en appliquant des calculs dans le domaine du temps et de la fréquence. Par exemple, des mesures prises sur des périodes prédéterminées, comme à la fin d'un quart de travail ou au petit matin, pourraient être utilisées pour évaluer l'état de préparation et de récupération des travailleurs. Des mesures répétées, dans le contexte des avertissements de santé environnementale, pourraient également guider les décideurs en milieu de travail quant aux implications de jours prolongés de contrainte thermique ou d'une mauvaise récupération, afin d'améliorer les lignes directrices en matière de politiques. Par exemple, Jeklin et ses collègues (2021) ont examiné si la VFC pouvait fournir une mesure de la fatigue accentuée et de la baisse de performance cognitive dans un environnement de travail par quarts. Les valeurs de VFC ont été mesurées chaque matin au réveil et ont montré que la VFC avait une relation inverse avec la fatigue et le temps de sommeil total (Jeklin et al., 2021). Cette étude soutient l'application potentielle pour les lieux de travail de l'utilisation de la VFC comme mesure répétée (p. ex. au réveil avant une journée de travail) pour évaluer les effets de la fatigue accumulée et l'augmentation possible de la susceptibilité au stress thermique et aux événements liés à la chaleur.

En résumé, bien que l'application immédiate de la saisie des données VFC pour prévenir le stress

thermique en soi soit limitée, l'incorporation de cette mesure comme moyen de suivre la fatigue, le stress ou les troubles autonomes pourrait être envisagée dans le cadre d'une stratégie à long terme visant à développer des réponses nuancées aux besoins des travailleurs.

## Technologie de surveillance de la FC et de la VFC (photopléthysmographie vs électrocardiogramme)

Étant donné que la surveillance de la FC peut constituer un outil important pour la gestion du stress thermique et que la surveillance de la VFC peut orienter les efforts futurs, il est important que les lieux de travail comprennent les capacités des appareils qui utilisent différentes technologies pour mesurer la FC et le VFC afin de pouvoir choisir un appareil en toute connaissance de cause. Les deux capteurs essentiels utilisés dans les dispositifs de surveillance de la FC et de la VFC sont la photopléthysmographie (PPG) et l'électrocardiogramme (ECG).

La PPG fait appel à des capteurs optiques dotés d'une petite diode électroluminescente (DEL) qui est projetée sur la peau pour détecter les changements volumétriques dans les veines et les capillaires sous la peau. Étant donné que chaque battement de cœur entraîne une augmentation transitoire de la pression artérielle, et donc du volume, ce schéma peut être mesuré pour obtenir la FC. La FC par PPG est mesurée en comptant le nombre d'ondes de pression artérielle par minute, tandis que la VFC est calculée en fonction du temps écoulé entre chaque onde (Castaneda et al., 2018). L'utilisation efficace de la PPG nécessite un contact direct et continu avec la peau.

En outre, la PPG ne peut être utilisée que pour calculer les mesures du domaine temporel, et non les mesures du domaine fréquentiel de la VFC.

En revanche, l'ECG détecte l'activité électrique du cœur au moyen d'électrodes en contact direct avec la peau. Les méthodes basées sur l'ECG détectent directement les ondes R dans le complexe de fréquence cardiaque QRS et, à partir de là, la fréquence des ondes R et la période entre les ondes R permettent de dériver la FC et la VFC, respectivement.

Pour que la conduction de ces signaux bioélectriques soit efficace, il faut qu'il y ait de l'humidité entre la peau et l'électrode, généralement due à la sueur.

Lorsque le cœur bat, les signaux électriques provenant du cœur sont conduits à travers les fluides corporels sur la peau où ils peuvent être détectés par les électrodes. Les électrodes sont souvent intégrées dans des sangles de poitrine ou des timbres cutanés, c'est pourquoi ces

dispositifs doivent être mouillés pour être utilisés, ou utilisés avec un gel conducteur pour assurer la détection des signaux. L'emplacement de l'électrode est important et doit être porté aussi près que possible du cœur, car l'ECG lit directement



l'activité électrique du cœur. Ces capteurs peuvent être inconfortables à porter pendant une période prolongée et la qualité des données collectées peut être influencée par des artefacts de mouvement, qui comprennent le bruit causé par un mouvement soudain du corps qui interfère avec le signal ECG (Castaneda et al., 2018).

Les appareils ECG sont considérés comme l'étalon-or pour la mesure de la FC et de la VFC, car ils mesurent directement l'activité bioélectrique du cœur, ont des taux d'échantillonnage plus élevés et peuvent mesurer l'ensemble du cycle QRS, plutôt que seulement le R estimé. Les appareils PPG qui mesurent la FC ont démontré une validité acceptable par rapport à la mesure ECG de la FC pour la plupart des activités courantes (revue par Zhang et al. 2020). En revanche, la VFC mesurée par PPG ne s'est avérée suffisamment précise que pour les sujets sains (et le plus souvent jeunes) au repos (voir Schäfer et Vagedes, 2013).

## Types de technologies portables FC/VFC

Les dispositifs portables de surveillance de la FC/VFC peuvent être divisés en deux catégories : l'ECG porté sur la poitrine et les montres portées sur le bras ou le poignet, utilisant la PPG. En raison des différences technologiques décrites ci-dessus, les dispositifs de surveillance thoracique sont considérés comme plus fiables, mais moins pratiques que les dispositifs portés au bras/poignet (Bai et al., 2016; Cosoli et al., 2020; Dias et Paulo Silva Cunha, 2018; Lee, 2013).

## Portées à la poitrine

L'exactitude et la précision des technologies ECG portées sur la poitrine ont été testées dans de nombreux contextes de recherche portant sur les paramètres physiologiques en temps réel, et il a été démontré qu'elles permettaient de recueillir efficacement des mesures physiologiques fiables pour surveiller la santé des travailleurs (Gatti et al., 2013; Gatti et al., 2014). D'autres études ont également montré qu'ils peuvent fournir des mesures précises dans des environnements de travail chauds et difficiles (p. ex., la construction) (Lee et al., 2015; Moohialdin et al., 2018) sans causer d'inconvénients personnels (Lee et al., 2015). Assurer le confort sans interruption du travail est une caractéristique importante de tout dispositif portable, et ces types de technologie ont le potentiel de le faire (p. ex., Buller et Karis, 2007).

Les textiles intelligents sont définis comme des textiles capables de détecter des stimuli environnementaux via des sources mécaniques, thermiques, chimiques, électriques ou autres, intégrées dans le tissu (Ahrens, 2008; Dias et Paulo Silva Cunha, 2018). Les textiles intelligents peuvent être transformés en vêtements qui surveillent les mesures physiologiques, y compris la FC et la VFC, et offrent un niveau de confort et d'ajustement que n'offrent pas les autres technologies portables (Ahrens, 2008; Dias et Paulo Silva Cunha, 2018). Toutefois, on ne sait pas si ces vêtements créeraient une charge supplémentaire en matière d'EPI. En outre, le port quotidien du même vêtement n'est pas pratique pour les travailleurs, en particulier ceux qui ont peu d'occasions de nettoyer leurs vêtements (p. ex., les pompiers forestiers). En résumé, bien que ces appareils soient à la fois exacts, précis et confortables à porter, des problèmes pratiques peuvent entraver leur utilisation par les travailleurs.

Une autre méthode non invasive basée sur l'ECG pour surveiller la FC et la VFC est l'utilisation de timbres adhésifs. Les timbres adhésifs peuvent être portés sur la peau et sont capables de mesurer avec précision la FC et la VFC, ainsi que les activités de mouvement, la  $T_{centrale}$  estimée et la fréquence respiratoire (Hernandez et al., 2019; Killian et al., 2021; Razjouyan et al., 2017). Ils peuvent se connecter sans fil via Bluetooth et enregistrer plus de 500 heures de données. Cependant, l'utilisation quotidienne des timbres provoque souvent des irritations et des douleurs cutanées.

## Dispositifs portés au bras ou au poignet

Les appareils portés au bras ou au poignet utilisent principalement la PPG pour mesurer la FC et la VFC. Il est donc connu que des facteurs tels que les mouvements de la main, les poils du poignet et la sueur peuvent affecter les résultats des mesures de tout dispositif portable porté au bras ou au poignet (Dias et Paulo Silva Cunha, 2018; Gillinov et al., 2017); par conséquent, il existe une limitation inhérente à toutes les options de cette catégorie.

Cependant, ces appareils peuvent se connecter à différentes applications pour smartphone et ont généralement une messagerie visible sur la face avant de l'appareil. Pour ces raisons, les travailleurs peuvent préférer ces appareils en raison de leur nature interactive, de leur familiarité et de leur utilisation potentielle pour des objectifs multiples, en plus de la surveillance du stress thermique, tels que des objectifs de remise en forme, de sommeil et de récupération.

Certains dispositifs portés au bras ou au poignet sont plus précis que d'autres, il est donc important de choisir un dispositif qui a été testé en laboratoire par un établissement externe (Düking et al., 2020; Fuller et al., 2020; Germini et al., 2022; Koerber, et al., 2023; Martín-Escudero et al., 2023).

Les dispositifs portés au bras sont plus récents que les dispositifs portés au poignet et peuvent présenter des avantages en termes de sécurité, d'hygiène et de confort, du point de vue du point d'usure et d'un meilleur contact avec la peau (par rapport aux dispositifs portés au poignet). Cependant, peu d'études ont été menées sur ces dispositifs et, comme pour les autres dispositifs portés sur le corps, il est difficile/impossible de voir l'écran du dispositif et il faut donc un dispositif secondaire (p. ex. un smartphone) pour envoyer les données afin qu'elles soient visualisées ou signalées par des messages haptiques (p. ex. des alertes vibratoires ou sonores).

## Un dernier commentaire

Comme présenté dans le début de ce guide, selon l'ACGIH (2022), le stress thermique peut être défini par les conditions suivantes :

- Fréquence cardiaque soutenue (pendant plusieurs minutes) supérieure à 180 battements par minute (bpm) moins l'âge de l'individu en années (180 - âge), pour des individus en bonne santé ayant une réaction cardiaque normale.
- Température corporelle centrale mesurée ou estimée augmentant de plus de 1 °C par rapport à la température avant le travail, si la température avant le travail est inférieure à 37,5 °C.
- Fréquence cardiaque de récupération une minute après un effort maximal supérieure à 120 bpm.
- L'exposition doit cesser en cas de signes et symptômes d'épuisement dû à la chaleur ou de coup de chaleur ou avec une demande d'arrêt, indépendamment de ce que peut indiquer la surveillance physiologique.

Les organisations devraient chercher à sélectionner des outils validés qui mesurent et appliquent l'une ou l'autre ou l'ensemble de ces recommandations.

Idéalement, bien que la surveillance d'un seul marqueur puisse être utile (p. ex., la fréquence cardiaque uniquement), la littérature montre que plusieurs paramètres physiologiques (p. ex., la  $T_{\text{peau}}$  et la fréquence cardiaque) sont nécessaires pour mieux prédire la température corporelle centrale (Niedermann et al., 2014). De plus, des méthodes robustes d'apprentissage automatique permettront bientôt de mettre au point des algorithmes de prédiction de la température corporelle centrale du corps plus précis, plus fiables et plus personnalisés en incluant des données supplémentaires sur les caractéristiques du travailleur, l'intensité du travail et le milieu environnant. Des capteurs supplémentaires mesurant et intégrant des indices tels que l'indice WBGT, l'intensité du travail et les dossiers médicaux électroniques peuvent permettre de prévenir davantage les maladies liées à la chaleur et d'accroître la disponibilité et la rapidité d'accès aux données lors d'événements thermiques critiques, améliorant ainsi les processus de prise de décision pour les organisations (examiné dans Dolson et al. 2022).

