

État de l'art sur les technologies actuelles facilitant une gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels

Alireza Saidi
Chantal Gauvin

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1172-fr



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

Dans l'esprit de la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST) et de la Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles (LATMP), la mission de l'IRSSST est de :

Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
ISBN 978-2-89797-250-9 (PDF)

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2022

IRSSST - Direction des communications, de la veille
et de la mobilisation des connaissances
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

État de l'art sur les technologies actuelles facilitant une gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels

Alireza Saidi, Chantal Gauvin

IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1172-fr



Avis de non-responsabilité

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

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

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier monsieur Michel Asselin, le directeur du Service prévention des risques chimiques, biologiques, mécaniques et physiques à l'IRSST, pour l'ensemble des échanges constructifs tout au long des recherches et de la préparation de ce rapport.

Ils remercient monsieur Franck Sgard, chercheur et responsable du champ de recherche prévention des risques mécaniques et physiques à l'IRSST, pour ses conseils dans l'élaboration, la réalisation et, plus particulièrement, l'orientation scientifique de ce projet.

Les auteurs souhaitent par ailleurs exprimer leurs sincères remerciements à monsieur Luiz Melo, professionnel scientifique à la Direction scientifique de l'IRSST, pour la revue des recherches effectuées sur la thermorégulation dans les vêtements de protection par des centres de recherche en santé et en sécurité du travail, et qui a grandement contribué à l'analyse des résultats du présent projet.

Ils remercient également monsieur Stéphane Hallé, professeur à l'École de technologie supérieure, monsieur Ludwig Vinches, professeur adjoint à l'Université de Montréal, monsieur Denis Marchand, professeur à l'Université du Québec à Montréal, madame Tricia Carmichael, professeure à l'Université de Windsor, monsieur Fabio Cicoira, professeur à Polytechnique Montréal et madame Justine Decaens, directrice innovation technologique - textiles intelligents au Groupe CTT, pour les discussions scientifiques qui ont permis de mieux orienter les recherches et les analyses de ce projet.

Merci à l'ensemble des fabricants, des fournisseurs et des représentants des compagnies qui ont bien voulu partager des documents techniques avec nous et répondre à nos questions par courriels, appels téléphoniques et vidéoconférences.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	VI
ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	VII
INTRODUCTION	1
1. ÉTAT DES CONNAISSANCES	8
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	12
3. MÉTHODOLOGIE	13
3.1 Revue des études antérieures	13
3.2 Collecte de données techniques sur les systèmes disponibles dans le commerce.....	14
3.3 Analyse des données compilées.....	15
3.4 Synthèse des résultats.....	16
4. RÉSULTATS	17
4.1 Détection du stress thermique en temps réel	17
4.1.1 Détection du stress thermique en temps réel : revue de la littérature.....	17
4.1.2 Détection du stress thermique en temps réel : produits commerciaux	25
4.2 Capteur de température	32
4.2.1 Capteur de température : revue de la littérature	33
4.2.2 Capteur de température : produits commerciaux	49
4.3 Actuateur chauffant.....	55
4.3.1 Actuateur chauffant : revue de la littérature	58
4.3.2 Actuateur chauffant : produits commerciaux	72
4.4 Actuateur refroidissant	79
4.4.1 Actuateur refroidissant : revue de la littérature.....	81
4.4.2 Actuateur refroidissant : produits commerciaux	103
4.5 Analyses de brevets dédiés à la gestion thermique intelligente.....	110
5. DISCUSSION	113
5.1 Détection de stress thermiques.....	113
5.2 Capteur de température.....	116
5.3 Actuateur chauffant.....	120
5.4 Actuateur refroidissant	124
CONCLUSION.....	129

BIBLIOGRAPHIE	132
ANNEXE A	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Mots-clés utilisés dans la revue des études antérieures.....	13
Tableau 2.	Nombre d'entreprises répertoriées concernant les actuateurs chauffants électriques à utiliser dans la gestion thermique intelligente	73
Tableau 3.	Comparaisons des caractéristiques de divers types de vêtements refroidissants (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Yang, Yifan, 2016).....	95
Tableau 4.	Nombre d'entreprises répertoriées concernant les actuateurs refroidissants utilisés dans la gestion thermique	104
Tableau 5.	Analyses du nombre de brevets déposés en lien avec les différents moyens technologiques à mettre en œuvre dans la gestion thermique intelligente.....	111
Tableau 6.	Systèmes commerciaux de détection de signes biométriques facilitant la détection de stress thermique, sous la forme d'accessoires portables ou de textiles intelligents (dernière consultation : avril 2020)	156
Tableau 7.	Produits commerciaux de détection des signes biométriques facilitant la détection de stress thermique sous forme de patchs intelligents (dernière consultation : avril 2020)	159
Tableau 8.	Produits commerciaux de détection en temps réel des températures corporelles, microclimatiques ou environnementales, à porter par un individu (dernière consultation : avril 2020)	160
Tableau 9.	Échelle de maturité technologique TRL définie par « Innovation, Sciences et Développement économique Canada », qui s'inspire de l'échelle élaborée par la NASA (Héder, 2017).....	163

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Répartition des articles analysés pour la détection du stress thermique en temps réel en fonction du type de technologie déployée.	18
Figure 2.	Indice de contrainte physiologique (PSI) (ligne continue), calculé à partir de T_{rec} (cercle ouvert) et FC (triangle ouvert) de 3 sujets exposés au même niveau de contrainte thermique	20
Figure 3.	Comparaison des données mesurées sur le terrain ($\circ$) et des valeurs prédites par la version optimisée du modèle BTCM amélioré ($\blacksquare$)	22
Figure 4.	Exemples de dispositifs portables, disponibles dans le commerce, pour surveiller les signaux biométriques	28
Figure 5.	Répartition des articles analysés concernant les capteurs de température à utiliser dans la gestion thermique intelligente en fonction du principe technologique.	34
Figure 6.	La température rectale mesurée par rapport à la température prédite ($^{\circ}\text{C}$).	39
Figure 7.	Intégration de thermistance dans le textile	42
Figure 8.	Capteur de température flexible à base de polymères conducteurs et pouvant être intégrés dans des textiles	47
Figure 9.	Exemples de dispositifs portables, disponibles dans le commerce et dédiés à la saisie de la température en temps réel.....	52
Figure 10.	Répartition des articles analysés concernant les actuateurs chauffants électriques à utiliser dans la gestion thermique intelligente.	59
Figure 11.	Tricot chauffant et son comportement thermique	61
Figure 12.	Étude du comportement des textiles conducteurs à utiliser dans la conception d'actuateur chauffant	65
Figure 13.	Exemples d'actuateurs chauffants disponibles dans le commerce	75
Figure 14.	Représentation des mécanismes de perte de chaleur du corps	79
Figure 15.	Répartition des articles analysés concernant les actuateurs refroidissants à utiliser dans la gestion thermique intelligente.	82
Figure 16.	Étude de la performance d'un vêtement refroidissant FCG	85
Figure 17.	Prototype d'un vêtement refroidissant FCG à l'eau avec un réseau tubulaire de distribution de fluide	86
Figure 18.	Prototypes d'un vêtement refroidissant à ventilateur	91
Figure 19.	Le schéma de la vue en coupe d'un coussin refroidissant à dessiccateur sous vide	94
Figure 20.	Étude des performances d'un vêtement refroidissant hybride	98

Figure 21.	Conception de structure thermiquement adaptable à l'aide des matériaux avancés	102
Figure 22.	Exemples d'actuateurs refroidissants disponibles dans le commerce	107
Figure 23.	Exemples du nombre de brevets en lien avec la gestion thermique intelligente.....	112

SOMMAIRE

Hormis les lésions dues à un contact direct avec des substances ou avec des objets chauds ou froids, l'exposition à des températures extrêmes dans les milieux de travail implique des dangers physiques pour les travailleurs. Un travailleur mal acclimaté peut avoir une performance et une vigilance amoindries ; il peut donc être plus vulnérable à des risques d'accidents et de blessures. En raison de l'incompatibilité des normes mises en place avec certains milieux de travail et des manques de thermorégulation dans beaucoup d'équipements de protection, les contraintes thermiques demeurent parmi les risques physiques les plus présents dans de nombreux secteurs de travail.

Or, un grand nombre de ces problèmes peuvent être surmontés grâce aux technologies de textiles intelligents permettant une thermorégulation intelligente dans les équipements de protection individuels. Dans un tel contexte, la présente étude a été menée afin de mieux documenter l'ensemble des connaissances actuelles sur ces technologies, en dressant l'état de l'art des systèmes disponibles dans le commerce et en recensant les avancées réalisées dans le cadre des travaux de recherche antérieurs.

Une base de données techniques et scientifiques a d'abord été créée à partir 1) d'une revue des études antérieures portant sur l'élaboration de systèmes intégrés de thermorégulation à base de textiles intelligents et sur le développement de l'électronique flexible, et 2) d'une collecte de données techniques sur les systèmes existants dans le commerce, grâce aux informations disponibles sur les sites internet des fabricants et sur les fiches techniques des produits commercialisés. Cette base de données a par la suite été analysée selon quatre catégories : (i) détection du stress thermique en temps réel, (ii) capteur de température, (iii) actuateur chauffant et (iv) actuateur refroidissant.

L'analyse des données compilées a permis de discuter des avantages potentiels et des limites des avancées technologiques actuelles, et de débattre de la faisabilité de leur adaptation à une utilisation en santé et en sécurité du travail. Afin de mieux élucider l'écart nécessaire à combler pour faciliter l'adaptation et l'intégration de ces systèmes à des équipements de protection individuels, leurs lacunes technologiques ont été examinées pour faire ressortir les axes d'optimisation des systèmes actuels et ainsi mieux guider l'élaboration de stratégies de développement à mettre en place.

À l'aide d'une analyse qualitative, quelques perspectives de travaux futurs sont également présentées.

ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
ANT	Technologie de réseau de capteurs sans fil multicast conçue et commercialisée par ANT Wireless
BLE	Bluetooth à basse consommation (<i>Bluetooth Low Energy</i>)
BTM	Modèle de confort thermophysique de Berkeley (<i>Berkeley Thermophysiological Comfort Model</i>)
CHSI	Indice cumulatif de contrainte thermique (<i>Cumulative Heat Strain Index</i>)
CPC	Vêtements de protection chimique (<i>Chemical Protective Clothing</i>)
CVRI	Indice de réserve cardiovasculaire (<i>Cardiovascular Reserve Index</i>)
DEL	Diode électroluminescente
ECG	Électrocardiographie
ESM2M	Modèle climatique de système terrestre - version du modèle océanique modulaire (<i>Earth System Model - Modular Ocean Model Version</i>)
FC	Fréquence cardiaque (nombre de battements cardiaques par unité de temps)
FCG	Vêtements refroidissants par circulation de fluide (<i>Fluid Cooling Garment</i>)
HI	Indice de la chaleur (<i>Heat Index</i>)
HSI	Indice de stress thermique (<i>Heat Stress Index</i>)
IR	Infrarouge
NASA	Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (National Aeronautics and Space Administration)
NTC	Coefficient de température négatif (<i>Negative Temperature Coefficient</i>)
PEDOT-PSS	Complexe polymérique poly (3,4-éthylènedioxythiophène)-poly(styrène sulfonate) de sodium
PCM	Matériau à changement de phase (<i>Phase Change Material</i>)
PDMS	Poly diméthylsiloxane
PeSI	Indice de contrainte perceptuelle (<i>Perceptual Strain Index</i>)
PPE	Équipement de protection individuel (<i>Personal Protective Equipment</i>)
PPG	Photoplethysmographique
PSI	Indice de contrainte physiologique (<i>Physiological Strain Index</i>)
PTC	Coefficient de température positif (<i>Positive Temperature Coefficient</i>)
RH%	Humidité relative (<i>Relative Humidity</i>), exprimée en %