# LES LIMITES DES MONITEURS PHYSIOLOGIQUES SUR LE LIEU DE TRAVAIL

## Limites de l'utilisation des appareils sur le lieu de travail

Cette section identifie les défis associés aux outils de suivi qui doivent être pris en compte lors du choix d'un ou de plusieurs outils et abordés lors de la mise en œuvre. Les questions identifiées sont classées par ordre alphabétique.

## Réglementation de l'entreprise ou du lieu de travail

Certaines réglementations de l'entreprise ou du lieu de travail interdisent l'utilisation d'appareils de surveillance sur le lieu de travail. Par exemple, les EPI requis sur un lieu de travail (p. ex., casques de protection, gants, chemises et vestes réfléchissantes) peuvent empêcher le port de certains dispositifs. En outre, certaines tâches professionnelles peuvent empêcher la vérification des appareils pour des raisons de sécurité (c.-à-d. en raison de la perte d'attention liée à la vérification de la technologie).

## Interprétation des données

Les dispositifs de surveillance peuvent fournir un grand nombre d'informations différentes, dont certaines peuvent être difficiles à interpréter sans certaines connaissances (*Spook et al., 2019*). Une formation supplémentaire peut être nécessaire pour que les travailleurs soient en mesure d'interpréter et d'utiliser les informations de manière appropriée.

## Propriété des données et politique en matière de protection de la vie privée/de l'information sur l'entreprise

Une limitation de tout système qui utilise la collecte et/ou la transmission de données vers un site secondaire sera la difficulté liée à l'interprétation et à la gestion juridique des données. Bien que la plupart des entreprises qui vendent ces systèmes proposent une interprétation personnalisée des données, toute organisation qui autorise l'accès à une deuxième source (c.-à-d. outre le travailleur lui-même) devra définir une politique et des pratiques pour la mise en œuvre de cet équipement.

Ces politiques doivent préciser « qui » sera responsable du contrôle des données et « comment » les incidents seront gérés.

Les travailleurs doivent également savoir que ces services téléchargent des données sur des serveurs qui sont détenus et fournis par la société de services (*Paul et Irvine, 2014*). De plus, cette collecte généralisée de données a des implications éthiques : qui a accès à ces données physiologiques personnelles, comment et pendant combien de temps elles seront conservées, et si elles seront utilisées à d'autres fins. Jusqu'à présent, il s'agit d'un obstacle majeur à la mise en œuvre de ce type de système de surveillance de la sécurité à grande échelle, sauf dans le cadre d'opérations militaires. Il est important de lire les sections « Vie privée de l'utilisateur » et « Sécurité des données » des conditions générales, ainsi que toute politique de confidentialité spécifique fournie par la société de services pour l'appareil de surveillance de la santé choisi. Ces politiques informent l'utilisateur de ses droits et précisent si ou comment les données peuvent être consultées ou partagées par la société de services (*Paul et Irvine, 2014*).

Pour ces raisons, certaines entreprises choisissent des technologies qui ne permettent qu'au travailleur individuel d'accéder aux données, avec éventuellement un système d'alerte de sécurité prioritaire vers un superviseur sur place en cas de perte de connaissance ou d'alerte d'événement imminent. Ces systèmes nécessitent une formation des travailleurs à l'utilisation et à l'interprétation des données, ainsi qu'une formation aux signes/symptômes et à la perception personnelle de la chaleur et de la FC. Les travailleurs devront également savoir comment entretenir l'équipement et l'utiliser dans le cadre d'un programme de gestion du stress thermique (PGST) complet.

## Feedback delivery

Les dispositifs qui fournissent un retour d'information en temps réel peuvent ne fournir le signal que d'une seule manière (p. ex. tactile ou visuelle) et peuvent ne pas convenir à tous les lieux de travail.

Par exemple, les signaux de retour tactiles, tels qu'une vibration, peuvent ne pas être ressentis lors de la manipulation de certains matériaux ou du travail sur certaines machines (Spook et al., 2019), tandis que le retour visuel peut être bloqué si l'appareil est sous un vêtement/EPI.

En outre, il peut arriver qu'un retour d'information immédiat détourne l'attention de la tâche à accomplir, ce qui peut constituer un risque pour la sécurité.

## Contrôler la validité et la fiabilité

Les technologies permettant d'évaluer la santé physique et psychologique sont à différents stades de développement et évoluent constamment. Au fur et à mesure que de nouvelles technologies et de nouveaux dispositifs sont développés, il est important d'évaluer la validité du dispositif, y compris sa capacité à évaluer de manière précise et exacte la fonction prévue par rapport à la norme de mesure la plus élevée. Certains dispositifs de surveillance de la santé ont fait l'objet de tests indépendants afin de déterminer leur fiabilité (résultats cohérents) et leur validité (mesures exactes de ce qu'elles sont censées mesurer).

**Taille et poids du dispositif** La taille (dimensions et poids), l'emplacement et l'adaptation des dispositifs doivent être pris en compte lors de leur déploiement sur le lieu de travail. Les dispositifs ne doivent pas entraver les actions d'une personne ou sa capacité à accomplir ses activités professionnelles quotidiennes.

**Facilité d'utilisation du système** La facilité d'utilisation du système est importante pour l'acceptation par l'opérateur. Les technologies portables doivent toujours être testées sur le terrain, car des facteurs spécifiques au site ou à l'utilisateur peuvent modifier la facilité d'utilisation et l'acceptation d'un dispositif (Xing et al., 2020). Les aspects importants de la facilité d'utilisation sont le confort, la fonctionnalité, la perception de l'utilité et la facilité d'utilisation. Cependant, il existe sur le marché un grand nombre de dispositifs qui n'ont pas été correctement testés (Peake et al., 2018). Cela est principalement dû à la popularité et à la demande de ces dispositifs, qui poussent les entreprises à produire et à mettre sur le marché des dispositifs plus rapidement que les chercheurs ne peuvent les valider (Bunn et al., 2018; Carrier et al., 2020; Knowles et al., 2018). Il convient également de noter que même si les dispositifs ont été validés, ils peuvent ne pas produire les mêmes résultats dans tous les environnements de travail.

## Robustesse

Tous les appareils ne sont pas adaptés à tous les lieux de travail. Par exemple, tous les appareils ne sont pas

résistants à l'eau, aux manipulations brutales, aux radiations, aux chocs, à la saleté ou à d'autres éléments présents sur le lieu de travail (Spook et al., 2019). Il convient de noter que la plupart ne sont pas certifiés intrinsèquement sécuritaires, ce que certains lieux de travail exigeraient (p. ex. dans les mines).

## Taille et poids du dispositif

La taille (dimensions et poids), l'emplacement et l'adaptation des dispositifs doivent être pris en compte lors de leur déploiement sur le lieu de travail. Les dispositifs ne doivent pas entraver les actions d'une personne ou sa capacité à accomplir ses activités professionnelles quotidiennes.

## Facilité d'utilisation du système

La facilité d'utilisation du système est importante pour l'acceptation par l'opérateur. Les technologies portables doivent toujours être testées sur le terrain, car des facteurs spécifiques au site ou à l'utilisateur peuvent modifier la facilité d'utilisation et l'acceptation



d'un dispositif (Xing et al., 2020). Les aspects importants de la facilité d'utilisation sont le confort, la fonctionnalité, la perception de l'utilité et la facilité d'utilisation. Les considérations fonctionnelles relatives à la technologie portable, notamment la satisfaction à l'égard du confort, de l'ajustement et de la mobilité (Hwang, 2014), sont également essentielles à la sécurité sur le lieu de travail afin de garantir que le dispositif ne distrait pas l'utilisateur. Selon Sontag (1985), le confort physique peut également être associé à des attributs physiques tels que les propriétés de transfert de l'air, de l'humidité et de la chaleur, et à des propriétés mécaniques telles

que l'élasticité, la flexibilité, le volume, le poids, la texture et la fabrication (*Frith et Gleeson, 2004; Sontag, 1985*). Par conséquent, la conception de l'appareil et le contexte environnemental unique dans lequel il sera utilisé sont déterminants. Ces déterminants étant communs à l'acceptation des technologies (*Gao et al., 2015; Son et al., 2012; Wang et al., 2014*), ils nécessitent des tests spécifiques dans des contextes professionnels uniques (*Choi et al., 2017*).

## Acceptation de la technologie

Les modèles d'acceptation des technologies (MAT) (*Davis, 1989*) et d'autres cadres (*Venkatesh et al., 2003; Williams et al., 2015*) permettent de comprendre la probabilité que les individus adoptent une nouvelle technologie dans leur vie personnelle. Les facteurs indépendants, dans ces modèles, comprennent : les croyances normatives, la facilité d'utilisation ou la complexité perçue, la motivation à se conformer, la compatibilité avec les besoins, l'avantage relatif, l'efficacité personnelle, le coût, les normes subjectives, la crainte des progrès technologiques, l'utilité perçue, l'attitude à l'égard du dispositif, le contrôle comportemental perçu, l'accessibilité des données et l'apparence. Parmi les autres facteurs indépendants applicables au milieu professionnel, citons : l'expérience personnelle antérieure de la technologie, le risque perçu pour la vie privée, les normes subjectives sur le lieu de travail, la valeur perçue (de la technologie), la compatibilité avec les besoins en matière de santé et de sécurité au travail (SST) et les avantages relatifs. Le dialogue et les outils d'évaluations utilisés avec les travailleurs sur ces questions pourraient améliorer l'adaptation aux nouvelles technologies (*Yang et al., 2016*).

## Temps et formation

Les connaissances et le temps nécessaires à l'utilisation de l'appareil peuvent également avoir un impact sur sa facilité d'utilisation sur le lieu de travail. En ce qui concerne l'utilisation des appareils, certains devront être configurés tout au long de la journée ou nécessiteront la saisie de données. De plus, tout outil de surveillance nécessite une formation afin que les travailleurs comprennent pourquoi ils mettent en œuvre l'outil, comment l'appareil fonctionne et comment l'utiliser, et comment les données seront utilisées par l'entreprise.

## Annexe A : Définitions

**Contrainte thermique** : La réponse physiologique au stress thermique (Donoghue, 2004; WSN, 2014; Xiang et al., 2014)

**Contrôles généraux** : Mesures prises dans le cadre du PGST pour protéger les travailleurs lorsque le stress thermique est un risque prévisible.

Il s'agit de mesures générales qui s'appliquent à l'ensemble des lieux de travail (ACGIH, 2022).

Parmi les exemples de contrôles généraux, on peut citer : la formation et les politiques relatives à la reconnaissance des symptômes liés à la chaleur, les alertes pour les périodes ou activités à haut risque et l'apprentissage des premiers soins.

**Contrôles propres à l'emploi** : Mesures prises dans le cadre du PGST pour contrôler le stress thermique dans des conditions d'exposition spécifiques.

**Débit cardiaque** : Volume de sang éjecté par le cœur et produit du volume systolique (SV) et de la fréquence cardiaque (FC), exprimé en litres par minute (L/min).

**Électrocardiogramme (ECG)** : Les ECG sont souvent des timbres ou des sangles de poitrine qui recueillent les signaux électriques générés par le cœur, nécessitant souvent un emplacement spécifique sur la poitrine pour fonctionner correctement.

Ils peuvent détecter la fréquence cardiaque et estimer la fréquence respiratoire, et sont également capables de détecter des anomalies du rythme cardiaque.