Acronyme	Définition
RFID	Identification par radiofréquence (<i>Radio-Frequency Identification</i>)
RPE	Échelle de perception de l'effort (<i>Rating of Perceived Exertion</i>)
RTD	Détecteur de température à résistance électrique (<i>Resistance Temperature Detector</i>)
SpO ₂	Taux de saturation sanguin en oxygène
T _c	Température centrale (interne) du corps
T _s	Température de la peau
TS	Sensation thermique (<i>Thermal Sensation</i>)
TRL	Échelle de maturité d'une technologie (<i>Technology Readiness Level</i>)
T _{rec}	Température rectale
UHF	Ultra haute fréquence
VFC	Variabilité de la fréquence cardiaque
VO ₂ max	Consommation maximale d'oxygène exprimée par le volume maximal d'oxygène consommé
WBGT	Température au thermomètre à bulbe humide (<i>Wet-Bulb Globe Temperature</i>)

INTRODUCTION

Selon le dépôt des données de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), 4 295 lésions associées aux températures extrêmes ont été reconnues et acceptées entre 2012 et 2016. Les débours totaux pour ce type de lésions ont atteint environ 25 M\$ pour cette période. D'après les statistiques de la CNESST, ces lésions sont liées au contact direct avec des substances ou des objets chauds ou froids, ou à une exposition à un environnement chaud ou froid. Alors que les contraintes thermiques sont parmi les risques physiques les plus présents dans divers secteurs de travail, les données d'indemnisation ne permettent pas d'évaluer toute l'ampleur de cette problématique en raison de la non-reconnaissance de certaines lésions par la loi au Québec ou bien des difficultés à bien identifier toutes les lésions directement ou indirectement provoquées par les contraintes thermiques. Par exemple, la législation aux États-Unis inclut depuis plusieurs années la présomption que les lésions cardiovasculaires peuvent être reliées à la lutte contre les incendies (Federal Emergency Management Agency, 2018), ce qui n'est pas encore le cas au Québec. Malgré les normes existantes sur les conditions de travail et les avancées dans l'élaboration des équipements de protection, les risques de lésions dues à des contraintes thermiques demeurent un problème majeur de santé au travail dans les économies développées ou en voie de développement (Lucas, Epstein et Kjellstrom, 2014). En une seule année, 2012-2013, aux États-Unis, l'Office de la sécurité et de la santé au travail (OSHA) a invoqué 13 cas de décès en raison d'un manque d'espaces de travail exempts de risques reconnus liés à la chaleur (Arbury *et al.*, 2014).

En effet, de nombreux emplois exposent les travailleurs à des conditions thermiques extrêmes qui peuvent affecter la capacité de travail et la santé des travailleurs. Des environnements de travail intérieurs ou extérieurs peuvent imposer une grande charge calorifique aux travailleurs par une combinaison de la chaleur métabolique due au travail physique, des facteurs environnementaux (température de l'air, humidité, mouvement de l'air, transfert de chaleur par radiation), des procédés spécifiques au milieu de travail et du port obligatoire d'un équipement de protection s'opposant à la dissipation de la chaleur (Cheung, Lee et Oksa, 2016). Les travailleurs des secteurs de la construction, des mines, de la fonderie et de la première transformation des métaux, de la fabrication de produits métalliques, des travaux forestiers et agricoles, de la fabrication d'aliments, et des services de prévention d'incendies et de police sont parmi les secteurs les plus exposés à des risques dus à la chaleur (Jacklitsch *et al.*, 2016). De plus, les travailleurs dans les domaines de la construction, de l'agriculture, de la pêche, de la transformation des aliments, de l'exploitation forestière, et de toute autre activité extérieure s'exposent à des risques de contraintes causées par le froid (Flouris, Westwood et Cheung, 2007).

D'après une étude statistique basée sur un recensement effectué en 2011, le nombre de travailleurs susceptibles d'être exposés, à un moment ou à un autre, à des températures extrêmes au Québec est estimé à plus de 510 000 personnes (Duguay, Prud'homme,

Boucher, Busque et Lebeau, 2016). Selon la même étude, plus de 240 000 travailleurs au Québec peuvent s'exposer à des risques de brûlure dans leur travail. L'exposition à des températures extrêmes peut effectivement engendrer un état de stress thermique¹ chez le travailleur qui, par définition, survient lorsque le corps n'est pas capable de maintenir sa température entre 36 et 37 °C (Jacklitsch *et al.*, 2016). Lorsque cet équilibre est perturbé, le stress thermique présente une multitude de problèmes potentiels pouvant réduire la capacité opérationnelle ou augmenter les risques de maladie aigüe ou chronique pour les travailleurs (Cheung *et al.*, 2016). La syncope due à la chaleur, l'épuisement par la chaleur, le coup de chaleur, la déshydratation, les crampes de chaleur, l'éruption miliaire, l'hyponatrémie et la rhabdomyolyse sont parmi les maladies ou troubles de santé dus à une exposition à la chaleur. L'hypothermie, la gelure, le pied d'immersion, et l'engelure sont les blessures ou maladies les plus importantes causées par une exposition au froid extrême (Cheung *et al.*, 2016). Par conséquent, la prévention des risques de contraintes thermiques est très importante afin d'éviter tout effet néfaste sur la santé et sur la sécurité des travailleurs. De plus, une prévention adéquate des risques de contraintes thermiques procure un sentiment d'agrément chez le travailleur envers son environnement de travail (Lucas *et al.*, 2014).

En plus d'être directement à l'origine de lésions graves, les contraintes thermiques peuvent entraîner indirectement des accidents et d'autres types de blessures dans un milieu de travail. En effet, l'état de stress lié à la chaleur ou au froid peut nuire au fonctionnement cognitif, à la prise de décision et à l'exécution des tâches, ce qui peut augmenter le risque d'accident sur le lieu de travail (Cheung *et al.*, 2016). La contrainte thermique oblige l'individu à affecter ses ressources attentionnelles à l'évaluation et à la gestion de la menace, ce qui réduit sa capacité de traitement des informations pertinentes pour la tâche (Hancock, Ross et Szalma, 2007). En effet, l'acclimatation face à l'exposition au froid qui réunit plusieurs ajustements physiologiques peut impacter d'une manière significative les réponses physiologiques d'un travailleur en matière de dextérité, de puissance, de capacité d'apprentissage et de mémorisation, de temps de réponse et de mémoire de travail. Un travailleur mal acclimaté peut avoir une performance et une vigilance amoindries et peut donc être exposé encore plus à des risques d'accidents et de blessures (Launay et Savourey, 2009). En effet, lors d'une exposition continue au froid, le corps tente d'éviter d'autres pertes de chaleur en générant activement de la chaleur en frissonnant (Bell, Tikuisis et Jacobs, 1992). Cependant, cette production de chaleur implique une très grande dépendance à des réserves limitées de glucides qui peuvent réduire la tolérance au travail en générant un état d'inconfort perceptuel pouvant affecter la cognition et augmenter le risque de comportements dangereux, ainsi qu'une diminution de la dextérité manuelle et de la coordination motrice pouvant nuire aux performances au

¹ stress thermique : Sous l'effet d'un changement dans la température ambiante, le corps subit un état de stress appelé le stress thermique. (Le stress thermique dans les lieux de travail - Guide, LT-313-11-18F, Emploi et Développement social Canada)

travail ou augmenter le risque d'accident (Cheung *et al.*, 2016). Lors d'une exposition prolongée au froid, il existe aussi des preuves d'une thermogénèse² élevée sans tremblement, provoquée par des modifications métaboliques ou musculaires qui peuvent affecter l'exécution des tâches durant le travail (Launay et Savourey, 2009).

Un des principaux risques indirectement liés au travail dans le froid extrême est celui de la diminution de la fonction manuelle qui peut rapidement nuire aux performances dans l'exécution d'une tâche et augmenter le risque d'accident ou intensifier une situation dangereuse (Heus, Daanen et Havenith, 1995). Des travaux de recherche ont pu démontrer que la dextérité manuelle est détériorée pendant le travail dans les entrepôts frigorifiques (Tochihara, Ohkubo et Komine, 1995). En effet, les chercheurs ont pu constater que les changements dans les tremblements des mains et la pression artérielle diastolique des travailleurs dans des entrepôts avec des températures de -20 à -23 °C étaient significativement plus importants que ceux des travailleurs dans des entrepôts à une température de 12 à 15 °C (Tochihara *et al.*, 1995). Par ailleurs, une revue de la littérature a montré que les lésions musculosquelettiques sont un autre impact indirect sur la santé des environnements de travail froids (Pienimäki, 2002). Le bas du dos et les genoux, ainsi qu'une prévalence accrue de microtraumatismes répétés, tels que le syndrome du canal carpien, sont les sièges de lésions les plus fréquents chez les travailleurs des entrepôts frigorifiques (Pienimäki, 2002). Le froid peut également diminuer la vigilance et nuire aux performances cognitives, amplifiant le risque d'actions mentales inappropriées menant à des accidents. En effet, une étude a pu démontrer que le temps de réaction et la détection de signaux diminuent chez les sujets exposés à une température de -20 °C pendant plus de 45 minutes (Flouris *et al.*, 2007). Les performances de conduite dans des environnements froids à 5 °C s'avèrent aussi diminuées de 16 % par rapport à des environnements de 20 °C (Daanen, Van De Vliert et Huang, 2003). Les environnements froids sont souvent des milieux de travail à risque en raison de la condensation, de la glace ou de la neige, avec des risques plus élevés de glissades et de chutes. Ces risques peuvent être également amplifiés par une diminution de la force, de la proprioception et du contrôle moteur ou de la fonction cognitive durant une exposition prolongée au froid extrême (Cheung *et al.*, 2016). Finalement, le froid aux extrémités semble constituer un facteur accentuant le risque et la gravité du syndrome de vibration main-bras chez les utilisateurs d'équipements vibratoires tels que les marteaux-piqueurs, les scies mécaniques ou les motoneiges (Carlsson et Dahlin, 2014).

Des études antérieures ont aussi pu mettre en évidence une hausse des risques de mortalité, de morbidité et une augmentation de l'incidence des lésions professionnelles en raison de l'exposition à la chaleur. En effet, la fatigue, la diminution de la vigilance, l'inconfort physique et la détérioration des performances psychomotrices sont des symptômes documentés en santé au travail à la suite d'une exposition à la chaleur

² Thermogénèse : production de la chaleur physiologique.

(Tawatsupa *et al.*, 2010) qui peuvent être à l'origine d'accidents professionnels (Adam-Poupart *et al.*, 2015). Des chercheurs ont constaté que des diminutions de la performance physique, visuomotrice, psychomotrice et cognitive peuvent se produire lorsque 2 % ou plus du poids corporel est perdu à cause de la restriction d'eau, de la chaleur ou de l'effort physique (Grandjean et Grandjean, 2007). Selon une étude financée par l'IRSST, outre les problèmes de santé en lien avec la chaleur, le risque d'accidents de travail augmente de façon log-linéaire avec les températures extérieures en été au Québec. Des hausses de 42 % du nombre journalier de lésions pour les problèmes de santé reliés à la chaleur et de 0,2 % pour les accidents de travail (nombre journalier moyen = 306, allant de 54 à 641) ont été estimées pour chaque 1 °C supplémentaire de la température maximale journalière, entre -7,8 et 37,3 °C (Adam-Poupart *et al.*, 2015). Dans une étude similaire effectuée en Italie, une augmentation des admissions hospitalières pour des accidents de travail pendant les étés de 1998 à 2003 a pu être associée à des conditions météorologiques chaudes. L'analyse des données a montré que le nombre maximal d'hospitalisations pour divers accidents professionnels pendant l'été était atteint durant les journées chaudes où la température apparente moyenne atteignait des valeurs de 24,8 à 27,5 °C (Morabito, Cecchi, Crisci, Modesti et Orlandini, 2006).