Ces capteurs peuvent ne pas être confortables pour un port continu à long terme (Jeffs et al., 2016; Manta et al., 2020), et la qualité des données peut être affectée par des artefacts de mouvement (bruit dans le signal ECG causé par un mouvement brusque du corps).

**Fréquence cardiaque (FC)** : Nombre de contractions cardiaques par minute exprimé en battements par minute (bpm). La FC est une mesure courante dans les activités cliniques et de remise en forme.

Elle peut facilement être extraite des signaux de données ECG ou PPG et fournit des indications sur les changements dans les cycles cardiaques (Chan et al., 2012; Dias et Paulo Silva Cunha, 2018). Les mesures de la FC sont étroitement associées au niveau d'activité et peuvent indiquer comment le cœur fonctionne à différentes intensités d'activité physique et de récupération (Dias et Paulo Silva Cunha, 2018).

**Maladie rénale chronique (MRC)** : La maladie rénale chronique est une affection dans laquelle les reins sont endommagés et ne peuvent plus filtrer le sang aussi bien qu'ils le devraient. L'excès de liquide et de déchets s'accumule alors dans l'organisme et peut entraîner d'autres problèmes de santé tels que des maladies cardiaques et des accidents vasculaires cérébraux.

**Maladie liée à la chaleur** : Un éventail de troubles, y compris les crampes de chaleur, l'épuisement par la chaleur et les coups de chaleur, causés par une exposition environnementale à la chaleur.

**Maladies aiguës** : Maladies liées à la chaleur d'apparition soudaine qui résultent immédiatement, ou dans un délai précis, d'une exposition à la chaleur dans l'environnement et qui disparaissent en quelques jours.

**Maladies chroniques** : Maladies liées à la chaleur qui résultent d'une exposition environnementale sévère, prolongée, répétée ou continue à la chaleur et qui mettent plus de trois mois à se résorber ou ne se résorbent jamais.

**Programme de gestion du stress thermique (PGST)** : Plans écrits décrivant la politique du lieu de travail en matière de gestion du stress thermique, y compris, mais sans s'y limiter nécessairement, la formation, les pratiques d'hygiène, la surveillance, la documentation des événements et un plan d'intervention en cas d'urgence. Le PGST doit comprendre des contrôles généraux et des contrôles propres à l'emploi qui sont déclenchés lorsque le stress thermique dépasse les limites d'exposition, par exemple celles de la VLE ou de la LA (ACGIH, 2022).

**Stress thermique** : La charge nette de chaleur à laquelle un travailleur peut être exposé (Donoghue, 2004; WSN, 2014; Xiang et al., 2014).

**Température corporelle centrale ( $T_{\text{centrale}}$ )** : La température des organes internes du corps (c.-à-d. le cœur, le foie, l'intestin).

**Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)** : Variabilité du temps (en millisecondes) entre un battement de cœur et le suivant. La VFC peut être utilisée pour évaluer la santé du système cardiovasculaire et nerveux (Young et Benton, 2018). La variabilité de la fréquence cardiaque est sensible aux changements de l'activité du système

nerveux autonome associés au stress psychologique et physique. En tant que telle, la VFC peut également être utilisée comme un indicateur de la santé autonome et des réactions au stress.

**Photopléthysmogramme (PPG) :** Capteurs qui utilisent les propriétés de diffusion, d'absorption et de transmission de la lumière pour évaluer les variations du volume sanguin. Les PPG sont couramment utilisés pour mesurer le pouls d'un individu afin de déterminer sa fréquence cardiaque. La fréquence cardiaque est calculée en mesurant le temps écoulé entre les changements de volume sanguin (Castaneda et al., 2018; Manta et al., 2020). Les PPG peuvent également être utilisés pour estimer la saturation en oxygène ( $SpO_2$  : la quantité d'oxygène dans le sang), en utilisant les propriétés d'absorption de la lumière de l'hémoglobine saturée en oxygène (Manta et al., 2020). Ces capteurs peuvent être intégrés dans des montres-bracelets, des brassards et des bagues non obstruées. Ils sont capables de détecter les anomalies du rythme cardiaque, mais la qualité des données peut être affectée par les mouvements pendant l'évaluation.

**Stress Thermique :** Ces actions sont utilisées pour réduire les niveaux d'exposition au stress thermique et comprennent l'application de la hiérarchie des contrôles (p. ex., contrôles techniques, contrôles administratifs, refroidissement personnel) (ACGIH, 2022).

**Température de la peau ( $T_{\text{peau}}$ ) :** La température de la surface extérieure du corps. La température de la peau peut être mesurée à différents endroits du corps, par exemple sur le front, le poignet, le bras ou la poitrine.

**Thermorégulation :** La réaction physiologique adaptative destinée à empêcher le corps de devenir soit trop froid, en induisant une vasoconstriction, des frissons, une augmentation de l'activité métabolique, soit trop chaud par la vasodilatation et la transpiration (Kenney et al., 2015).

**Thermorésistance :** Capteurs de température fonctionnant sur le principe de la résistance et nécessitant un contact direct avec la peau. Lorsque la température corporelle augmente, la résistance diminue et le changement de résistance est calculé en fonction des changements de température (Manta et al., 2020).

**Thermorésistance :** Capteurs de température fonctionnant sur le principe de la résistance et nécessitant un contact direct avec la peau. Lorsque la température corporelle augmente, la résistance diminue et le changement de résistance est calculé en fonction des changements de température (Manta et al., 2020).

**Thermopile :** Un type de capteur qui mesure la température à distance en détectant l'énergie infrarouge (Manta et al., 2020). Plus la température augmente, plus la quantité d'énergie infrarouge émise augmente. Les thermopiles sont également connues sous le nom de thermomètres infrarouges et ne nécessitent pas de contact avec le corps.

**Volume systolique (SV) :** Volume de sang pompé à chaque battement de cœur, exprimé en litres par battement (L/battement).

## Annexe B : Références

- Ahrens, T. (2008). The most important vital signs are not being measured. *Australian Critical Care*, 21(1), 3-5. <https://doi.org/10.1016/j.aucc.2007.12.061> [Disponible uniquement en anglais]
- Al-Bouwarthan, M., Quinn, M.M., Kriebel, D., et Wegman, D.H. (2020). A Field Evaluation of Construction Workers' Activity, Hydration Status, and Heat Strain in the Extreme Summer Heat of Saudi Arabia. *Annals of Work Exposures and Health*, 64(5), 522–535. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa029>
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). (2022). *Physical Agents—Thermal Stress: Heat stress and strain*. Publié dans 2023: TLVs and BEIs (pp. 239–247). Cincinnati, OH: ACGIH. ISBN: 978-1-607261-58-2 [Disponible uniquement en anglais]
- Anliker, U., Ward, J.A., Lukowicz, P., Tröster, G., Dolveck, F., Baer, M., Keita, F., Schenker, E.B., Catarsi, F., Coluccini, L., Belardinelli, A., Shklarski, D., Alon, M., Hirt, E., Schmid, R., et Vuskovic, M. (2004). AMON: A wearable multiparameter medical monitoring and alert system. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 8(4), 415–427. <https://doi.org/10.1109/titb.2004.837888> [Disponible uniquement en anglais]
- Appelboom, G., Camacho, E., Abraham, M.E., Bruce, S.S., Dumont, E.L., Zacharia, B.E., D'Amico, R., Slomian, J., Reginster, J.Y., Bruyère, O., et Connolly, E.S. (2014). *Capteurs corporels portables intelligents pour l'auto-évaluation et le suivi des patients*. *Archives of Public Health = Archives Belges De Sante Publique*, 72 (1), 28. <https://doi.org/10.1186/2049-3258-72-28>
- Arena, R., Myers, J., et Kaminsky, L.A. (2016). *Revisiting age-predicted maximal heart rate: Can it be used as a valid measure of effort?* *American Heart Journal*, 173, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2015.12.006> [Disponible uniquement en anglais]
- Bai, Y., Welk, G.J., Nam, Y.H., Lee, J.A., Lee, J.-M., Kim, Y., Meier, N.F., et Dixon, P.M. (2016). *Comparison of Consumer and Research Monitors under Semistructured Settings*. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 48(1), 151–158. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000727> [Disponible uniquement en anglais]
- Banos, O., Villalonga, C., Damas, M., Gloesekoetter, P., Pomares, H., et Rojas, I. (2014). PhysioDroid: Combining wearable health sensors and mobile devices for a ubiquitous, continuous, and personal monitoring. *The Scientific World Journal*, 2014, 490824. <https://doi.org/10.1155/2014/490824> [Disponible uniquement en anglais]
- Benedict, F.G., et Slack, E.P. (1851). *A comparative study of temperature fluctuations in different parts of the human body*. Washington, D.C.: Carnegie Institution of Washington. [Disponible uniquement en anglais]
- Bethea, D., & Parsons, K. (2002). *The development of a practical heat stress assessment methodology for use in UK industry*. England: Loughborough University. [Disponible uniquement en anglais]
- Bigger, J.T., Fleiss, J.L., Steinman, R.C., Rolnitzky, L.M., Kleiger, R.E., et Rottman, J.N. (1992). Frequency domain measures of heart period variability and mortality after myocardial infarction. *Circulation*, 85(1), 164-171. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.85.1.164> [Disponible uniquement en anglais]
- Bogerd, C.P., Velt, K.B., Annaheim, S., Bongers, C.C.W.G., Eijsvogels, T.M.H., et Daanen, H.a.M. (2018). Comparison of two telemetric intestinal temperature devices with rectal temperature during exercise. *Physiological Measurement*, 39(3), 03NT01. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aaad52> [Disponible uniquement en anglais]
- Bootsma, I.T., Boerma, E.C., de Lange, F., et Scheeren, T.W.L. (2022). The contemporary pulmonary artery catheter. Part 1: Placement and waveform analysis. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 36(1), 5–15. <https://doi.org/10.1007/s10877-021-00662-8> [Disponible uniquement en anglais]