L'exposition à des températures extrêmes peut aussi diminuer ponctuellement la capacité de travail et impacter la productivité (Cheung *et al.*, 2016). En effet, des travaux de recherche ont pu démontrer une relation purement physique de type « U inversé » entre la température ambiante et le temps de tolérance à l'exercice maximal avec une diminution des temps de tolérance à des températures faibles et élevées (Galloway et Maughan, 1997). De ce fait, une contrainte thermique peut modifier directement la capacité opérationnelle, à la fois en diminuant la tolérance au travail et en exigeant des modifications dans les horaires de travail, telles que des périodes de repos et de récupération plus longues (Cheung *et al.*, 2016). Pour certains métiers comme chez les pompiers, l'interaction entre les efforts physiques importants et la chaleur est même une des principales causes de décès (Annaheim *et al.*, 2015). L'exécution d'une tâche de pompier sous une charge de travail donnée dans un environnement chaud à 89,6 °C s'est avérée plus éprouvante sur le plan physiologique et plus stressante qu'une tâche effectuée dans des conditions ambiantes froides à 13,7 °C (Smith, D. L., Petruzzello, Kramer et Misner, 1997). Des augmentations significatives ont été observées dans la fréquence cardiaque, la température tympanique, le taux de lactate, l'échelle de perception de l'effort (RPE) et l'état d'anxiété pour les tâches effectuées dans la chaleur. La récupération s'est aussi avérée significativement plus lente après l'exécution de la tâche dans la chaleur (Smith, D. L. *et al.*, 1997). Selon les études réalisées aux États-Unis, les contraintes thermiques et physiologiques observées lors des interventions sont associées à un risque accru d'accidents cardiovasculaires, qui représentent la cause la plus fréquente de décès chez les pompiers (Smith, D., Liebig, Steward et Fehling, 2010). Selon un rapport du gouvernement fédéral aux États-Unis, 87 pompiers sont décédés dans l'exercice de leur fonction en 2017, dont 52 cas de morts associés à des

accidents cardiovasculaires dus à l'exténuation et à un effort excessif (Federal Emergency Management Agency, 2018).

Par ailleurs, les mécanismes de thermorégulation du corps humain soumis à des contraintes thermiques et les changements physiologiques qu'ils impliquent peuvent modifier les fonctions de plusieurs organes liées à l'absorption et au métabolisme des substances chimiques. Une étude a démontré que l'exposition à la chaleur s'avère être associée à une augmentation de l'absorption pulmonaire et cutanée des xénobiotiques (Truchon *et al.*, 2013). À travers un bilan de connaissances, l'exposition aux substances chimiques a été évaluée pour plusieurs emplois retenus comme étant critiques à l'égard du risque de stress thermique, en tenant compte de huit catégories de produits : les solvants, les poussières, les pesticides, les hydrocarbures polycycliques aromatiques, les gaz toxiques, les métaux lourds, l'amiante/silice et les réactifs/autres substances chimiques. La révision de la littérature concernant les effets potentiels d'une exposition à la chaleur sur la cinétique et sur la toxicité des substances chimiques a permis aux auteurs de conclure qu'une exposition à la chaleur conduit à une absorption et à une toxicité accrue de la plupart des substances chimiques. Cette hausse de toxicité a été associée à l'augmentation de l'absorption des contaminants par les voies pulmonaire et cutanée, et aussi à l'augmentation des concentrations ambiantes des substances volatiles dans des températures plus élevées (Truchon *et al.*, 2013). Une autre étude concernant l'effet de l'activité physique sur la toxicocinétique de cinq solvants a démontré qu'une augmentation de la ventilation pulmonaire provoquait une hausse de l'absorption des substances les plus solubles dans le sang. Les concentrations biologiques de ces substances pouvaient même être augmentées d'un facteur 2 dans certains cas (Tardif, Charest-Tardif, Truchon et Brochu, 2008).

Selon certaines études, le contexte actuel des changements climatiques peut également accentuer les contraintes thermiques au travail (Adam-Poupart *et al.*, 2012 ; Kjellstrom et Weaver, 2009 ; Schulte et Chun, 2009). Alors que les projections du changement climatique au cours du siècle à venir suggèrent une hausse de l'incidence de la mortalité liée à la chaleur tant dans le grand public que dans les milieux de travail (Gubernot, Anderson et Hunting, 2014 ; Lundgren, Kuklane, Gao et Holmer, 2013), d'autres études suggèrent que le changement climatique entraînera une productivité réduite en raison des limites d'exposition professionnelle tout en augmentant la demande économique (Schulte et Chun, 2009). La combinaison des températures au thermomètre à bulbe humide (WBGT) provenant de l'analyse historique du climat de la planète et des projections du modèle climatique de système terrestre (ESM2M) avec des recommandations industrielles et militaires relatives à la capacité de travail (la capacité professionnelle d'un individu acclimaté à effectuer en toute sécurité un travail soutenu) sous une contrainte thermique, a permis aux chercheurs de calculer une réduction de 90 % de la capacité de travail au cours des mois de pointe des dernières décennies par rapport à la première moitié du vingtième siècle en raison de la hausse de la chaleur environnementale. Les projections prévoient même une réduction de la capacité de main-d'œuvre de 80 % pendant les mois de pointe d'ici 2050 (Dunne, Stouffer et John, 2013).

En raison de l'importance de la prévention des risques de contraintes thermiques, des recommandations et des mesures sont préconisées par les différents paliers gouvernementaux (Emploi et Développement social Canada, 2018). Par exemple, le règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (Chapitre S-2.1, r.13, Section XIII) demande à ce que l'indice de contrainte thermique soit mesuré par des indices de température de type WBGT dans les établissements de plus de 50 travailleurs et où les individus sont soumis à des conditions thermiques intenses. Si l'indice de contrainte thermique calculé atteint ou dépasse la courbe de travail continu indiquée dans l'annexe V de ce règlement, des mesures particulières comme le réaménagement du poste de travail, le contrôle de la charge de travail et le port des équipements de protections appropriés sont à prévoir. Selon ce type de réglementations, lorsque les critères des indices de contrainte thermique sont respectés, les conditions ambiantes ne devraient pas provoquer des mécanismes réflexes de thermorégulation corporelle chez le travailleur. Malgré le respect de ces critères, le mécanisme thermorégulateur de certains travailleurs peut se mettre en jeu en fonction de leur situation individuelle telle que l'âge, le sexe, la forme physique ou l'état de santé de la personne (Truchon *et al.*, 2013).

Par ailleurs, les indices pour mesurer la contrainte thermique sont loin d'être applicables dans certains milieux tels que l'agriculture (Dessureault et Tellier, 2008). De plus, les critères des indices s'avèrent parfois très prudents et surestiment, dans certaines situations, le niveau de contrainte thermique, car ces directives sont conçues pour protéger un plus grand nombre de personnes de manière conservatrice, de sorte que la tolérance opérationnelle peut être réduite de manière arbitraire pour la majorité des travailleurs (Cheung *et al.*, 2016). Les mêmes recommandations peuvent parfois sous-estimer l'exposition dans le cas des travaux lourds (Dessureault et Gressard, 2006). Par exemple, l'indice WBGT ne prend pas en compte le mouvement de l'air et ignore les facteurs internes tels que le taux métabolique et les équipements de protection (Budd, 2008). La norme ISO 7243 (normalisation, 2017), qui énonce les valeurs de seuil WBGT pour l'acclimatation des travailleurs effectuant des tâches physiques, fait abstraction de plusieurs contraintes liées à la condition du travailleur et à l'environnement de travail en se basant sur l'hypothèse que le travailleur est en bonne santé, qu'il est physiquement apte au niveau d'activité requise et qu'il porte des vêtements de travail normalisés (Cheung *et al.*, 2016). De plus, les mesures de prévention basées sur les indices restent vagues et parfois peu réalistes face à la réalité du terrain (Dessureault, Oupin et Bourassa, 2014). Par exemple, l'analyse comparative des conditions physiologiques des travailleurs en mines profondes, en considérant différents indices des conditions environnementales (Air Cooling Power, ISO 7933 et WBGT), a révélé plusieurs enregistrements de niveaux critiques d'astreinte thermique³ de type cardiaque malgré le

³ Astreinte thermique : la réponse physiologique de l'homme exposé à la contrainte thermique qui s'exprime par des changements dans la fréquence cardiaque, la température corporelle et le débit sudoral (Dessureault et Tellier, 2008).

respect des niveaux d'exposition permis (Dessureault et Doucet, 2003).

Parmi les stratégies de lutte contre la contrainte thermique due à la chaleur, il y a les régimes d'hydratation (Lee, J. *et al.*, 2011) et les cycles de travail-repos (Parsons, 2006). Cependant, les travailleurs ne sont pas à l'abri des dangers potentiels d'une hyponatrémie, due à la surconsommation d'eau pendant l'exercice dans des environnements chauds et humides (Lee, J. *et al.*, 2011). Par ailleurs, sous l'effet d'un stress thermique non compensable, un gain de chaleur prolongé au-delà de la capacité de dissipation due à l'évaporation peut encore persister même pendant la période de récupération (McLellan, Daanen et Cheung, 2013). D'un point de vue général, rares sont les normes spécifiques aux tâches physiques ou les accommodations aux agents de contraintes thermiques, et elles concernent majoritairement les contraintes dues à la chaleur (Cheung *et al.*, 2016).

En plus des lacunes remarquées dans le cas des indices de contraintes thermiques, les équipements de protection individuels souffrent grandement d'un manque de confort (Dolez et Mlynarek, 2016). D'une part, dans les conditions où les travailleurs sont exposés à des niveaux de risque élevés comme la chaleur intense et les flammes, les matériaux utilisés dans la conception des vêtements de protection ont tendance à éviter la dissipation adéquate de la chaleur produite par le corps (Williams-Bell, Boisseau, McGill, Kostiuk et Hughson, 2010). D'autre part, ces équipements sont souvent lourds et peu flexibles. Ces caractéristiques contribuent aux contraintes thermiques et physiologiques subies par différentes catégories de travailleurs telles que les pompiers, les mineurs, les transformateurs de métaux et les paramédics (Marchand *et al.*, 2015). L'usage fréquent de vêtements de protection, comme ceux utilisés par les travailleurs des forces de l'ordre ou les travailleurs qui œuvrent à l'élimination des déchets dangereux, peut également causer un stress thermique supplémentaire en altérant la dissipation de la chaleur et l'évaporation de la sueur (McLellan *et al.*, 2013). D'un point de vue général, les travailleurs trouvent souvent les équipements de protection peu confortables (trop chauds, trop encombrants, etc.), ce qui n'incite pas les individus à les porter de façon régulière pour ainsi accentuer les situations à risque (Dolez *et al.*, 2018).

Force est de constater que, malgré les progrès dans la conception des équipements de protection et dans l'application des normes et recommandations mises en place, les contraintes thermiques menacent fortement la santé et la sécurité des travailleurs d'une manière directe ou indirecte, et ce, dans de nombreux secteurs d'activité. Par conséquent, il est primordial d'élaborer des outils et des équipements permettant d'assurer une gestion des risques thermiques en fonction de la situation individuelle du travailleur et de son environnement de travail en temps réel. Dans un tel contexte, les technologies de textiles intelligents pouvant être intégrées dans les équipements de protection individuels présentent un très grand potentiel pour répondre à un nombre considérable de ces problématiques (Dolez *et al.*, 2018).

1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

À l'aube de la 4^e révolution industrielle - Industrie 4.0 - qui repose sur les innovations liées à l'internet des objets, l'intelligence artificielle, la cobotique, les technologies numériques et l'exploitation des mégadonnées (Rojko, 2017), les textiles intelligents se présentent comme des outils très efficaces pour permettre aux travailleurs d'interagir non seulement avec leur environnement de travail, mais aussi de contribuer à une meilleure productivité et une meilleure sécurité au travail (Cao, 2013 ; Decaens et Vermeersch, 2016). En effet, les textiles intelligents sont capables de détecter, de réagir et de s'adapter à un grand nombre de stimuli grâce aux fonctionnalités qui leur sont attribuées (Stoppa et Chiolerio, 2014). Plusieurs articles de revue de la littérature et ouvrages ont notamment surligné le potentiel des textiles intelligents dans le domaine de la santé et de la sécurité au travail (Cao, 2013 ; Decaens et Vermeersch, 2016 ; Dolez et Mlynarek, 2016) tout en explorant les méthodes permettant leur intégration aux équipements de protection individuels (Decaens et Vermeersch, 2016). Au regard de ce potentiel, l'IRSST a exprimé son objectif de s'intéresser de plus près aux équipements de protection intelligents et de développer une programmation thématique de recherche connexe dans son plan quinquennal de production scientifique et technique 2018-2022 du champ « prévention des risques mécaniques et physiques ».