- Bouchama, A., et Knochel, J.P. (2002). Heat stroke. *The New England Journal of Medicine*, 346(25), 1978–1988. <https://doi.org/10.1056/NEJMra011089>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Bridges, E., et Thomas, K. (2009). Noninvasive measurement of body temperature in critically ill patients. *Critical Care Nurse*, 29(3), 94–97. <https://doi.org/10.4037/ccn2009132>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Budd, G.M. (2001). How do wildland firefighters cope? Physiological and behavioural temperature regulation in men suppressing Australian summer bushfires with hand tools. *Journal of Thermal Biology*, 26(4–5), 381–386. [https://doi.org/10.1016/S03064565\(01\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S03064565(01)00048-1)  
[Disponible uniquement en anglais]
- Budd, G.M., Brotherhood, J.R., Hendrie, A.L., Jeffery, S.E., Beasley, F.A., Costin, B.P., Zhien, W., Baker, M.M., Cheney, N.P., et Dawson, M.P. (1997). Project Aquarius 6. Heat load from exertion, weather, and fire in men suppressing wildland fires. *International Journal of Wildland Fire*, 7(2), 119-131. <https://doi.org/10.1071/wf9970119>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Bui, D.P., Pollack Porter, K., Griffin, S., French, D.D., Jung, A.M., Crothers, S., et Burgess, J.L. (2017). Risk management of emergency service vehicle crashes in the United States fire service: process, outputs, and recommendations. *BMC public health*, 17, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s12889-017-4894-3>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Buller, M.J., et Karis, A.J. (2007). Heart rate and respiratory rate during fitness training, obstacle course runs, and mass casualty simulations – Performance of two warfighter physiological status monitoring systems. (Accession No. ADA471543). *U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA471543.pdf>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Buller, M.J., Tharion, W.J., Chevront, S.N., Montain, S.J., Kenefick, R.W., Castellani, J., ... et Hoyt, R.W. (2013). Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations. *Physiological measurement*, 34(7), 781. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/7/781>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Buller, M.J., Tharion, W.J., Duhamel, C.M., et Yokota, M. (2015). Real-time core body temperature estimation from heart rate for first responders wearing different levels of personal protective equipment. *Ergonomics*, 58(11), 1830-1841. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1036792>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Buller, M., Tharion, W., Hoyt, R., et Jenkins, O. (2010). Estimation of Human Internal Temperature from Wearable Physiological Sensors. *In Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, 24(2), pp. 1763-1768. <https://doi.org/10.1609/aaai.v24i2.18809>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Bunn, J.A., Navalta, J.W., Fontaine, C.J., et Reece, J.D. (2018). Current state of commercial wearable technology in physical activity monitoring 2015–2017. *International journal of exercise science*, 11(7), 503-515. [Disponible uniquement en anglais] PMID: 29541338; PMCID: PMC5841672.
- Carrier, B., Barrios, B., Jolley, B.D., et Navalta, J.W. (2020). Validity and Reliability of Physiological Data in Applied Settings Measured by Wearable Technology: A Rapid Systematic Review. *Technologies*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/technologies8040070>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Carrillo, A.E., Flouris, A.D., Herry, C.L., Poirier, M.P., Boulay, P., Dervis, S., Friesen, B.J., Malcolm, J., Sigal, R.J., Seely, A.J.E., et Kenny, G.P. (2016). Heart rate variability during high heat stress: A comparison between young and older adults with and without Type 2 diabetes. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 311(4), R669-R675. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00176.2016>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Casa, D.J., Becker, S.M., Ganio, M.S., Brown, C.M., Yeargin, S.W., Roti, M.W., Siegler, J., Blowers, J.A., Glaviano, N.R., Huggins, R.A., Armstrong, L.E., et Maresh, C.M. (2007). Validity of devices that assess body temperature during outdoor exercise in the heat. *Journal of Athletic Training*, 42(3), 333–342. [Disponible uniquement en anglais] PMID: 18059987
- Castaneda, D., Esparza, A., Ghamari, M., Soltanpur, C., et Nazeran, H. (2018). A review on wearable photoplethysmography sensors and their potential future applications in health care. *International Journal of Biosensors & Bioelectronics*,

- 4(4), 195–202. <https://doi.org/10.15406/ijbsbe.2018.04.00125>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST). (2024, 10 février). *Fiches d'information sur les environnements chauds*. [https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys\\_agents/heat](https://www.ccohs.ca/oshanswers/phys_agents/heat)
- Chan, M., Estève, D., Fourniols, J.-Y., Escriba, C., et Campo, E. (2012). Smart wearable systems: Current status and future challenges. *Artificial Intelligence in Medicine*, 56(3), 137–156. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2012.09.003>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Chaturvedi, D., Vilhekar, K.Y., Chaturvedi, P., et Bharambe, M.S. (2004). Comparison of axillary temperature with rectal or oral temperature and determination of optimum placement time in children. *Indian pediatrics*, 41(6), 600-604.  
[Disponible uniquement en anglais]  
PMID: 15235167
- Cheung, S. (2010). *Advanced Environmental Exercise Physiology*. Human Kinetics.  
[Disponible uniquement en anglais]
- Cheung, S.S. (2007). Neuropsychological determinants of exercise tolerance in the heat.  
[Disponible uniquement en anglais] In H.S. Sharma (Ed.), *Progress in Brain Research* (Vol. 162, pp. 45-60). Elsevier. [http://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)62004-9](http://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)62004-9)  
[Disponible uniquement en anglais]
- Cheung, S.S., McLellan, T.M., et Tenaglia, S. (2000). The thermophysiology of uncompensable heat stress. Physiological manipulations and individual characteristics. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 29(5), 329–359. <https://doi.org/10.2165/00007256-200029050-00004>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Childs, C., Harrison, R., et Hodkinson, C. (1999). Tympanic membrane temperature as a measure of core temperature. *Archives of Disease in Childhood*, 80(3), 262–266. <https://doi.org/10.1136/adc.80.3.262> [Disponible uniquement en anglais]
- Choi, B., Hwang, S., et Lee, S. (2017). What drives construction workers' acceptance of wearable technologies in the workplace?: Indoor localization and wearable health devices for occupational safety and health. *Automation in Construction*, 84, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.08.005>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Choi, J.-H., & Loftness, V. (2012). Investigation of human body skin temperatures as a bio-signal to indicate overall thermal sensations. *Building and Environment*, 58, 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.003>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Conseil de la santé et de la sécurité au travail de l'Ontario (OHSCO). (2009). *Guide de sensibilisation au stress dû à la chaleur* <https://www.ohcow.on.ca/edit/files/heatstressawareness/heatstressguidefr.pdf>
- Cosoli, G., Spinsante, S., et Scalise, L. (2020). Wrist-worn and chest-strap wearable devices: Systematic review on accuracy and metrological characteristics. *Measurement*, 159, 107789. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107789>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Crandall, C.G., et Wilson, T.E. (2015). Human cardiovascular responses to passive heat stress. *Comprehensive Physiology*, 5(1), 17-43. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140015>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Cross, A., Collard, M., et Nelson, A. (2008). Body Segment Differences in Surface Area, Skin Temperature and 3D Displacement and the Estimation of Heat Balance during Locomotion in Hominins. *PLoS ONE*, 3(6), e2464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002464>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Davis, F.D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS quarterly*, 319-340. <https://doi.org/10.2307/249008>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Davies, P., et Maconochie, I. (2009). The relationship between body temperature, heart rate and respiratory rate in children. *Emergency Medicine Journal: EMJ*, 26(9), 641–643. <https://doi.org/10.1136/emj.2008.061598>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Dehghan, H., Habibi, E., Habibi, P., et Maracy, M.R. (2013). Validation of a questionnaire for heat strain evaluation in women workers. *International Journal of Preventive Medicine*, 4(6), 631-40. *[Disponible uniquement en anglais]*  
PMID: 23930180; PMCID: PMC3733030.
- Dehghan, H., et Sartang, A.G. (2015). Validation of perceptual strain index to evaluate the thermal strain in experimental hot conditions. *International Journal of Preventive Medicine*, 6(1), 78. <https://doi.org/10.1016/j.ijpmed.2015.01.001>

[doi.org/10.4103/2008-7802.163185](https://doi.org/10.4103/2008-7802.163185)

[Disponible uniquement en anglais]

Deming, N.J., Moore, K., Gao, X., et Alam, T. (2020). In response to indices of physiological strain for firefighters of the Australian Defence Forces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(7–8), D11–D12. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1772976>

[Disponible uniquement en anglais]

Dias, D., et Paulo Silva Cunha, J. (2018). Wearable Health Devices—Vital Sign Monitoring, Systems and Technologies. *Sensors*, 18(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/s18082414>

[Disponible uniquement en anglais]

Díaz, M., et Becker, D.E. (2010). Thermoregulation: Physiological and Clinical Considerations during Sedation and General Anesthesia. *Anesthesia Progress*, 57(1), 25–33. <https://doi.org/10.2344/000>

[Disponible uniquement en anglais]

Dolson, C.M., Harlow, E.R., Phelan, D.M., Gabbett, T.J., Gaal, B., McMellen, C., ... et Seshadri, D.R. (2022). Wearable sensor technology to predict core body temperature: A systematic review. *Sensors*, 22(19), 7639. <https://doi.org/10.3390/s22197639>

[Disponible uniquement en anglais]

Donoghue, A.M. (2004). Heat illness in the U.S. mining industry. *American Journal of Industrial Medicine*, 45(4), 351–356. <https://doi.org/10.1002/ajim.10345> [Disponible uniquement en anglais]

Düking, P., Giessing, L., Frenkel, M.O., Koehler, K., Holmberg, H.C., et Sperlich, B. (2020). Wrist-worn wearables for monitoring heart rate and energy expenditure while sitting or performing light-to-vigorous physical activity: validation study. *JMIR mHealth and uHealth*, 8(5), e16716. <https://doi.org/10.2196/16716>

[Disponible uniquement en anglais]

Easton, C., Fudge, Barry, W., et Pitsiladis, Yannis P. (2007). Rectal, telemetry pill and tympanic membrane thermometry during exercise heat stress. *Journal of Thermal Biology*, 32(2), 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.10.004>

[Disponible uniquement en anglais]

Eggenberger, P., MacRae, B.A., Kemp, S., Bürgisser, M., Rossi, R.M., et Annaheim, S. (2018). Prediction of Core Body Temperature Based on Skin Temperature, Heat Flux, and Heart Rate Under Different Exercise and Clothing Conditions

in the Heat in Young Adult Males. *Frontiers in Physiology*, 9, 1780. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01780>

[Disponible uniquement en anglais]

Elabbassi, E.B., Chardon, K., Telliez, F., Bach, V., et Libert, J.-P. (2002). Influence of head position on thermal stress in newborns: Simulation using a thermal mannequin. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 93(4), 1275–1279. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00336.2002>

[Disponible uniquement en anglais]

Electrophysiology, T.F. of the E.S. of C. the N.A.S. of P. (1996). Heart rate variability. *Circulation*, 93(5), 1043–1065. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>

[Disponible uniquement en anglais]

Equival. (2023). *EQ02+ Series LifeMonitor User Guide: EQ02+ Series LifeMonitor and Health Care Practitioner's Guide*. Equival. [https://support.equival.com/hc/en-gb/article\\_attachments/8478328419356](https://support.equival.com/hc/en-gb/article_attachments/8478328419356)

[Disponible uniquement en anglais]

Falcone, T., Cordella, F., Molinaro, V., Zollo, L., et Del Ferraro, S. (2021). Real-time human core temperature estimation methods and their application in the occupational field: A systematic review. *Measurement*, 183, 109776. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109776>

[Disponible uniquement en anglais]

Ferguson, T., Rowlands, A. V., Olds, T., et Maher, C. (2015). The validity of consumer-level, activity monitors in healthy adults worn in free-living conditions: A cross-sectional study. *The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 12, 42. <https://doi.org/10.1186/s12966-015-0201-9>

[Disponible uniquement en anglais]

Flouris, A. D., Bravi, A., Wright-Beatty, H. E., Green, G., Seely, A. J., et Kenny, G. P. (2014). Heart rate variability during exertional heat stress: effects of heat production and treatment. *European Journal of Applied Physiology*, 114, 785–792. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2804-7>

[Disponible uniquement en anglais]

Flouris, A.D., Dinas, P.C., Ioannou, L.G., Nybo, L., Havenith, G., Kenny, G.P., et Kjellstrom, T. (2018). Workers' health and productivity under occupational heat strain: A systematic review and meta-analysis. *The Lancet. Planetary Health*, 2(12), e521–e531. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30237-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30237-7)

[Disponible uniquement en anglais]

- Fountain, C., Goins, L., Hartman, M., Phelps, N., Scoles, D., et Hays, V. (2008). Evaluating the accuracy of four temperature instruments on an adult inpatient oncology unit. *Clinical Journal of Oncology Nursing*, 12(6), 983–987. <https://doi.org/10.1188/08>. [Disponible uniquement en anglais] [CJON.983-987](https://doi.org/10.1188/08)
- Fox, S.M., Naughton, J.P., et Haskell, W.L. (1971). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Annals of Clinical Research*, 3(6), 404-432. [Disponible uniquement en anglais] PMID: 4945367
- Frith, H., et Gleeson, K. (2004). Clothing and Embodiment: Men Managing Body Image and Appearance. *Psychology of Men & Masculinity*, 5(1), 40–48. <https://doi.org/10.1037/1524-9220.5.1.40> [Disponible uniquement en anglais]
- Fuller, D., Colwell, E., Low, J., Orychock, K., Tobin, M.A., Simango, B., ... et Taylor, N.G. (2020). Reliability and validity of commercially available wearable devices for measuring steps, energy expenditure, and heart rate: systematic review. *JMIR mHealth and uHealth*, 8(9), e18694. <https://doi.org/10.2196/18694> [Disponible uniquement en anglais]
- Furlong, D., Carroll, D.L., Finn, C., Gay, D., Gryglik, C., et Donahue, V. (2015). Comparison of temporal to pulmonary artery temperature in febrile patients. *Dimensions of Critical Care Nursing: DCCN*, 34(1), 47–52. <https://doi.org/10.1097/DCC.0000000000000090> [Disponible uniquement en anglais]
- Gao, W., Emaminejad, S., Nyein, H.Y.Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., Fahad, H.M., Ota, H., Shiraki, H., Kiriya, D., Lien, D.-H., Brooks, G.A., Davis, R.W., et Javey, A. (2016). Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature*, 529(7587), 509–514. <https://doi.org/10.1038/nature16521> [Disponible uniquement en anglais]
- Gao, Y., Li, H., et Luo, Y. (2015). An empirical study of wearable technology acceptance in healthcare. *Industrial Management & Data Systems*, 115(9), 1704-1723. <https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2015-0087> [Disponible uniquement en anglais]
- Gatti, U.C., Schneider, S., et Migliaccio, G.C. (2014). Physiological condition monitoring of construction workers. *Automation in Construction*, 44, 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.013> [Disponible uniquement en anglais]
- Gatti, U.C., Migliaccio, G., Bogus, S.M., Priyadarshini, S., et Scharrer, A. (2013). Using a workforce's physiological strain monitoring to enhance social sustainability of construction. *Journal of Architectural Engineering*, 19(3), 179-185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000110](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000110) [Disponible uniquement en anglais]
- Germini, F., Noronha, N., Borg Debono, V., Abraham Philip, B., Pete, D., Navarro, T., ... et Iorio, A. (2022). Accuracy and acceptability of wrist-wearable activity-tracking devices: systematic review of the literature. *Journal of Medical Internet Research*, 24(1), e30791. <https://doi.org/10.2196/30791> [Disponible uniquement en anglais]
- Goggins, K. A., Tetzlaff, E. J., Young, W. W., et Godwin, A. A. (2022). SARS-CoV-2 (Covid-19) workplace temperature screening: Seasonal concerns for thermal detection in northern regions. *Applied Ergonomics*, 98, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103576> [Disponible uniquement en anglais]
- Gillinov, S., Etiwy, M., Wang, R., Blackburn, G., Phelan, D., Gillinov, A., Houghtaling, P., Javadikasgari, H., et Desai, M. (2017). Variable accuracy of wearable heart rate monitors during aerobic exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 49(8), 1697-1703. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001284> [Disponible uniquement en anglais]
- Golbabaie, F., Monazzam, M., Hematjo, R., Hosseini, M., et Fahang-Dehghan, S. (2013). The Assessment of Heat Stress and Heat Strain in Pardis Petrochemical Complex, Tehran, Iran. *International Journal of Occupational Hygiene*, 5(1), 6–11. [Disponible uniquement en anglais] IJOH No. 2008-5435/13/51-6-11
- Goldsack, J.C., Coravos, A., Bakker, J.P., Bent, B., Dowling, A.V., Fitzer-Attas, C., Godfrey, A., Godino, J.G., Gujar, N., Izmailova, E., Manta, C., Peterson, B., Vandendriessche, B., Wood, W.A., Wang, K.W., et Dunn, J. (2020). Verification, analytical validation, and clinical validation (V3): The foundation of determining fit-for-purpose for Biometric Monitoring Technologies (BioMeTs). *NPJ Digital Medicine*, 3, 55. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0260-4> [Disponible uniquement en anglais]

- Gumieniak, R.J., Shaw, J., Gledhill, N., et Jamnik, V.K. (2018). Physical employment standard for Canadian wildland fire fighters; identifying and characterising critical initial attack response tasks. *Ergonomics*, 61(10), 1299–1310. <https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1464211> [Disponible uniquement en anglais]
- Haghi, M., Thurow, K., et Stoll, R. (2017). Wearable Devices in Medical Internet of Things: Scientific Research and Commercially Available Devices. *Healthcare Informatics Research*, 23(1), 4–15. <https://doi.org/10.4258/hir.2017.23.1.4> [Disponible uniquement en anglais]
- Haldane, J.S. (1905). The Influence of High Air Temperatures. *The Journal of Hygiene*, 5(4), 494–513. <https://doi.org/10.1017/S0022172400006811> [Disponible uniquement en anglais]
- Hernandez, J., McDuff, D., Quigley, K., Maes, P., et Picard, R.W. (2019). Wearable motion-based heart rate at rest: A workplace evaluation. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 23(5), 1920–1927. <http://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2877484> [Disponible uniquement en anglais]
- Hindle, A.G., Horning, M., et Mellish, J.-A.E. (2015). Estimating total body heat dissipation in air and water from skin surface heat flux telemetry in Weddell seals. *Animal Biotelemetry*, 3(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40317-015-0081-4> [Disponible uniquement en anglais]
- Hunt, A.P., Billing, D.C., Patterson, M.J., et Caldwell, J.N. (2016). Heat strain during military training activities: The dilemma of balancing force protection and operational capability. Temperature: *Multidisciplinary Biomedical Journal*, 3(2), 307–317. <https://doi.org/10.1080/23328940.2016.1156801> [Disponible uniquement en anglais]
- Hunt, A.P., Buller, M.J., Maley, M.J., Costello, J.T., et Stewart, I.B. (2019a). Validity of a noninvasive estimation of deep body temperature when wearing personal protective equipment during exercise and recovery. *Military Medical Research*, 6, 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40779-019-0208-7> [Disponible uniquement en anglais]
- Hunt, A.P., Stewart, I.B., et Billing, D.C. (2019b). Indices of physiological strain for firefighters of the Australian Defence Forces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(11), 727–734. <https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1666211> [Disponible uniquement en anglais]
- Hussain, A.M., et Hussain, M.M. (2016). CMOS-Technology-Enabled Flexible and Stretchable Electronics for Internet of Everything Applications. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, 28(22), 4219–4249. <https://doi.org/10.1002/adma.201504236> [Disponible uniquement en anglais]
- Hwang, C. (2014). *Consumers' acceptance of wearable technology: Examining solar-powered clothing* [Master of Science Thesis] (p. 6199674). e Université d'État de l'Iowa : Iowa, États-Unis. Dépôt numérique de l'Université d'État de l'Iowa. <https://doi.org/10.31274/etd-180810-5880> [Disponible uniquement en anglais]
- Imamura, M., Matsukawa, T., Ozaki, M., Sessler, D.I., Nishiyama, T., et Kumazawa, T. (1998). The accuracy and precision of four infrared aural canal thermometers during cardiac surgery. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*, 42(10), 1222–1226. <https://doi.org/10.1111/j.1399-6576.1998.tb05281.x> [Disponible uniquement en anglais]
- Insler, S.R., et Sessler, D.I. (2006). Perioperative thermoregulation and temperature monitoring. *Anesthesiology Clinics of North America*, 24(4), 823–837. <https://doi.org/10.1016/j.atc.2006.09.001> [Disponible uniquement en anglais]
- Jacklitsch, B., Williams, J., Musolin, K., Coca, A., Kim, J.-H., et Turner, N. (2016). *NIOSH criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments*. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication 2016-106. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/default.html> [Disponible uniquement en anglais]
- Jacquot, C.M.C., Schellen, L., Kingma, B.R., van Baak, M.A., et van Marken Lichtenbelt, W.D. (2014). Influence of thermophysiology on thermal behavior: The essentials of categorization. *Physiology & Behavior*, 128, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2014.01.025> [Disponible uniquement en anglais]
- James, K.R. (2013). *A comparison of temperatures inside protective headgear with indicators of physiological strain and core temperatures during exercise in a hot environment* [Masters Thesis, Texas Christian University]. [https://repository.tcu.edu/bitstream/handle/116099117/4472/James\\_tcu\\_0229M\\_10430.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.tcu.edu/bitstream/handle/116099117/4472/James_tcu_0229M_10430.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Disponible uniquement en anglais]

- Jay, O., Gariépy, L.M., Reardon, F.D., Webb, P., Ducharme, M.B., Ramsay, T., et Kenny, G.P. (2007). A three-compartment thermometry model for the improved estimation of changes in body heat content. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 292(1), R167-175. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00338.2006> [Disponible uniquement en anglais]
- Jeffs, E., Vollam, S., Young, J.D., Horsington, L., Lynch, B., et Watkinson, P.J. (2016). Wearable monitors for patients following discharge from an intensive care unit: Practical lessons learnt from an observational study. *Journal of Advanced Nursing*, 72(8), 1851–1862. <https://doi.org/10.1111/jan.12959> [Disponible uniquement en anglais]
- Jeklin, A.T., Perrotta, A.S., Davies, H.W., Bredin, S.S.D., Paul, D.A., et Warburton, D.E.R. (2021). The association between heart rate variability, reaction time, and indicators of workplace fatigue in wildland firefighters. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 94, 823-831. <https://doi.org/10.1007/s00420-020-01641-3> [Disponible uniquement en anglais]
- Joy, J. (2004). Occupational safety risk management in Australian mining. *Occupational Medicine (Oxford, England)*, 54(5), 311–315. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh074> [Disponible uniquement en anglais]
- Kaisti, M., Panula, T., Leppänen, J., Punkkinen, R., Jafari Tadi, M., Vasankari, T., Jaakkola, S., Kiviniemi, T., Airaksinen, J., Kostianen, P., Meriheinä, U., Koivisto, T., et Pänkäälä, M. (2019). Clinical assessment of a non-invasive wearable MEMS pressure sensor array for monitoring of arterial pulse waveform, heart rate and detection of atrial fibrillation. *Npj Digital Medicine*, 2(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0117-x> [Disponible uniquement en anglais]
- Kamišalić, A., Fister, I., Turkanović, M., et Karakatić, S. (2018). Sensors and Functionalities of Non-Invasive Wrist-Wearable Devices: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 18(6), 1714. <https://doi.org/10.3390/s18061714> [Disponible uniquement en anglais]
- Kelley, P.W. (2003). *Military Preventive Medicine: Mobilization and Deployment (Vol. 1)*. Borden Institute, Walter Reed Army Medical Centre.
- Kenney, W.L., Wilmore, J.H., et Costill, D.L. (2015). *Physiology of Sport and Exercise (Sixth)*. Human Kinetics. [Disponible uniquement en anglais]
- Kenny, G.P., et Jay, O. (2013). Thermometry, calorimetry, and mean body temperature during heat stress. *Comprehensive Physiology*, 3(4), 1689–1719. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130011> [Disponible uniquement en anglais]
- Kiekkas, P., Stefanopoulos, N., Bakalis, N., Kefaliakos, A., et Karanikolas, M. (2016). Agreement of infrared temporal artery thermometry with other thermometry methods in adults: Systematic review. *Journal of Clinical Nursing*, 25(7–8), 894–905. <https://doi.org/10.1111/jocn.13117> [Disponible uniquement en anglais]
- Killian, J.M., Radin, R.M., Gardner, C.L., Kasuske, L., Bashirelahi, K., Nathan, D., Keyser, D.O., Cellucci, C.J., Darmon, D., et Rapp, P.E. (2021). Alternative devices for heart rate variability measures: A comparative test-retest reliability study. *Behavioural Sciences*, 11(5), 68. <https://doi.org/10.3390/bs11050068> [Disponible uniquement en anglais]
- Kim, S., Kim, D.-H., Lee, H.-H., et Lee, J.-Y. (2019). Frequency of firefighters' heat-related illness and its association with removing personal protective equipment and working hours. *Industrial Health*, 57(3), 370-380. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2018-0063> [Disponible uniquement en anglais]
- Kim, S., et Lee, J.Y. (2016). Skin sites to predict deep-body temperature while wearing firefighters' personal protective equipment during periodical changes in air temperature. *Ergonomics*, 59(4), 496-503. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1075604> [Disponible uniquement en anglais]
- Kimberger, O., Cohen, D., Illievich, U., et Lenhardt, R. (2007). Temporal artery versus bladder thermometry during perioperative and intensive care unit monitoring. *Anesthesia and Analgesia*, 105(4), 1042–1047, table of contents. <https://doi.org/10.1213/01.ane.0000281927.88935.e0> [Disponible uniquement en anglais]