En ce qui concerne la prévention des risques de contraintes thermiques, ces technologies peuvent être exploitées afin de soutenir l'élaboration des systèmes intégrés de suivi de paramètres affectant le confort incluant les températures extérieures et intérieures du vêtement, de détection de la température corporelle (Cao, 2013 ; Decaens et Vermeersch, 2016), ainsi que des systèmes de repérage des signes avant-coureurs de stress thermique (Baratchi *et al.*, 2016). D'autre part, les textiles intelligents intégrés aux équipements de protection individuels présentent le potentiel de faciliter l'élaboration des systèmes de régulation thermique pour ainsi mieux protéger les travailleurs contre les risques de contraintes thermiques tout en leur offrant un meilleur confort. De tels équipements de protection peuvent aussi contribuer à l'optimisation des coûts relatifs à des mesures mises en place actuellement, telles que la réduction du temps de travail et un nombre de pauses plus élevé en cas de risque de contraintes thermiques (Dolez *et al.*, 2018).

Dans ce cadre, une récente étude financée par l'IRSST a exploré le potentiel de l'application des textiles intelligents en santé et en sécurité du travail (Dolez *et al.*, 2018). En dressant un portrait global de l'ensemble des technologies de textiles intelligents en matière de capteurs, d'actuateurs-indicateurs et de matériaux fonctionnels intégrés, l'étude a aussi recensé les problématiques liées à l'usage des équipements de protection traditionnels auprès des personnes-ressources telles que des conseillers en prévention d'associations sectorielles paritaires et professionnelles, des chercheurs en santé et en sécurité du travail et des représentants d'entreprises utilisatrices d'équipements de protection. Selon ce recensement, près de 50 % de l'ensemble des problèmes à pallier

grâce à l'application des textiles intelligents dotés de fonctions actives (actuateurs et indicateurs) incluent le manque de thermorégulation⁴ dans les équipements offrant un niveau de protection élevé qui sont utilisés dans des conditions de température et d'humidité extrêmes, surtout lors d'efforts intenses. Ces problèmes comprennent aussi une absence globale du confort thermique dans la plupart des équipements de protection individuels (Dolez *et al.*, 2018). La synthèse des connaissances effectuée sur les textiles intelligents a également montré que 30 % de l'ensemble des développements des fonctions actives dans les textiles intelligents impliquent la régulation des effets thermiques (Dolez *et al.*, 2018). Ces données illustrent en effet la grande capacité de ces technologies à répondre à des problématiques de gestion thermique dans les équipements de protection individuels. Un des autres besoins critiques retracés par cette étude est la nécessité d'alerter le travailleur lorsque sa température corporelle est excessive, en attendant que des systèmes thermorégulateurs intégrés prennent le relais afin de maintenir les conditions sécuritaires. Malgré le nombre important d'éléments réunis dans l'étude réalisée par Dolez et ses collègues (Dolez *et al.*, 2018), l'analyse effectuée ne procure pas de données techniques spécifiques pour les différentes technologies de textiles intelligents. Or, ces données techniques sont indispensables afin de définir les méthodes nécessaires à l'adaptation et à l'intégration de textiles intelligents aux équipements de protection individuels.

Bien que la thermorégulation à l'aide des textiles intelligents soit un sujet ayant déjà fait l'objet de travaux antérieurs, une analyse préliminaire a pu démontrer que la majorité des solutions commerciales identifiées sont dédiées aux domaines du sport et des loisirs et très peu sont liées aux équipements de protection de travail. En effet, des systèmes chauffants intégrés dans différents types de vêtements et d'accessoires ont émergé durant les dernières années (Foo, Gagliardi, Schleif et Dunne, 2017). Cependant, ces systèmes souffrent d'un manque de confort et posent des difficultés d'utilisation. Alors que certains systèmes intégrés ont présenté des risques de surchauffe (Wang, F., Gao, Kuklane et Holmér, 2010), d'autres souffrent du manque de régulation de la température (Roh et Kim, 2016). Les systèmes de refroidissement intégrés sont habituellement basés sur des dispositifs passifs composés de structures multicouches ou des revêtements fonctionnels, ce qui limite leur réactivité face aux variations de température (Donelan et Park, 2016). D'ailleurs, les systèmes intégrés de refroidissement actifs demeurent encombrants et énergivores (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2016) et parfois peu efficaces dans les conditions climatiques extrêmes (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014).

⁴ Le terme « thermorégulation » est aussi utilisé dans la science des matériaux textiles afin de désigner la capacité des vêtements ou des équipements de protection à ajuster l'échange thermique entre le corps et son environnement (Lu, Yuan *et al.*, 2020).

Un grand nombre de travaux ont aussi été consacrés au développement des systèmes autorégulateurs de température à l'aide des matériaux fonctionnels de types matériaux à changement de phase (Ramesh Babu et Arunraj, 2018 ; Salaün, 2019).

Par exemple, lorsqu'un matériau à changement de phase intégré est chauffé jusqu'au point de fusion, il absorbe de l'énergie calorifique en passant d'un état solide à un état liquide. Ce changement de phase produit un effet de refroidissement temporaire dans les couches de vêtements (Ramesh Babu et Arunraj, 2018). Toutefois, ces matériaux sont soit limités par leur enthalpie globale de changement de phase, soit par leur fenêtre thermique. En effet, ils sont actifs durant leur période de changement de phase, mais cessent de fonctionner lorsque le changement de phase est complété (Zarma, 2017).

Des produits commerciaux ayant la capacité de détecter des agresseurs thermiques à l'aide des capteurs intégrés pour atténuer les risques de contact avec des objets chauds ou froids et pour réguler l'exposition prolongée à des températures extrêmes dans les milieux de travail sont également rares. Bien que des cas isolés aient été mis au point pour certains corps de métiers dans quelques pays (Hertleer, Odhiambo et Van Langenhove, 2013), la plupart des travaux demeurent cantonnés à la recherche académique (Bu, Wu, Zeng, Koehl et Tartare, 2015 ; Kim, Siyeon et Lee, 2017 ; Roossien, Heus, Reneman et Verkerke, 2020). Une absence de solution en matière d'indicateurs alertant les travailleurs est aussi observée. Malgré les avancées technologiques des dernières années, l'association de capteurs intégrés et d'indicateurs est très rare, voire inexistante, dans le contexte de la santé et de la sécurité au travail.

Comme il s'agit d'un domaine en plein essor, des revues de la littérature font souvent l'état des connaissances dans le domaine des textiles intelligents (Basu, Jain et Khoiwal, 2019 ; Stoppa et Chiolerio, 2014 ; Zhai, Liu, Wang et Li, 2014), dont un certain nombre d'études qui évoquent leur potentielle utilisation en santé et en sécurité du travail (Decaens et Vermeersch, 2016 ; Dolez et Mlynarek, 2016 ; Yang, L. *et al.*, 2018). À notre connaissance, aucune revue n'est spécifiquement liée à l'analyse des technologies permettant la prévention des risques de contraintes thermiques à l'aide d'équipements de protection individuels intelligents. En effet, malgré les articles de revues de la littérature génériques ayant fait séparément l'état des technologies chauffantes, refroidissantes ou de capteurs thermiques intégrés aux vêtements, aucune étude ne présente une analyse complète comprenant l'ensemble des technologies facilitant une gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels. Par ailleurs, l'évolution continue des technologies de textiles intelligents dans un monde de plus en plus connecté tant au niveau sociétal qu'industriel, requière une mise à jour des connaissances afin de mieux supporter l'adaptation de telles technologies à une application en santé et en sécurité au travail.

Dans un tel contexte, la présente étude devait donc permettre de mieux documenter l'ensemble des connaissances actuelles sur les technologies facilitant une gestion thermique intelligente dans le contexte de la santé et de la sécurité au travail. L'accent a été mis sur la collecte des informations scientifiques, techniques et pratiques afin de

mieux élucider le niveau de maturité de l'ensemble des technologies potentiellement intégrables aux équipements de protection individuels pour une gestion thermique intelligente et soutenue tout au long de l'exécution des tâches. Les connaissances réunies devraient servir à mieux définir les stratégies à mettre en œuvre pour optimiser les technologies actuelles en vue de leur adaptation au domaine de la santé et de la sécurité du travail. À terme, cette étude devrait non seulement aider à tracer la feuille de route pour l'application des équipements de protection individuels intelligents dans la prévention des risques thermiques, mais aussi à mieux assister les milieux de travail quant à l'utilisation de ce type de technologies.

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à une meilleure connaissance des systèmes de gestion thermique intelligents pouvant être intégrés dans des équipements de protection individuels.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Dresser l'état de l'art des technologies actuelles en identifiant leurs avantages et leurs limites ;
- Examiner les systèmes actuellement disponibles dans le commerce ;
- Étudier les développements effectués dans le cadre de travaux de recherche antérieurs ;
- Évaluer le degré de maturité technologique des concepts identifiés dans la littérature selon l'échelle de maturité d'une technologie (TRL) ;
- Étudier l'adaptabilité des produits commercialisés à une utilisation en santé et en sécurité du travail ;
- Produire une base de connaissances afin de mieux définir le contour des travaux futurs ayant pour but de fournir des outils et des systèmes de gestion thermique intelligente aux milieux de travail au Québec.

3. MÉTHODOLOGIE

L'étude a été réalisée en quatre étapes détaillées ci-après.

3.1 Revue des études antérieures

Afin de réunir les connaissances sur les dernières avancées réalisées dans le cadre de travaux de recherche sur l'élaboration des systèmes intégrés de thermorégulation, les études expérimentales ou analytiques ainsi que les modélisations numériques sur les divers systèmes intégrés ont été passées en revue. L'analyse a inclus les systèmes à base de technologies de textiles intelligents ainsi que ceux basés sur l'électronique flexible et l'électronique extensible. Afin d'orienter la recherche des travaux effectués entre 2009 à 2019, les mots-clés du tableau 1 ont été utilisés. Les résultats de cette étape ont été regroupés en quatre catégories : (i) détection du stress thermique en temps réel, (ii) capteur de température, (iii) actuateur chauffant et (iv) actuateur refroidissant. Ainsi, des mots-clés liés à la gestion thermique intelligente pour chacune des catégories ont été associés à des mots-clés en lien avec les équipements de protection individuels. De ce fait, les bases de données telles qu'*ABI Inform*, *Blogue Équipements de protection*, *Current Contents*, *Ei COMPENDEX*, *Embase*, *Google Scholar*, *INSPEC*, *ISST*, *OSH Update*, *Pascal & Francis*, *PubMed*, *Scopus*, *ScienceDirect*, *Toxline* et *Web of Science* ont été consultées. Pour les bases de données en français, l'équivalent en français des mots-clés inscrits au tableau 1 a été utilisé.