- Kipp, A., Cunsolo, A., Vodden, K., King, N., Manners, S., et Harper, S.L. (2019). Aperçu – Les effets des changements climatiques sur la santé et le bien-être dans les régions rurales et éloignées au Canada : synthèse documentaire. Promotion de la santé et prévention des maladies chroniques au Canada : Recherche, politique et pratique 39(4), 122–126. <https://doi.org/10.24095/hpcdp.39.4.02>
- Knowles, B., Smith-Renner, A., Poursabzi-Sangdeh, F., Lu, D., et Alabi, H. (2018). Uncertainty in current and future health wearables. *Communications of the ACM*, 61(12), 62-67. <https://doi.org/10.1145/3199201>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Koerber, D., Khan, S., Shamsheri, T., Kirubarajan, A., et Mehta, S. (2023). Accuracy of heart rate measurement with wrist-worn wearable devices in various skin tones: a systematic review. *Journal of Racial and Ethnic Health Disparities*, 10(6), 2676-2684. <https://doi.org/10.1007/s40615-022-01446-9> [Disponible uniquement en anglais]
- Komljenovic, D., et Kecojevic, V. (2007). Risk management programme for occupational safety and health in surface mining operations. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 7, 620–638. <https://doi.org/10.1504/IJRAM.2007.014090>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Lacoumenta, S., et Hall, G.M. (1984). Liquid crystal thermometry during anaesthesia. *Anaesthesia*, 39(1), 54–56. <https://doi.org/10.1111/j.365-2044.1984.tb09457.x>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Langer, F., et Fietz, J. (2014). Ways to measure body temperature in the field. *Journal of Thermal Biology*, 42, 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.03.002>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Launey, Y., Larmet, R., Nessler, N., Malledant, Y., Palpacuer, C., et Seguin, P. (2016). The Accuracy of Temperature Measurements Provided by the Edwards Lifesciences Pulmonary Artery Catheter. *Anesthesia and Analgesia*, 122(5), 1480–1483. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000001242>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Lee, J.-M. (2013). *Validity of consumer-based physical activity monitors and calibration of smartphone for prediction of physical activity energy expenditure* [Doctoral Dissertation]. Iowa State University. <https://dr.lib.iastate.edu/server/api/core/bitstreams/56c2b117-dca7-47f5-b0d2-33d951f3b50a/content>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Lee, W., Migliaccio, G.C., Lin, K.-Y., et Russo, F. (2015). Lessons learned from using bio- and environmental sensing in construction: A field implementation [Conference Paper]. Proceedings of ICSC15: The Canadian Society for Civil Engineering 5th International/11th Construction Specialty Conference. Université de la Colombie-Britannique, Vancouver, Canada. 7-10 juin. <http://hdl.handle.net/2429/53799> [Disponible uniquement en anglais]
- Levy, B.S., et Roelofs, C. (2019). Impacts of Climate Change on Workers' Health and Safety. Publié dans : *Oxford Research Encyclopedia of Global Public Health*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190632366.013.39>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Lim, C.L., Byrne, C., et Lee, J.K. (2008). Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings. *Annals of the Academy of Medicine, Singapore*, 37(4), 347–353. [Disponible uniquement en anglais] PMID: 18461221
- Liu, C., Yavar, Z., et Sun, Q. (2015). Cardiovascular response to thermoregulatory challenges. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 309(11), H1793-H1812. <https://doi.org/10.1152/ajpheart.00199.2015>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Loi sur la santé et la sécurité au travail (LSST), 01 (Lois révisées de l'Ontario, 1990 <https://www.ontario.ca/fr/lois/loi/90o01>)
- Lukowicz, P., Anliker, U., Ward, J., Troster, G., Hirt, E., et Neufelt, C. (2002). AMON: A wearable medical computer for high risk patients. 133–134. <https://doi.org/10.1109/ISWC.2002.1167230>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Manta, C., Jain, S.S., Coravos, A., Mendelsohn, D., et Izmailova, E.S. (2020). An Evaluation of Biometric Monitoring Technologies for Vital Signs in the Era of COVID-19. *Clinical and Translational Science*, 13(6), 1034–1044. <https://doi.org/10.1111/cts.12874>  
[Disponible uniquement en anglais]

- Martín-Escudero, P., Cabanas, A.M., Dotor-Castilla, M.L., Galindo-Canales, M., Miguel-Tobal, F., Fernández-Pérez, C., ... et Giannetti, R. (2023). Are activity wrist-worn devices accurate for determining heart rate during intense exercise? *Bioengineering*, 10(2), 254. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10020254> [Disponible uniquement en anglais]
- Materna, B.L., Jones, J.R., Sutton, P.M., Rothman, N., et Harrison, R.J. (1992). Occupational exposures in California wildland fire fighting. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(1), 69–76. <https://doi.org/10.1080/15298669291359311> [Disponible uniquement en anglais]
- Mazerolle, S.M., Ganio, M.S., Casa, D.J., Vingren, J., et Klau, J. (2011). Is Oral Temperature an Accurate Measurement of Deep Body Temperature? A Systematic Review. *Journal of Athletic Training*, 46(5), 566–573. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-46.5.566> [Disponible uniquement en anglais]
- McArdle, W.D., Katch, F.I., et Katch, V.L. (2007). *Exercise physiology: Energy, Nutrition, and Human Performance (6th Edition)*. Philadelphia, PA: Lippincott, Williams et Wilkins. [Disponible uniquement en anglais]
- Ministère du Travail, de l'Immigration, de la Formation et du Développement des compétences (MLITSD). (19 Août 2021). *Prévenir ou limiter le stress dû à la chaleur dans les lieux de travail* | ontario.ca. Ministère du travail, de la formation, de l'immigration et du développement des compétences (MLITSD). <http://www.ontario.ca/fr/page/prevenir-ou-limiter-le-stress-du-la-chaleur-dans-les-lieux-de-travail>
- Mitchell, J.B., Goldston, K.R., Adams, A.N., Crisp, K.M., Franklin, B.B., Kreutzer, A., Montalvo, D.X., Turner, M.G., et Phillips, M.D. (2015). Temperature Measurement Inside Protective Headgear: Comparison With Core Temperatures and Indicators of Physiological Strain During Exercise in a Hot Environment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(12), 866–874. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1072631> [Disponible uniquement en anglais]
- Monnard, C.R., Fares, E.-J., Calonne, J., Miles-Chan, J.L., Montani, J.-P., Durrer, D., Schutz, Y., et Dulloo, A.G. (2017). Issues in Continuous 24-h Core Body Temperature Monitoring in Humans Using an Ingestible Capsule Telemetric Sensor. *Frontiers in Endocrinology*, 8, 130. <https://doi.org/10.3389/fendo.2017.00130> [Disponible uniquement en anglais]
- Moohialdin, A.S.M., Suhariadi, B.T., et Siddiqui, M.K. (2018). Practical validation measurements of a physiological status monitoring sensor in real construction activities. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 5(2). <https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2018.116> [Disponible uniquement en anglais]
- Moran, D.S., Shitzer, A., et Pandolf, K.B. (1998). A physiological strain index to evaluation heat stress. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 275(1), R129-R134. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1998.275.1.R129> [Disponible uniquement en anglais]
- Niedermann, R., Wyss, E., Annaheim, S., Psikuta, A., Davey, S., et Rossi, R.M. (2014). Prediction of human core body temperature using non-invasive measurement methods. *International journal of biometeorology*, 58, 7-15. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0687-2> [Disponible uniquement en anglais]
- O'Brien, T. J., Goosey-Tolfrey, V. L., et Leicht, C. A. (2024). Rectal and gastrointestinal temperature differ during passive heating and subsequent recovery. *Journal of Thermal Biology*, 119, 103755. [Disponible uniquement en anglais]
- O'Hara, R., Eveland, E., Fortuna, S., Reilly, P., et Pohlman, R. (2008). Current and future cooling technologies used in preventing heat illness and improving work capacity for battlefield soldiers: Review of the literature. *Military Medicine*, 173(7), 653–657. <https://doi.org/10.7205/milmed.173.7.653> [Disponible uniquement en anglais]
- Pantelopoulos, A., et Bourbakis, N.G. (2010). A Survey on Wearable Sensor-Based Systems for Health Monitoring and Prognosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 40(1), 1–12. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2009.2032660> [Disponible uniquement en anglais]
- Parker, R., Vitalis, A., Walker, R., Riley, D., et Pearce, H.G. (2017). Measuring wildland fire fighter performance with wearable technology. *Applied Ergonomics*, 59(Pt A), 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.08.018> [Disponible uniquement en anglais]