Tableau 1. Mots-clés utilisés dans la revue des études antérieures

Catégorie de système	Mot-clé en lien avec la gestion thermique intelligente	Mots-clés associés aux équipements de protection
Détection du stress thermique en temps réel	Thermal stress detection, Thermal stress recognition, Thermal stress identification, Thermal stress awareness, Thermal strain detection, Thermal strain recognition, Thermal strain identification, Thermal strain awareness	Personal protective equipment, PPE, Personal Protective PPE
Capteur de température	Temperature sensing fabric, Temperature sensing textile, Textile heat flow sensor, Flexible temperature sensing, Flexible temperature sensor, Printed temperature sensor, Flexible thermistor, Printed thermistor, Thin-film thermistor, Flexible thermocouple, Connected temperature sensor, Flexible temperature indicator, Integrated temperature indicator	Protective apparel, Protective clothing, Protective equipment, Chemical protective clothing, CPC, Protection, Protective, Respirator
Actuateur chauffant	Heatable textile, Heating garment, Heating clothing, Heating textile, textile Heater, Heating fabric, Fibrous heating element, Fibrous heater, Heating smart textile, Powered yarn, Printed heater, Flexible heater, Wearable heater, Heating sole, Heating shoe, Heating glove, Heating helmet	Helmet, Glove, Shoe, Coverall, Coveralls, Equipment, Clothing, Garment
Actuateur refroidissant	Cooling textile, Cooling garment, Personal cooling garment, Smart cooling garment, Cooling fabric, Wearable cooler, Cooling sole, Cooling shoe, Cooling glove, Cooling helmet	

Une attention particulière a été portée aux articles publiés dans des journaux techniques et scientifiques traitant les sujets d'intérêt tels que *International Journal of Clothing Science and Technology*, *Journal of Fashion Technology & Textile Engineering*, *Journal of Industrial Textiles*, *Journal of Textile Science & Engineering*, *Textile Research Journal*, *Sensors*, *Electronics*, *Flexible and Printed Electronics*, *Sensors and Actuators A : Physical*, *Langmuir*, *IEEE Sensors Journal*, *ACS Nano*, *Nano Letters*, *Nanotechnology*, *Synthetic Metals*, *Thin Solid Films*, *ACS*, *Applied Materials & Interfaces*, etc., ainsi que des journaux traitant les problématiques liées à la santé et à la sécurité du travail comme *Ergonomics*, *Applied Ergonomics*, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, *International Journal of Industrial Ergonomics*, etc. De plus, les études reportées dans des bulletins de nouveautés sur les textiles fonctionnels et sur l'électronique flexible intégrable (*Innovation in Textiles*, *Smart Textiles and Nanotechnology*, *Printed Electronics World*, *Printed Electronics Now*, *Wearable.com*, *Techcrunch.com*, *Techradar.com*, etc.), ainsi que les comptes rendus des conférences sur les textiles intelligents et les technologies connectées portables (*E-Textiles*, *International Conference on Intelligent Textiles and Mass Customisation*, *Smart Fabrics and Wearable Technology Conference*, *Smart Fabrics Summit*, *WEAR Conference*, *Wearable-Technologies-US*, etc.) et celles concernant la santé et la sécurité du travail (*International Conference on Environmental Ergonomics*, *Annual Workplace Health & Safety Conference*, *Industrial Safety Seminar*, *Workplace Health and Safety Conference*, etc.) ont été explorés. De plus, les rapports publiés par des centres de recherche en santé et en sécurité du travail comme NIOSH, INRS, JNIOH, IFA, BAUA et d'autres organismes concernés ont aussi été consultés. Afin de compléter cette démarche et de dresser un portrait général de l'ampleur des développements effectués dans le domaine de la gestion thermique intelligente, une analyse des dépôts de demande de brevet a été réalisée. Les bureaux de brevet tels que *United States Patent and Trademark Office*, *European Patent Office*, Office de la propriété intellectuelle du Canada et *Japan Patent Office* ont été explorés. Les mêmes mots-clés que ceux présentés dans le tableau 1 ont été utilisés dans l'analyse des brevets.

3.2 Collecte de données techniques sur les systèmes disponibles dans le commerce

L'objectif principal de cette étape fut de collecter des données techniques sur les systèmes intégrés de détection, d'indication et d'activation utilisés dans des produits commercialisés permettant de faciliter potentiellement la thermorégulation intelligente dans des équipements de protection individuels. Une compilation de manufacturiers canadiens dans les domaines connexes a été réalisée à partir de la liste des membres d'Intelliwear, l'Alliance canadienne de l'industrie des textiles intelligents et des dispositifs mobiles prêt-à-porter. Par la suite, cette liste a été complétée par celle des acteurs de cette industrie à l'échelle internationale à partir des noms des exposants et des participants à des événements tels que *Wear*, *Wearit*, *Wearable Europe*, *Wearable USA*, *Organic and Printed Electronics Association*, *Wearable-technologies*, etc., et des recherches sur internet. Les mécanismes de fonctionnement de chaque système furent

répertoriés en utilisant les informations disponibles sur les fiches techniques et les sites internet des fabricants et distributeurs. Afin d'obtenir des informations plus détaillées, des appels téléphoniques ou des rencontres avec les fabricants et avec les distributeurs ont aussi été effectués. Les produits recensés ont été regroupés selon quatre catégories : détection du stress thermique en temps réel, capteur de température, actuateur chauffant et actuateur refroidissant. Dans le cas des capteurs, les indicateurs connectés de types visuels, sonores ou vibratoires ont aussi été répertoriés. En fonction de différentes catégories, des informations telles que la plage de température, la précision de détection, le temps de réaction ou d'activation, la consommation énergétique, le poids et le volume ont été compilés pour chaque produit. Les précisions traitant du genre ou de la variation de la conformation physique des produits ont aussi été prises en compte lors de cette analyse. Dès lors, tous les produits commerciaux destinés aux domaines du sport, des loisirs et de la santé ont été examinés dans cette étape.

3.3 Analyse des données compilées

Tout au long de l'avancement des deux premières étapes qui ont été menées en parallèle, l'ensemble des résultats collectés ont été analysés sous différents angles. Que ce soit pour les produits commercialisés ou pour les avancées repérées dans la revue de la littérature, des éléments tels que la technologie employée, la méthode d'intégration (à base de technologies textile – filage, filature, non-tissé, tissage, tricotage, tressage, finition –, de structures composites, ou de l'électronique intégrée, etc.), le moyen et le protocole de transmission de données, la méthode d'indication et d'avertissement, la gamme de température opérationnelle, la précision de détection, le temps de réaction ou d'activation, la consommation énergétique, le poids et le volume, le genre et la conformation physique ont été identifiés et classés sous forme de tableaux. Dans cette démarche, les technologies sélectionnées devaient montrer le potentiel d'apporter une meilleure thermorégulation tout en étant compatibles avec les équipements de protection individuels appropriés.

Les données réunies pour les produits disponibles dans le commerce ont été analysées de manière à éclaircir la faisabilité de l'adaptation de ces produits à une application en santé et en sécurité du travail. Dans un premier temps, la faculté des systèmes à être utilisés dans leur état actuel en tant qu'équipement de protection individuelle ou en combinaison avec les équipements de protection a été évaluée. Par la suite, l'étude a permis d'évaluer d'une manière qualitative l'écart nécessaire à combler afin d'adapter les spécifications des systèmes existants à une application en santé et en sécurité du travail. Dans la mesure du possible, le coût unitaire de divers systèmes commercialisés a aussi été extrait en vue de leur adoption en masse en santé et en sécurité du travail. Par ailleurs, les développements effectués dans le cadre des travaux de recherche ont été classés selon l'échelle de maturité technologique TRL (tableau 9, annexe A définie par « Innovation, Sciences et Développement économique Canada » qui s'inspire de l'échelle élaborée par la NASA (Héder, 2017). Ce classement a permis de démystifier les technologies potentiellement transférables à une application en santé et en sécurité du travail à plus court terme.

3.4 Synthèse des résultats

À partir des informations collectées et des analyses effectuées, une synthèse faisant l'état des dernières avancées technologiques en matière de systèmes intégrés ou portables de thermorégulation a été réalisée. Les lacunes des développements actuels ont été identifiées pour mettre en évidence les mesures nécessaires à l'adaptation et à l'intégration de différentes technologies à des équipements de protection individuels. À terme, l'ensemble des analyses du présent rapport permettent de définir les contours d'un écosystème, composé de joueurs académiques et industriels qui pourront éventuellement être mis à contribution pour l'élaboration de projets visant la gestion thermique intelligente et soutenue dans le contexte de la santé et de la sécurité du travail.

4. RÉSULTATS

Les résultats de cette étude sont présentés en cinq sections. Les quatre premières sections présentent les revues de la littérature et les produits commerciaux des quatre catégories de moyens à mettre en œuvre pour assurer la gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels, c.-à-d. (i) détection du stress thermique en temps réel (ii) capteur de température (iii) actuateur chauffant et (iv) actuateur refroidissant. La cinquième section présente l'analyse des dépôts de demande de brevet.

La collecte de données techniques sur les systèmes disponibles dans le commerce a permis d'établir des tableaux d'analyse détaillés pour les dispositifs permettant la détection du stress thermique en temps réel et pour les capteurs de température. Comme la présence des actuateurs permettant la gestion thermique active dans divers types de vêtements, et plus particulièrement les éléments chauffants, est devenue un courant dominant technologique dans le domaine des textiles intelligents, les produits commerciaux équipés d'actuateurs thermiques ont été analysés d'une manière plus générale. Par ailleurs, la revue de la littérature a permis de retenir dans un premier temps pas moins de 483 articles, parmi lesquels 232 ont été sélectionnées pour une analyse détaillée.

4.1 Détection du stress thermique en temps réel

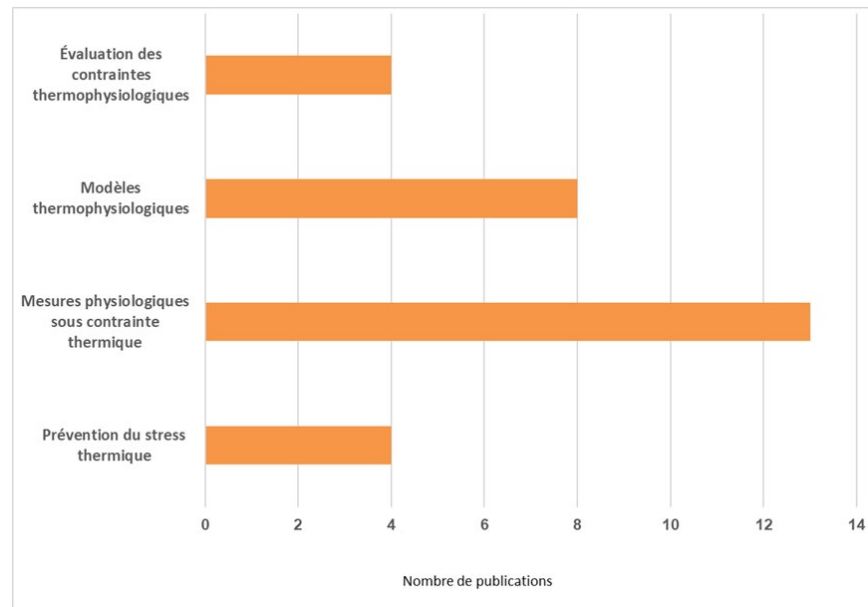
Bien qu'au cours des dernières décennies, de nombreux travaux aient étudié l'occurrence du stress thermique et les astreintes thermophysiologiques chez les athlètes et chez les travailleurs (Petruzzello, Gapin, Snook et Smith, 2009), la présente étude s'est principalement intéressée à la revue des travaux dont les résultats peuvent éventuellement contribuer à l'élaboration de systèmes de suivi en temps réel et de détection de signes avant-coureurs du stress thermique chez les travailleurs. La même stratégie a été appliquée dans l'analyse des produits commerciaux.

4.1.1 Détection du stress thermique en temps réel : revue de la littérature

La revue de la littérature a pu mettre en évidence un nombre limité d'études traitant des systèmes de détection du stress thermique en temps réel. Au total, 29 publications ont été retenues dans cette analyse qui a permis de les répartir en 4 sous-catégories en fonction des approches déployées (figure 1). La plupart des travaux retenus ne concernent pas directement l'élaboration ou l'étude des systèmes de détection du stress thermique en temps réel, néanmoins leur analyse a permis de mieux comprendre les stratégies et les méthodes mises en œuvre dans ces dispositifs. Les premières études mettant en place des modèles permettant le calcul empirique du stress thermique remontent à plus de 80 ans, au moment où des chercheurs ont développé un indice de température opérationnelle qui prenait en compte la production de chaleur métabolique, le transfert de chaleur entre le corps et l'environnement et la capacité d'évaporation dans l'environnement (Winslow, Herrington et Gagge, 1937). À partir de cet indice, plusieurs

autres indices furent développés par la suite, dont le plus connu d'entre eux est l'indice de stress thermique (HSI), qui a été largement repris des années plus tard, car il combinait des variables environnementales et l'activité corporelle (Belding et Hatch, 1955).

Figure 1. Répartition des articles analysés pour la détection du stress thermique en temps réel en fonction du type de technologie déployée.



L'indice HSI, qui liait la production de la chaleur métabolique et le transfert de chaleur entre le corps et l'environnement, était basé sur le ratio entre l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique et l'évaporation maximale pouvant être obtenue dans l'environnement. Tout en étant un indice significatif, le modèle HSI s'est avéré limité dans des situations où la contrainte thermique était sérieusement sous-estimée ou surévaluée, par exemple : i) dans le cas des vêtements légers où l'évaporation requise au maintien de l'équilibre thermique est équivalente à l'évaporation maximale obtenue dans l'environnement ou ii) dans le cas de vêtements de protection qui créent un microclimat complètement différent de l'environnement. De plus, l'indice HSI était basé sur de nombreux composants et les calculs impliquaient plus de 15 variables (c.-à-d. la température ambiante, la pression barométrique, la vitesse du vent, la pression de vapeur d'eau ambiante, la température de la peau, la pression de vapeur d'eau de la peau, le coefficient d'isolation des vêtements, la surface corporelle, le taux métabolique, etc.), ce qui le rendait peu pratique à utiliser et pouvait également être une source d'erreurs (Moran, Shitzer et Pandolf, 1998). Des années plus tard, des chercheurs ont mis au point l'indice cumulatif de contrainte thermique (CHSI), basé sur la température rectale (T_{rec}) et sur la fréquence cardiaque (FC) (Frank, Moran, Epstein et Shapiro, 1996), qui présentait un bon potentiel pour le suivi en temps réel du stress thermique. En effet, l'indice CHSI s'est révélé être un modèle valide pour estimer la tolérance à la chaleur, cependant son utilisation demeurerait limitée. En pratique, l'indice CHSI pouvait continuer à augmenter pendant une période d'équilibre ou de récupération, alors que la T_{rec} et la FC diminuaient.

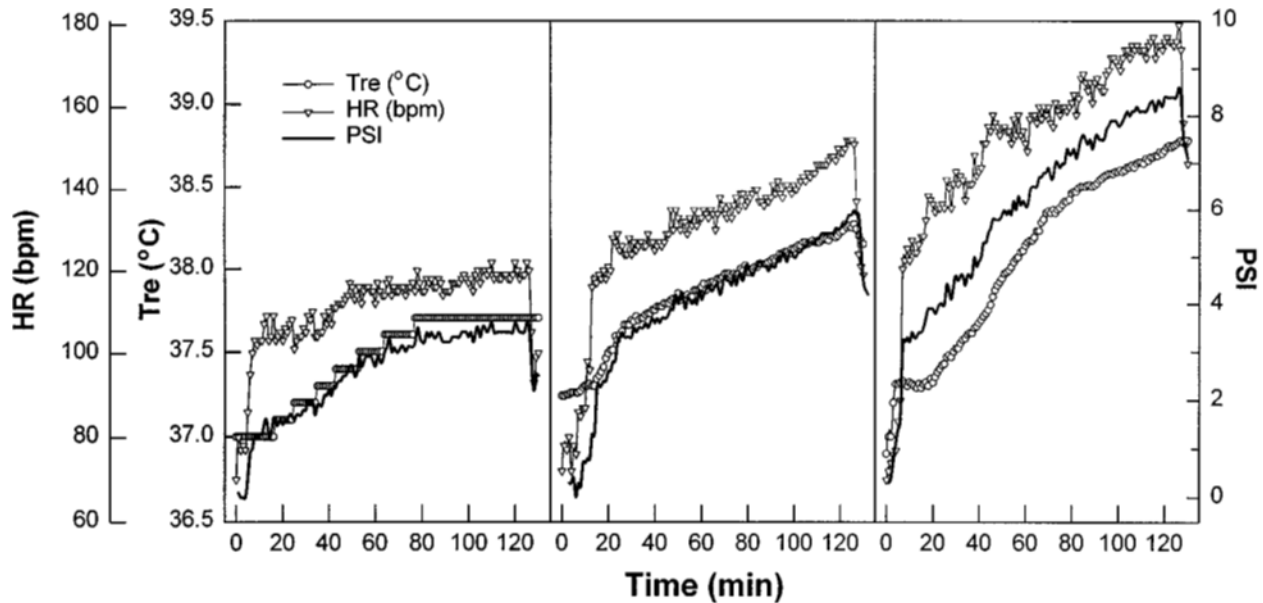
Également, cet indice était basé sur le battement du cœur plutôt que sur la fréquence cardiaque, tandis que la variation de la FC à différents intervalles de temps pouvait affecter la précision des estimations (Moran *et al.*, 1998).

Finalement, l'indice de contrainte physiologique (PSI), basé sur la T_{rec} et sur la FC, fut développé afin de permettre d'indiquer une situation de stress thermique chez l'individu en temps réel (Moran *et al.*, 1998). Cet indice évalue la contrainte physiologique sur une échelle universelle de 0 à 10 et suppose qu'en passant de la normothermie à l'hyperthermie lors d'une situation de stress thermique, l'augmentation maximale de la T_{rec} et de la FC est respectivement de 3 °C (36,5-39,5 °C) et de 120 battements/min (60-180 battements/min). $T_{rec\ t}$ et FC_t étant des mesures prises simultanément à tout moment durant l'exposition (temps t) et $T_{rec\ 0}$ et FC_0 étant des mesures initiales, l'indice de contrainte physiologique se calcule comme suit :

$$PSI = 5 (T_{rec\ t} - T_{rec\ 0}) \cdot (39,5 - T_{rec\ 0})^{-1} + 5 (FC_t - FC_0) \cdot (180 - FC_0)^{-1} \quad (1)$$

Étant un indice assez simple à utiliser et basé sur des calculs en temps réel à différents intervalles de temps, contrairement à l'indice HSI et à d'autres modèles, le PSI est calculé alors que le sujet est exposé à une contrainte thermique sans avoir à attendre la fin de l'exposition. Il peut être appliqué à tout moment, y compris lors des périodes de repos ou de récupération, dès que la T_{rec} et la FC sont mesurées. De plus, le principe de PSI étant l'évaluation de la contrainte physiologique résultant des systèmes cardiovasculaire et thermorégulateur humains, il permet d'évaluer et de comparer le niveau de contrainte entre différentes conditions d'environnement et de vêtements (Moran *et al.*, 1998). Afin de valider le modèle, des chercheurs ont utilisé une sonde à thermistance rectale et une sangle pectorale connectée et équipée d'électrodes ECG (électrocardiographie) pour collecter des données sur 100 sujets (Moran *et al.*, 1998) (figure 2).

Figure 2. Indice de contrainte physiologique (PSI) (ligne continue), calculé à partir de T_{rec} (cercle ouvert) et FC (triangle ouvert) de 3 sujets exposés au même niveau de contrainte thermique [40 °C, 40 % de RH%, et une course de 1,34 m/s sur le tapis roulant ayant une pente de 2 %] (Moran *et al.*, 1998).



Afin de fournir un outil plus valable pour évaluer la contrainte perceptuelle que la perception subjective de l'effort par les individus, l'indice de contrainte perceptuelle (PeSI) a été mis au point (Tikuisis, Mclellan et Selkirk, 2002). Le PeSI combine les perceptions de l'effort physique, les perceptions de la sensation thermique et les corrélats perceptuels de la FC et de la T_{rec} . Il utilise aussi le barème de sensation thermique TS (Young, Sawka, Epstein, Decristofano et Pandolf, 1987) et l'échelle de l'effort perçu RPE (Borg, 1970). TS_t et RPE_t étant des mesures effectuées à tout moment de l'effort, l'indice de contrainte perceptuelle s'écrit comme suit :

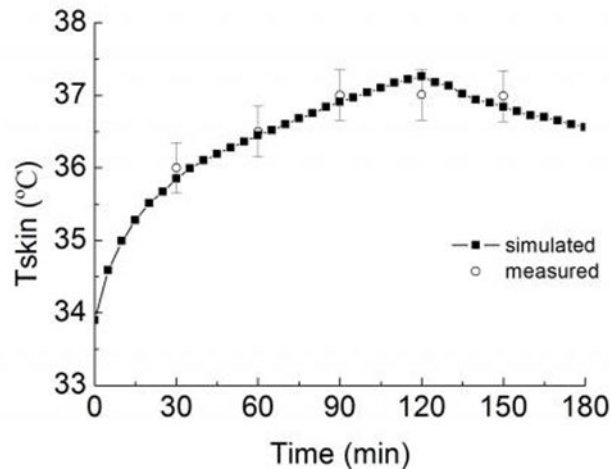
$$PeSI = 5 (TS_t - 0) \cdot (8)^{-1} + 5 (RPE_t) \cdot (20)^{-1} \quad (2)$$

Afin d'établir une corrélation entre le PSI et le PeSI, les données collectées chez les pompiers dans le cadre des études de laboratoire et de terrain ont été utilisées (Petruzzello *et al.*, 2009). En calculant les indices pour les données réunies, il s'est avéré que l'indice PSI permet de différencier divers niveaux de contrainte physiologique et de refléter aussi la contrainte physiologique progressive pendant les activités de lutte contre l'incendie de courte durée. L'indice PeSI pouvait lui aussi fournir une évaluation de la contrainte thermique lors d'activités de courte durée, mais il n'a pas pu être déterminé si le PeSI pouvait être en mesure de prédire avec précision l'évolution de l'indice PSI au cours de l'activité, notamment dans des conditions variées.

Dans le cadre des travaux théoriques visant à détecter le stress thermique, l'utilisation de mesures non invasives pour évaluer la température interne du corps (T_c) dans des situations menant à un stress thermique fut aussi explorée (Davey, Richmond, Griggs, Gerrett et Havenith, 2013). Des paramètres tels que la température de la peau (T_s), la T_s isolée du bas du cou, la température du microclimat à l'intérieur des vêtements, l'humidité relative (RH%), la FC, la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) et la fréquence respiratoire ont été pris en compte afin de mettre au point un modèle universel de prédiction de T_{rec} (utilisé comme une référence pour refléter la T_c). Cependant, un tel modèle universel s'est montré limité, car une proportion élevée d'erreurs négatives fut produite lorsque la T_{rec} augmentait et une partie importante des T_{rec} supérieur à 38,5 °C était sous-estimée (Davey *et al.*, 2013). Par ailleurs, l'estimation de la T_{rec} à partir de la FC a permis d'évaluer l'état de stress thermique chez les pompiers pendant les pauses au travail pour ainsi déterminer s'il était nécessaire d'arrêter les opérations ou pas. Cependant, une telle approche basée sur la FC demeure encore à valider dans divers environnements thermiques et pour des intensités de travail variées chez les pompiers. (Kim, Siyeon et Lee, 2015).