- Pasquier, M., Paal, P., Kosinski, S., Brown, D., Podsiadlo, P., et Darocha, T. (2020). Esophageal Temperature Measurement. *The New England Journal of Medicine*, 383(16), e93. <https://doi.org/10.1056/NEJMvcm1900481>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Paul G., et Irvine J. (2014). Privacy implications of wearable health devices. Publié dans : *Proceedings of the 7th International Conference on Security of Information and Networks*. Glasgow, Scotland UK. pp. 117–121. <https://doi.org/10.1145/2659651.2659683>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Peake, J.M., Kerr, G., et Sullivan, J.P. (2018). A critical review of consumer wearables, mobile applications, and equipment for providing biofeedback, monitoring stress, and sleep in physically active populations. *Frontiers in physiology*, 9, 329783. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00743>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Périard, J.D., Travers, G.J.S., Racinais, S., et Sawka, M.N. (2016). Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic Neuroscience: Basic et Clinical*, 196, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.02.002>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Petruzzello, S.J., Gapin, J.I., Snook, E., et Smith, D.L. (2009). Perceptual and physiological heat strain: Examination in firefighters in laboratory- and field-based studies. *Ergonomics*, 52(6), 747–754. <https://doi.org/10.1080/00140130802550216>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Rasch, W., Samson, P., Cote, J., et Cabanac, M. (1991). Heat loss from the human head during exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)*, 71(2), 590–595. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.2.590>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Raymann, R.J.E. M., Swaab, D.F., et Van Someren, E.J.W. (2005). Cutaneous warming promotes sleep onset. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 288(6), R1589-1597. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00492.2004>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Razjouyan, J., Grewal, G.S., Rishel, C., Parthasarathy, S., Mohler, J., et Najafi, B. (2017). Activity monitoring and heart rate variability as indicators of fall risk: Proof-of-concept for application of wearable sensors in the acute care setting. *Journal of Gerontological Nursing*, 43(7), 53-62. <https://doi.org/10.3928/00989134-20170223-01>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Ren, C., O'Neill, M.S., Park, S.K., Sparrow, D., Vokonas, P., et Schwartz, J. (2011). Ambient temperature, air pollution, and heart rate variability in an aging population. *American Journal of Epidemiology*, 173(9), 1013-1021. <https://doi.org/10.1093/aje/kwq477> [Disponible uniquement en anglais]
- Robertson, A. (2015). *Understanding modifiable determinants of fatigue from a physiological perspective in Canadian FireRangers*. [Master's Thesis, Laurentian University]. LUZoneUL: Laurentian University. <https://zone.biblio.laurentian.ca/handle/10219/2839>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Rodriguez, M. (2010). *Relationships between wet bulb globe temperature and evaporative cooling responses under heat stress* [Ph.D., Purdue University]. <https://www.proquest.com/docview/859201929/abstract/6EBBEC4824664E8DPQ/1>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Romanello, M., Di Napoli, C., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., ... et Costello, A. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*, 402(10419), 2346-2394. [Disponible uniquement en anglais]
- Roossien, C.C., Heus, R., Reneman, M.F., et Verkerke, G.J. (2020). Monitoring core temperature of firefighters to validate a wearable non-invasive core thermometer in different types of protective clothing: Concurrent in-vivo validation. *Applied Ergonomics*, 83, 103001. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.103001>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Ross, A., Myers, J., et Guazzi, M. (2010). The future of aerobic exercise testing in clinical practice: Is it the ultimate vital sign? *Future Cardiology*, 6(3), 325-342. <http://doi.org/10.2217/fca.10.21>  
[Disponible uniquement en anglais]

- Ruas, A.C., Maia, P.A., Roscani, R.C., Bitencourt, D.P., et Amorim, F.T. (2020). Heat stress monitoring based on heart rate measurements. *Revista Brasileira de Medicina Do Trabalho*, 18(2), 232-240. <https://doi.org/10.47626/1679-4435-2020-449>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Ruby, B.C., Shriver, T.C., Zderic, T.W., Sharkey, B.J., Burks, C., et Tysk, S. (2002). Total energy expenditure during arduous wildfire suppression. *Medicine et Science in Sports et Exercice*, 34(6), 1048-1054. <https://doi.org/10.1097/00005768-200206000-00023>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Schäfer, A., et Vagedes, J. (2013). How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability?: A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram. *International journal of cardiology*, 166(1), 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2012.03.119>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Scheffler, M., & Hirt, E. (2005). Wearable devices for telemedicine applications. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 11(Suppl 1), 11-14. <https://doi.org/10.1258/1357633054461994>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Schlader, Z.J., Simmons, S.E., Stannard, S.R., et Mündel, T. (2011). Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 111(8), 1631-1639. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1791-1>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Scholefield, J.H., Gerber, M.A., et Dwyer, P. (1982). Liquid crystal forehead temperature strips. A clinical appraisal. *American Journal of Diseases of Children*, 136(3), 198-201. <https://doi.org/10.1001/archpedi.1982.039703090012002>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Seo, Y., DiLeo, T., Powell, J.B., Kim, J.-H., Roberge, R.J., et Coca, A. (2016). Comparison of estimated core body temperature measured with the BioHarness and rectal temperature under several heat stress conditions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(8), 612-620. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1161199>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Shaffer, F., et Ginsberg, J.P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 5(258). <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Shah, A.J., Lampert, R., Goldberg, J., Veledar, E., Bremner, J.D., et Vaccarino, V. (2013). Posttraumatic stress disorder and impaired autonomic modulation in male twins. *Biological Psychiatry*, 73(11), 1103-1110. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2013.01.019>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Shin, S., Park, J., et Lee, J.-Y. (2015). Does the hair influence heat extraction from the head during head cooling under heat stress? *Industrial Health*, 53(6), 533-541. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2015-0005>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Sim, S.Y., Koh, M.J., Joo, K.M., Noh, S., Park, S., Kim, Y.H., et Park, K.S. (2016). Estimation of Thermal Sensation Based on Wrist Skin Temperatures. *Sensors (Bâle, Suisse)*, 16(4), 420. <https://doi.org/10.3390/s16040420>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Son, H., Park, Y., Kim, C., et Chou, J.S. (2012). Toward an understanding of construction professionals' acceptance of mobile computing devices in South Korea: An extension of the technology acceptance model. *Automation in Construction*, 28, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.07.002>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Sontag, M. (1985). Comfort dimensions of actual and ideal insulative clothing for older women. *Clothing and Textiles Research Journal*, 4(1), 9-17. <https://doi.org/10.1177/0887302X8500400102>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Spook, S.M., Koolhaas, W., Bültmann, U., et Brouwer, S. (2019). Implementing sensor technology applications for workplace health promotion: A needs assessment among workers with physically demanding work. *BMC Public Health*, 19, 1100. <https://doi.org/10.1186/s12889-019-7364-2>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Steck, L.N., Sparrow, E.M., et Abraham, J.P. (2011). Non-invasive measurement of the human core temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(4), 975-982. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.09.042>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Stelfox, H.T., Straus, S.E., Ghali, W.A., Conly, J., Laupland, K., et Lewin, A. (2010). Temporal Artery versus Bladder Thermometry during Adult Medical-Surgical Intensive Care Monitoring: An Observational Study. *BMC Anesthesiology*, 10, 13. <https://doi.org/10.1186/1471-2253-10-13>  
[Disponible uniquement en anglais]

- Stoop, R., Hohenauer, E., Aerenhouts, D., Barel, A.O., Deliëns, T., Clijse, R., et Clarys, P. (2020). Comparison of two skin temperature assessment methods after the application of topical revulsive products: Conductive iButton data logger system vs contact-free infrared thermometry. *Skin Research and Technology*, 26(5), 648–653. <https://doi.org/10.1111/srt.12847>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Storm, F.A., Heller, B.W., et Mazzà, C. (2015). Step detection and activity recognition accuracy of seven physical activity monitors. *PLoS One*, 10(3), e0118723. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118723>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Suleman, M.-I., Doufas, A.G., Akça, O., Ducharme, M., et Sessler, D.I. (2002). Insufficiency in a new temporal artery thermometer for adult and pediatric patients. *Anesthesia and Analgesia*, 95(1), 67–71, table des matières. <https://doi.org/10.1097/0000539-200207000-00012>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Tanaka, H., Monahan, K.D., et Seals, D.R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153-156.  
[Disponible uniquement en anglais]
- Taylor, N.A.S. (2014). Human heat adaptation. *Comprehensive Physiology*, 4(1), 325–365. <https://doi.org/10.1002/cphy.c130022>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Taylor, N.A.S., Notley, S.R., et Lindinger, M.I. (2021). Heat adaptation in humans: Extrapolating from basic to applied science. *European Journal of Applied Physiology*, 121(4), 1237–1238. <https://doi.org/10.1007/s00421-021-04612-9>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Taylor, N.A.S., Tipton, M.J., et Kenny, G.P. (2014). Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. *Journal of Thermal Biology*, 46, 72–101. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.10.006>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Teng, X.-F., Zhang, Y.-T., Poon, C.C.Y., et Bonato, P. (2008). Wearable, medical systems for p-Health. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 1, 62–74. <https://doi.org/10.1109/RBME.2008.2008248>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Tharion, W., Buller, M., Clements, C., Dominguez, D., Sampsonis, C., Mullen, S., Karis, A., et Potter, A. (2013). Human factors evaluation of the Hidalgo Equivital EQ-02 physiological status monitoring system. (Report No. T14-2). *U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA592523.pdf>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Tikusis, P., McLellan, T.M., et Selkirk, G. (2002). Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(9), 1454-1461. <https://doi.org/10.1097/00005768-200209000-00009>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Towey, C., Easton, C., Simpson, R., et Pedlar, C. (2017). Conventional and novel body temperature measurement during rest and exercise induced hyperthermia. *Journal of Thermal Biology*, 63, 124–130. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.11.010>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Tucker, W.J., Bhammar, D.M., Sawyer, B.J., Buman, M.P., et Gaesser, G.A. (2015). Validity and reliability of Nike + Fuelband for estimating physical activity energy expenditure. *BMC Sports Science, Medicine et Rehabilitation*, 7, 14. <https://doi.org/10.1186/s13102-015-0008-7>  
[Disponible uniquement en anglais]
- van Marken Lichtenbelt, W.D., Daanen, H.A.M., Wouters, L., Fronczek, R., Raymann, R.J.E.M., Severens, N.M.W., et Van Someren, E.J.W. (2006). Evaluation of wireless determination of skin temperature using iButtons. *Physiology et Behavior*, 88(4–5), 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.04.026>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., et Davis, F.D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478. <https://doi.org/10.2307/30036540>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Wang, T., Jung, C.H., Kang, M.H., et Chung, Y.S. (2014). Exploring determinants of adoption intentions towards Enterprise 2.0 applications: an empirical study. *Behaviour et Information Technology*, 33(10), 1048-1064. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2013.781221>  
[Disponible uniquement en anglais]

- Wang, D., Lau, K.K.-L., Ren, C., Goggins, W.B.I., Shi, Y., Ho, H.C., Lee, T.-C., Lee, L.-S., Woo, J., et Ng, E. (2019). The impact of extremely hot weather events on all-cause mortality in a highly urbanized and densely populated subtropical city: A 10-year time-series study (2006-2015). *The Science of the Total Environment*, 690, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.039>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Wartzek, T., Mühlsteff, J., et Imhoff, M. (2011). Temperature measurement. *Biomedical Engineering/Biomedizinische Technik*, 56, 241-257. <https://doi.org/10.1515/BMT.2011.108>  
[Disponible uniquement en anglais]
- West, M.R., Costello, S., Sol, J.A., et Domitrovich, J.W. (2020). Risk for heat-related illness among wildland firefighters: Job tasks and core body temperature change. *Occupational and Environmental Medicine*, 77(7), 433–438. <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-106186>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Wickwire, P.J., Buresh, R.J., Tis, L.L., Collins, M.A., Jacobs, R.D., et Bell, M.M. (2012). Comparison of an in-helmet temperature monitor system to rectal temperature during exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(1), 1–8. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31823b0a5a>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Wilkinson, D.M., Carter, J.M., Richmond, V.L., Blacker, S.D., et Rayson, M.P. (2008). The effect of cool water ingestion on gastrointestinal pill temperature. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(3), 523–528. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31815cc43e>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Williams, M.D., Rana, N.P., et Dwivedi, Y.K. (2015). The unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT): a literature review. *Journal of enterprise information management*, 28(3), 443-488. <https://doi.org/10.1108/JEIM-09-2014-0088>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Williams-Bell, F.M., Aisbett, B., Murphy, B.A., et Larsen, B. (2017). The Effects of Simulated Wildland Firefighting Tasks on Core Temperature and Cognitive Function under Very Hot Conditions. *Frontiers in Physiology*, 8, 815. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00815>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Winslow, E.H., Cooper, S.K., Haws, D.M., Balluck, J.P., Jones, C.M., Morse, E.C., Edwards, T.D., et Kelly, P.A. (2012). Unplanned perioperative hypothermia and agreement between oral, temporal artery, and bladder temperatures in adult major surgery patients. *Journal of Perianesthesia Nursing: Official Journal of the American Society of PeriAnesthesia Nurses*, 27(3), 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.jopan.2012.01.012>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Wolfson, M., Granstrom, P., Pomarico, B., et Reimanis, C. (2013). Accuracy and precision of temporal artery thermometers in febrile patients. *Med Surg Nursing: Official Journal of the Academy of Medical-Surgical Nurses*, 22(5), 297–302. [Disponible uniquement en anglais] PMID: 24358570
- Workplace Safety North (WSN). (2014). *Mine Rescue Heat Stress Report*. Workplace Safety North. [https://www.workplacesafetynorth.ca/sites/default/files/resources/Mine\\_Rescue\\_Heat\\_Stress\\_Report\\_2014](https://www.workplacesafetynorth.ca/sites/default/files/resources/Mine_Rescue_Heat_Stress_Report_2014)  
[Disponible uniquement en anglais]
- Xiang, J., Bi, P., Pisaniello, D., Hansen, A., et Sullivan, T. (2014). Association between high temperature and work-related injuries in Adelaide, South Australia, 2001-2010. *Occupational and Environmental Medicine*, 71(4), 246–252. <https://doi.org/10.1136/oemed-2013-101584>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Xing, X., Zhong, B., Luo, H., Rose, T., Li, J., et Antwi-Afari, M.F. (2020). Effects of physical fatigue on the induction of mental fatigue of construction workers: A pilot study based on a neurophysiological approach. *Automation in Construction*, 120, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103381>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Yamamoto, S., Iwamoto, M., Inoue, M., et Harada, N. (2007). Evaluation of the effect of heat exposure on the autonomic nervous system by heart rate variability and urinary catecholamines. *Journal of Occupational Health*, 49(3), 199-204. <https://doi.org/10.1539/joh.49.199>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Yang, H., Yu, J., Zo, H., et Choi, M. (2016). User acceptance of wearable devices: An extended perspective of perceived value. *Telematics and Informatics*, 33(2), 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2015.08.007>  
[Disponible uniquement en anglais]