Une version modifiée de l'indice de réserve cardiovasculaire (CVRI), basée sur la pression artérielle moyenne, la FC, la pression veineuse centrale et celle à la surface corporelle, fut considérée afin de prédire la tolérance à la chaleur des individus. L'analyse des données collectées sur les individus a pu montrer que l'indice CVRI pouvait être utilisé afin de déterminer la tolérance à la chaleur à un stade précoce de l'activité, car l'indice s'avérait être beaucoup plus faible pour les personnes intolérantes à la chaleur par rapport aux personnes tolérantes soumises à une contrainte thermique à l'effort (Epstein *et al.*, 2015). Toutefois, la mesure des paramètres pour le calcul de l'indice CVRI est loin d'être pratique à réaliser au cours du travail. Une version modifiée de l'indice PSI, qui prenait en compte la température du pied, a aussi été développée afin de proposer un indice de contrainte thermique en temps réel pour les travailleurs portant un équipement de protection individuel, incluant des bottes, dans des environnements chauds (Lee, J.-Y., Kim, Park et Tochiara, 2015). Cette version modifiée de PSI s'est avérée valable pour des environnements chauds, mais sa validité n'a pas pu être vérifiée pour les travailleurs portant des vêtements de travail légers dans des environnements thermiquement neutres ou froids (Lee, J.-Y. *et al.*, 2015). Par ailleurs, les indices PSI et PeSI ont été appliqués afin d'évaluer l'utilisation d'un vêtement refroidissant à base de matériaux à changement de phase (PCM) pour des travaux industriels dans la chaleur (Butts, Smith, Ganio et McDermott, 2017). Finalement, une version optimisée du modèle de confort thermophysique de Berkeley (BTCM), principalement basée sur la mesure de la T_s , a été utilisée afin d'évaluer le stress thermique des mineurs dans des mines de charbon souterraines chaudes (Wu, Jiansong, Fu, Ming, Tong, Xing et Qin, Yueping 2017). Bien que le modèle BTCM fût validé dans un environnement opérationnel afin de détecter le stress thermique, la mesure de température cutanée sur différents endroits du corps du travailleur par une autre personne est loin d'être pratique (Wu, Jiansong *et al.*, 2017) (figure 3).

Figure 3. Comparaison des données mesurées sur le terrain (○) et des valeurs prédites par la version optimisée du modèle BTCM amélioré (■) (Wu, Jiansong, Fu, Ming, Tong, Xing et Qin, Yueping, 2017).



En parallèle des études sur les indices de contraintes thermiques, des travaux récents ont analysé l'évolution des paramètres physiologiques durant les situations pouvant mener à un stress thermique en utilisant divers types de capteurs effectuant des mesures en temps réel. Ainsi, la surveillance en temps réel de l'activité cardiaque lors d'une situation de stress thermique a permis de démontrer que les personnes exprimant une syncope à médiation neurale induite par un stress thermique sont physiologiquement plus éprouvées que des personnes sans symptômes (Carrillo, Cheung et Flouris, 2011). Par ailleurs, des paramètres comme la T_{rec} , la T_s , la FC et le taux de sudation ont été pris en compte pour évaluer les charges thermiques interne et externe des vêtements de protection de pompiers lors de tests en laboratoire et sur le terrain (Annaheim *et al.*, 2015). L'indice PSI et la contribution de ses composantes à la contrainte physiologique globale ont aussi été étudiés chez des athlètes en utilisant une sangle pectorale dotée de capteurs ECG connectés (Pokora et Żebrowska, 2016). Enfin, la mesure en temps réel des paramètres tels que la consommation d'oxygène, la FC et la T_{rec} a été utilisée afin d'étudier le taux métabolique et la réactivité cardiaque thermique (Bröde et Kampmann, 2017).

Avec l'émergence des technologies portables durant ces dernières années, plusieurs études ont utilisé des capteurs physiologiques portables afin d'étudier l'impact de l'exposition des individus aux contraintes thermiques. Des exemples de ce type de travaux sont : l'utilisation d'une sangle pectorale équipée d'électrodes ECG disponible dans le commerce afin d'étudier les stratégies de refroidissement pour réduire les contraintes physiologiques associées à l'activité de lutte contre l'incendie (Barr, Gregson, Sutton et Reilly, 2009), l'emploi d'une sangle similaire associée à une thermistance flexible rectale et des thermistances de surfaces mesurant respectivement la T_{rec} et la T_s pour étudier le stress thermique dans les vêtements de protection contre les risques chimiques à deux couches avec un respirateur facial à pression négative permettant une analyse basée sur

l'équilibre thermique (Fletcher, Guerrina, Ashley et Bernard, 2014), l'application du même type de sangle jumelée à une mesure de pression artérielle effectuée dans une séance post-exercice pour étudier l'état des pompiers volontaires portant un équipement de protection individuelle par rapport aux données collectées avec des vêtements réguliers (Feairheller, 2015), l'utilisation d'une ceinture pectorale commerciale équipée d'électrodes ECG de type textile conducteur et associée à une technologie de localisation intégrée dans le pantalon pour la surveillance physiologique et pour la localisation des pompiers dans la lutte contre l'incendie (Carey 2012), la comparaison de l'efficacité d'une sangle pectorale équipée d'électrodes ECG sèches, avec un système Holter d'électrodes humides à 5 dérivations, dans l'optique de la surveillance de l'état physiologique des travailleurs dans des environnements difficiles (Kelly, Wright, Breynton et Kenny, 2011) et, enfin, l'évaluation comparative des capacités d'un vêtement équipé de capteurs biométriques intégrés et d'une sangle pectorale dotée d'électrodes ECG pour surveiller la FC dans deux conditions climatiques différentes sous des activités physiques variables (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2017).

D'autres études similaires ont proposé des prototypes de vêtements équipés de capteurs physiologiques pour la surveillance de l'état des travailleurs exposés aux contraintes thermiques. Ainsi, des travaux ont été menés pour élaborer une veste intelligente comprenant des électrodes ECG et un capteur de respiration par inductance associés à un oxymètre de pouls sous forme d'un capteur adhésif jetable pour le bout des doigts (Coca, A. *et al.*, 2010), un chandail intelligent équipé de capteurs de fréquence cardiaque et de taux de respiration pour la mise en place d'une combinaison de protection intelligente de pompier (Hertleer *et al.*, 2013), un chandail intelligent doté de capteur ECG afin d'étudier le comportement cardiovasculaire détaillé des pompiers dans diverses situations stressantes (Paiva, Rodrigues et Cunha, 2016), un gant intelligent utilisant un capteur photopléthysmographique (PPG) de FC facilitant la surveillance de l'activité et des signes vitaux des pompiers (O'Flynn *et al.*, 2018), une veste dotée d'un capteur ECG associé à un enregistreur de bio-impédance électrique thoracique pour l'évaluation automatique des risques de la charge de travail (Yang, L. *et al.*, 2018) et, finalement, un système conceptuel de surveillance portable des paramètres physiologiques (T_c et FC) et d'indicateurs du microclimat dans des vêtements (température et RH%) incluant une analyse des exigences des méthodes de mesure dans un tel concept (Hong, Y. *et al.*, 2019).

Malgré l'ensemble des études relatives au repérage du stress thermique en temps réel, la présente revue de la littérature n'a relevé que très peu de travaux sur la prévention du stress thermique en temps réel ou néanmoins sur la signalisation de son occurrence à l'aide des technologies portables. Dans le cadre d'une de ces études, un réseau de capteur intégré à un vêtement de protection de pompier basé sur plusieurs nœuds de traitement-transmission de données et de commande d'actuateur a été employé. En se basant sur la mesure de paramètres tels que la T_s , la FC, l'intensité de l'activité de l'individu et le niveau de CO_2 présent dans l'environnement, ainsi que le calcul de l'indice PSI et l'estimation de la T_c à partir de la FC, un algorithme de type réseaux bayésiens et

arbres de décision entraînés par des données empiriques a été mis en place afin de fournir un avertissement lorsqu'un stress thermique semblait imminent chez un individu (Gaura, Kemp et Brusey, 2013). Tout en tenant compte des facteurs comme le type d'activité, la température ambiante et d'éventuelles séquences de refroidissement au cours de l'opération, l'envoi d'avertissement par l'algorithme était basé sur la probabilité que la T_s , utilisée comme indicateur pour la T_c , dépasse un seuil dangereux désigné au cours d'une période de prédiction donnée. En parallèle du système d'avertissement, des ventilateurs intégrés pouvaient être actionnés automatiquement avec des niveaux élevés de CO_2 ou de chaleur (Gaura *et al.*, 2013). Malgré l'originalité du concept proposé, la corrélation de T_c avec T_s montrait un décalage d'environ 0,25 à 0,75 °C dans les gammes de température corporelle supérieures à 36 °C. L'autre inconvénient du système était l'emploi des fils électriques afin d'assurer la connexion des capteurs intégrés aux nœuds du système sans fil, ce qui peut nuire à la souplesse et à la durabilité d'un tel système dans un contexte opérationnel.

Dans une autre étude, un chandail intelligent doté de capteurs de température, d'humidité et de FC a été développé afin de prédire une situation de stress thermique chez les pompiers (Florea, Dobrescu, Popescu et Dobrescu, 2013). En considérant l'indice de la chaleur (HI), calculé à partir de l'humidité et de la température mesurées pour le microclimat entre le chandail et la peau, et la FC mesurée par des électrodes textiles ECG intégrées dans le chandail, un algorithme de prédiction de stress thermique basé sur un modèle de réseau bayésien dynamique intégrant aussi l'activité du sujet et un éventuel refroidissement a été mise en place. Le risque de l'occurrence du stress thermique fût basé sur un seuil de l'indice HI et sur une valeur de la FC à ne pas dépasser pour ainsi définir 4 niveaux d'avertissement par le système : précaution, précaution extrême, danger et danger extrême. En cas de dépassement de chacun des seuils, le système permettait d'avertir l'utilisateur par un signe sonore ou vibratoire (Florea *et al.*, 2013). Une approche très similaire de celle de la méthodologie de (Florea *et al.*, 2013) fût déployée pour développer un chandail intelligent prédisant le stress thermique (Sandulescu et Dobrescu, 2015). Le calcul de l'indice HI pour le microclimat entre la peau et le chandail et la mesure de la FC par des électrodes ECG intégrées au chandail ont permis d'alimenter un algorithme d'apprentissage automatique (*Support Vector Machines* en tant qu'algorithme de classification binaire, mais également utilisé pour la régression des données). Lorsque la contrainte thermique dépassait un certain niveau, une alarme visuelle s'affichait sur l'unité de traitement de données à distance.

Finalement, l'étude réalisée par (Baratchi *et al.*, 2016) a proposé un modèle permettant d'analyser en temps réel des paramètres physiologiques facilitant la prédiction du risque de stress thermique en se basant sur une approche d'apprentissage automatique. À l'aide d'un ensemble de données multiparamétriques, collectées lors d'une session d'entraînement des pompiers, le degré d'importance de différents types de capteurs à déployer dans la conception d'un chandail intelligent, leur emplacement et leur efficacité dans l'estimation de la T_c de l'individu ont été étudiés. De plus, cette étude a proposé de traiter la T_c comme une variable catégorielle à 2 classes, au-dessus et en-dessous d'un

seuil donné au lieu de la considérer comme une variable numérique, pour ainsi transformer l'approche de la régression précédemment utilisée dans la littérature en un problème de classification de données collectées. Ainsi, pour concevoir un nouveau modèle, la T_c a été discrétisée à sa plage d'unités entières. Un réseau bayésien fut ensuite construit sur les données discrétisées. Bien que l'estimation très précise de la T_c soit encore un défi technologique, cette étude montre qu'il est néanmoins possible de classer la T_c dans des zones qualifiées de « dangereuse » ou « sécuritaire » avec une grande précision (Baratchi *et al.*, 2016).

Il est à noter que le degré de maturité technologique des systèmes dans les études sur la détection de stress thermique se situe globalement au niveau 3 (critique analytique ou validation de concept) ou au niveau 4 (validation de concept ou de modèle en laboratoire). Toutefois, quelques études concernant les mesures physiologiques sous contrainte thermique atteignent un niveau TRL de 6 (essais dans un milieu très représentatif en laboratoire ou en milieu opérationnel simulé) alors qu'une des études concernant des modèles thermophysiques s'élève à un niveau TRL de 7 (démonstration dans un environnement opérationnel).