- Yaron, M., Lowenstein, S.R., et Koziol-McLain, J. (1995). Measuring the accuracy of the infrared tympanic thermometer: Correlation does not signify agreement. *The Journal of Emergency Medicine*, 13(5), 617–621. [https://doi.org/10.1016/0736-4679\(95\)00065-i](https://doi.org/10.1016/0736-4679(95)00065-i)  
[Disponible uniquement en anglais]
- Young, H.A., et Benton, D. (2018). Heart-rate variability : A biomarker to study the influence of nutrition on physiological and psychological health? *Behavioural Pharmacology*, 29(2 and 3-Spec Issue), 140–151. <https://doi.org/10.1097/FBP.0000000000000383>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Zander, K.K., Mathew, S., et Garnett, S.T. (2018). Exploring heat stress relief measures among the Australian labour force. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(3), 401. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030401>  
[Disponible uniquement en anglais]
- Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., Rong, R., Fyfe, J., Li, G., et Kharin, V.V. (2019). Les changements de température et de précipitations au Canada. Dans le chapitre 4 in Bush, E. and Lemmen, D.S. (Eds.) *Rapport sur le climat changeant du Canada* (pp. 112–193). Ottawa, ON : Government of Canada. <https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/Climate-change/pdf/CCCR-Chapter4-Les%20changes%20de%20tempe%CC%81rature%20et%20de%20pre%CC%81cipitations%20au%20Canada-1.pdf>
- Zhang, Y., Webb, R.C., Luo, H., Xue, Y., Kurniawan, J., Cho, N.H., Krishnan, S., Li, Y., Huang, Y., et Rogers, J.A. (2015). Theoretical and Experimental Studies of Epidermal Heat Flux Sensors for Measurements of Core Body Temperature. *Advanced Healthcare Materials*, 5(1), 119–127. <https://doi.org/10.1002/adhm.201500110> [Disponible uniquement en anglais]

# Questionnaire de **dépistage** du stress thermique

(pour le contrôle par soi-même ou une deuxième personne)

0 = Pas de gêne

1 = Gêne légère

2 = Gêne modérée

3 = Gêne sévère

## NOTES

Quelle est l'intensité de la chaleur que vous ressentez? (c.-à-d. quelle est votre sensation de chaleur?)

0 1 2 3

Avez-vous l'impression que votre cœur bat très vite?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous des douleurs musculaires ou des crampes musculaires?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous mal à la tête?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Souffrez-vous de vertiges ou de somnolence?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Vous sentez-vous instable lorsque vous êtes debout?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Vous sentez-vous fatigué(e)?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous du mal à réfléchir?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous du mal à respirer ou avez-vous le souffle court?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous des nausées?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

Avez-vous soif?

Non 0  Oui Évaluez l'inconfort : 1 2 3

# Indice de contrainte perceptive (PeSi)

Le PeSi est calculé comme suit (comme décrit dans Dehghan et al. (2008)).

$$\text{PeSi} = 5 \times ((\text{Score de sensation thermique} - 1) / 4) + 5 \times (\text{Score d'effort perçu} / 10).$$

Sensation thermique	Évaluer
1	Confortable
2	Légèrement chaud
3	Chaud
4	Très chaud
5	Extrêmement chaud

Effort perçu	Évaluer
0-1	Extrêmement facile
2-3	Facile
4-5	Assez facile
6-7	Assez difficile
8-9	Difficile
10	Extrêmement difficile

Appliquer le PeSi à ce tableau pour l'interprétation :

Score	Évaluer
0-2	Pas de contrainte thermique
3-4	Faible stress thermique
5-6	Stress thermique modéré
7-8	Stress thermique élevé
9-10	Stress thermique très élevé

# Questionnaire sur **la récupération** en cas de stress thermique

(pour le contrôle par soi-même ou une deuxième personne)

0 = Pas de gêne      1 = Gêne légère      2 = Gêne modérée      3 = Gêne sévère

NOTES

Avez-vous l'impression que votre cœur bat très vite?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous des douleurs musculaires ou des crampes musculaires?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous mal à la tête?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Souffrez-vous de vertiges ou de somnolence?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Vous sentez-vous instable lorsque vous êtes debout?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Vous sentez-vous fatigué(e)?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous du mal à réfléchir?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous du mal à respirer ou avez-vous le souffle court?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous des nausées?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

Avez-vous soif?

Non    0     Oui    *Évaluez l'inconfort : 1 2 3*

---

# Collecte et traitement des données VFC

Les indices du domaine temporel quantifient la variation des intervalles entre les battements en tant que déviation standard de tous les intervalles R-R capturés en millisecondes. Ils peuvent être comparés par tranches de cinq minutes (p. ex., cinq minutes au réveil) ou calculés comme une moyenne des écarts types de tous les intervalles R-R pour chaque tranche de cinq minutes d'un enregistrement de 24 heures de la VFC. En termes simples, les graphiques du domaine temporel vous montrent « comment un signal évolue dans le temps ». Selon cette méthode, un nombre élevé de VFC est généralement favorable au repos (la FC doit être basse, le système parasympathique est donc activé et la durée de chaque battement cardiaque est plus longue, avec davantage de variations de durée entre les battements) (*Shaffer et Ginsberg, 2017*). Les mesures dans le domaine fréquentiel prennent en compte la distribution des intervalles de battements cardiaques qui se situent dans des bandes de fréquences spécifiques, exprimées en Hertz (Hz) et divisées en : ultra-basse (ULF :  $<0,003\text{Hz}$ ), très basse (VLF :  $0,003\text{-}0,04\text{Hz}$ ), basse (LF :  $0,04\text{-}0,15\text{Hz}$ ) et haute (HF :  $0,15\text{-}0,4\text{Hz}$ ). Les graphiques du domaine fréquentiel illustrent « la part du signal qui se trouve dans chaque bande de fréquence donnée », sur une plage de fréquences (dans ce cas,  $0,003\text{-}0,4\text{ Hz}$ ). Le dispositif de mesure doit échantillonner à un taux relativement élevé (p. ex. 250 Hz) pour capturer ces données.

Les données de fréquence sont analogues à un prisme qui réfracte la lumière en ses différentes longueurs d'onde; chaque composante peut vous indiquer différents aspects de la santé cardiaque (*Electrophysiology, 1996*).

Les bandes ULF et VLF sont mieux surveillées sur une période de 24 heures. On pense que les bandes ULF sont principalement alimentées par des facteurs biologiques à action lente, y compris la  $T_{\text{centrale}}$ , qui sont censés influencer ces relevés. Les bandes VLF semblent être régulées par le système nerveux intrinsèque du cœur et de mauvaises lectures sur cette longueur de bande sont corrélées à des résultats négatifs pour la santé (*Shaffer et Ginsberg, 2017*), y compris la mort arythmique (*Bigger et al., 1992*), et le syndrome de

stress post-traumatique (*Shah et al., 2013*).

À ce jour, l'application de ces mesures est limitée et, tant que des progrès technologiques n'auront pas été réalisés, il est peu probable que cette variable puisse être utilisée sur les lieux de travail comme moyen d'atténuer le stress thermique chez les travailleurs.

Les bandes LF et HF sont les fréquences les plus souvent signalées et les mieux étudiées à ce jour. La bande LF reflète principalement l'activité des barorécepteurs au repos. La puissance LF peut être produite par l'activation des systèmes nerveux parasympathique et sympathique via la régulation de la pression artérielle; mais LF est généralement interprétée comme un reflet de l'activation sympathique (*Bigger et al., 1992; Shaffer et Ginsberg, 2017; Shah et al., 2013*). La bande HF est également appelée bande respiratoire, car elle correspond aux variations de la FC liées au cycle respiratoire; la longueur de la FC augmente pendant l'inspiration et diminue pendant l'expiration (*Bigger et al., 1992; Shaffer et Ginsberg, 2017; Shah et al., 2013*). La bande HF reflète l'activité parasympathique et des mesures de puissance HF plus faibles sont corrélées à des niveaux accrus de stress, de panique, d'anxiété ou d'inquiétude. La bande HF augmente généralement la nuit et diminue le jour. Elle est souvent utilisée comme indicateur de l'état de préparation, car de mauvais résultats pendant la nuit suggèrent une mauvaise récupération des facteurs de stress de la veille.

## Annexe G : Recherche et soutien

La formation et l'assistance technique sont disponibles auprès de votre association de santé et de sécurité.

Les associations de santé et de sécurité de l'Ontario, le Centre de santé et de sécurité des travailleurs et les cliniques de santé au travail pour les travailleurs de l'Ontario fournissent des informations spécifiques au lieu de travail, ainsi que des services de formation et de conseil pour la prévention des maladies et des blessures.

Tous les partenaires du système SST font partie du comité directeur de la prévention des maladies professionnelles qui a soutenu ce projet.

- [Centre d'expertise en recherche sur les maladies professionnelles](#)
- [Centre de recherche sur la sécurité et la santé au travail](#)
- [Association pour la santé et la sécurité dans les infrastructures](#)
- [Institut pour le travail et la santé](#)
- [Occupational Cancers Research Centre](#)
- [Occupational Health Clinics for Ontario Workers](#)
- [Ministère du travail, de l'immigration, de la formation et du développement des compétences de l'Ontario](#)
- [Public Services Health et Safety Association](#)
- [Workers Health et Safety Centre](#)
- [Workplace Safety North](#)
- [Workplace Safety et Prevention Services](#)
- [Workplace Safety and Insurance Board](#)

D'autres sources d'information sur le stress thermique peuvent être trouvées dans la liste des ressources supplémentaires provenant de diverses sources au bas de la page de la [boîte à outils contre le stress thermique](#).