4.1.2 Détection du stress thermique en temps réel : produits commerciaux

Les dispositifs permettant de mesurer les différentes températures (T_s , T_{rec} , température du microclimat entre le vêtement et le corps) ou de déduire la T_c étant explorés dans la section sur les capteurs de température, l'étude des produits commerciaux pour la détection de stress thermique s'est concentrée sur les dispositifs prétendant avoir la capacité soit de détecter directement le stress thermique, soit de mesurer des paramètres physiologiques pouvant alimenter le calcul d'indices du niveau de contrainte thermique avec des modèles mathématiques connexes. Des tableaux détaillant des informations telles que le secteur d'application, les paramètres mesurés, la précision de détection, le temps de réaction ou d'activation, la consommation énergétique, le poids et le volume, le genre, la conformation physique, la technologie déployée, la méthode d'intégration, le moyen de transmission de données, la méthode d'indication ou d'avertissement, le prix unitaire et le pays de production d'origine ont été établis pour chacun des produits retenus. Ces tableaux sont disponibles pour les experts et les chercheurs du domaine de la santé et de la sécurité du travail à l'IRSST sous forme de documents additionnels au présent rapport. Toutefois, les résultats concernant les produits commerciaux, permettant une analyse globale de ces solutions, sont présentés sous une forme simplifiée dans les tableaux de l'annexe A, où sont énumérés le secteur d'application, les paramètres mesurés, le principe technologique et la méthode d'intégration pour chacun des produits sélectionnés. Les produits recensés ont été classés dans deux tableaux selon le type de dispositifs portables intelligents : accessoires portables ou textiles intelligents (tableau 6) et patches intelligents (tableau 7). Cette répartition des résultats a été inspirée du classement de différentes technologies portables par la commission 124 d'IEC (*International Electro Technical Commission*), qui hiérarchise ces dispositifs en 4 sous-groupes : accessoires portables (c.-à-d. montres, ceintures, bracelets, etc.), vêtements

intelligents, patchs connectés et appareils implantables (Fernández-Caramés et Fraga-Lamas, 2018).

Parmi les contraintes thermiques, l'activité cardiovasculaire est le paramètre le plus commun à pouvoir être mesuré par les technologies portables. La FC étant la fréquence des cycles cardiaques, elle exprime la séquence qui permet de faire circuler le sang désoxygéné à travers les poumons et de pomper le sang nouvellement oxygéné vers le corps à travers l'aorte. Comme la FC subit des changements en fonction des besoins du corps (Khan, Ostfeld, Lochner, Pierre et Arias, 2016), elle fut appliquée dans le calcul d'indices et de modèles pour évaluer l'impact du stress thermique sur l'état physique et mental d'une personne (Davey *et al.*, 2013). De nos jours, la détection de la FC en temps réel est devenue une mesure de routine dans les entraînements physiques ou dans les activités sportives en permettant d'évaluer la réaction du cœur lors des phases d'exercice et de récupération. De la même manière, divers produits ont été proposés pour permettre de suivre l'activité cardiaque d'individus afin de s'assurer de leur état de santé et de leur bien-être (Dias et Cunha, 2018).

Pour obtenir ce paramètre physiologique, deux méthodes principales sont déployées. La première approche est la pléthysmographie qui permet de mesurer la FC en utilisant des capteurs optiques ou de pression qui détectent le signal d'impulsion issu de chaque battement de cœur (Khan *et al.*, 2016). Dans la méthode de pléthysmographie par voie optique, appelée méthode photopléthysmographique (PPG), les artères sont éclairées par une diode électroluminescente (DEL). Une photodiode permet d'obtenir des signaux qui proviennent du changement des intensités lumineuses transmises ou réfléchies à travers la peau et les tissus en fonction du volume sanguin. Pendant la phase de la contraction du muscle cardiaque, l'absorption de la lumière est maximale en raison d'un volume élevé de sang. Ainsi, l'intervalle entre deux pics d'absorption maximale pourra être utilisé pour calculer la FC. Le même principe est utilisé dans le fonctionnement des capteurs de pression pour détecter les pics correspondant au volume élevé du sang à l'aide de capteurs placés sur l'artère radiale ou sur l'artère carotide (Khan *et al.*, 2016). De ce fait, les capteurs de pression ou optiques de pléthysmographie sont placés au poignet ou sur le bras (Dias et Cunha, 2018). La technique de détection par pression n'étant pas très pratique à appliquer à des technologies portables, la technique PPG a été largement utilisée dans la conception des montres ou des bracelets permettant la détection de l'activité du cœur.

Malgré la démocratisation de la méthode PPG dans des montres ou dans des bracelets intelligents, cette technique présente certaines limites, qui peuvent constituer des sources d'erreur, comme l'interférence de la mesure avec des bruits optiques, des bruits de mouvement du corps, la teinte de la peau et l'emplacement exact du capteur sur le corps (Khan *et al.*, 2016). Certains travaux rapportent même que l'administration de

médicaments ou de fluides, la vasomotion⁵, et les changements subits de la FC peuvent constituer des sources d'artefact dans la lecture des signaux PPG (Addison *et al.*, 2015). Un des autres inconvénients de la technique PPG est l'altération de signaux en raison de la diminution du volume sanguin en cas de pouls irrégulier ou d'hypovolémie, qui désigne un déficit de sang, plus précisément du plasma sanguin (Dias et Cunha, 2018).

L'hypovolémie pouvant notamment survenir lors d'évènements tels que l'hémorragie, l'hypertension, la déshydratation ou la brûlure est un autre élément qui rend l'utilisation des systèmes basés sur la pléthysmographie moins fiable pour le suivi en temps réel de l'activité cardiaque lors de l'exposition à une contrainte thermique.

L'autre approche de la détection de la FC est l'électrocardiographie (ECG) qui emploie des électrodes cutanées pour capter le signal de dépolarisation des muscles cardiaques. Il s'agit de la méthode la plus utilisée comme outil de diagnostic dans le secteur de la santé afin d'obtenir des informations sur le cycle cardiaque (Dias et Cunha, 2018). Dans cette approche, les électrodes ECG sont placées sur la poitrine dans une zone plus proche du cœur (Dias et Cunha, 2018). La forme d'onde d'ECG caractérisée par cinq pics et vallées (nommés P, Q, R, S, T et représentant chacun un changement du potentiel électrique du cœur entraînant une activité musculaire cardiaque) permet d'extraire et d'analyser des paramètres morphologiques pour effectuer le diagnostic des maladies cardiovasculaires ou pour le suivi en réadaptation. De ce fait, l'ECG est reconnu comme étant la méthode médicale standard pour acquérir la forme d'onde de l'activité cardiaque (Acar *et al.*, 2019 ; Dias et Cunha, 2018). En effet, des ondes manquantes ou une anomalie des intervalles entre les pics de la forme d'onde d'ECG peuvent indiquer un accident vasculaire cérébral ou un arrêt cardiaque soudain (Acar *et al.*, 2019). Par conséquent, l'accès à de telles informations peut être très avantageux dans la prévention des conséquences de l'exposition à une situation de stress thermique. Il est à noter que la quasi-totalité (à une exception près) des articles scientifiques analysés avait utilisé des systèmes ECG afin d'étudier le stress thermique en temps réel. La totalité des études ayant analysé l'impact physiologique des vêtements refroidissants s'était aussi appuyée sur la méthode ECG. Dès lors, la recherche des produits commerciaux contribuant à la détection du stress thermique en temps réel s'est orientée vers les dispositifs basés sur des capteurs ECG.

Ainsi, la recherche sur les produits commerciaux a pu mettre en évidence la présence de trois catégories principales de dispositifs dont des exemples sont illustrés à la figure 4 : (i) les sangles pectorales, (ii) les vêtements ayant des électrodes intégrées qui sont plutôt destinés au sport et au suivi de l'état de santé, et (iii) les patches électroniques connectés, majoritairement dédiés au domaine médical (tableau 6 et tableau 7, annexe A). Parmi les 26 produits retenus dans l'analyse des dispositifs sous forme d'accessoires portables ou textiles intelligents, seulement cinq produits proposent des applications en santé et en

⁵ Vasomotion : l'oscillation spontanée du tonus des parois des vaisseaux sanguins, indépendamment du rythme cardiaque.

sécurité du travail. Par ailleurs, un seul produit est destiné à une telle application sur les dix produits sélectionnés en tant que patches intelligents. Ce produit (le patch électronique Kenzen, figure 4 d) étant destiné aux domaines du sport, de la santé et du travail (tableau 7), est par ailleurs le seul produit recensé par cette étude qui est spécifiquement dédié à la détection du stress thermique. Mise à part la FC, une grande partie des produits considérés permettent d'évaluer la VFC qui est aussi un indicateur important du statut psychophysiologique d'une personne, notamment lorsqu'elle se retrouve dans un état de stress (Dias et Cunha, 2018). Certains de ces produits permettent aussi de fournir la forme d'onde d'ECG en temps réel.

Figure 4. Exemples de dispositifs portables, disponibles dans le commerce, pour surveiller les signaux biométriques utiles pour l'évaluation des contraintes thermophysiques pendant le travail actif : (a) ceinture pectorale EQ02 LifeMonitor (par Equivital™, New York, NY, É.-U.), (b) ceinture pectorale H10 (par Polar, Kempele, Finlande), (c) chandail biométrique (par Hexoskin, Montréal, QC, Canada), (d) patch électronique Kenzen™ (par Kenzen, New York, NY, É.-U.), (e) patch électronique Cardiomo™ (par Cardiomo, New York, NY, É.-U.), (f) patch électronique VitalPatch® (par Vitalconnect, San Jose, CA, É.-U.), (g) dispositif intra-auriculaire One™ (par Cosinuss° One™, Munich, BY, Allemagne).



En fonction des capteurs additionnels déployés par certains produits, les dispositifs permettent aussi de détecter d'autres paramètres tels que la fréquence respiratoire, le taux de saturation sanguin en oxygène (SpO_2), la réponse cutanée galvanique, la T_s , l'intensité de l'activité, le positionnement, la position corporelle, la survenue d'une chute. Dans de rares cas, la détection de la T_c à l'aide d'une pilule télémetrique avalable de mesure de température a été associée au dispositif principal. Quelques systèmes

proposent une valeur de T_c déduite à partir de la FC. En effet, certains des paramètres collectés pourraient contribuer à l'élaboration d'un système de détection du stress thermique en temps réel. Le dispositif Kenzen étant spécifiquement conçu pour la détection du stress thermique, il permet de mesurer la FC, le taux de sueur et l'intensité de l'activité et d'effectuer une estimation de la T_c à partir de la FC afin d'établir un seuil de stress thermique à ne pas dépasser.

Le principe de fonctionnement de ce type de dispositifs est souvent basé sur la connexion du capteur biométrique déployé à un circuit frontal analogique⁶, où le signal électrique analogique est filtré et amplifié. Un microcontrôleur ou un microprocesseur effectue par la suite la lecture du signal après avoir numérisé le signal analogique à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique. Ensuite, les données sont traitées à l'aide d'algorithmes exécutés sur le microcontrôleur ou sur le microprocesseur, puis envoyées à un ordinateur ou à un appareil portable, au moyen d'une communication sans fil, pour leur interprétation et leur visualisation (Khan *et al.*, 2016). Dans la conception des produits retenus, l'unité amovible de traitement et de transmission des données est connectée à la sangle pectorale ou au chandail biométrique par l'entremise de boutons ou d'attaches de contact électrique pour être ensuite liée à des capteurs ECG par des lignes conductrices (imprimées ou en textiles conducteurs) de transmission de signaux. Dans le cas des patchs intelligents, une unité amovible contenant des capteurs ECG est placée à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau de la personne. Parmi les patchs retenus, il y a seulement deux produits qui se présentent sous forme d'un patch jetable à usage unique avec des électrodes imprimées qui se connectent à un boîtier amovible et réutilisable du microprocesseur.

Bien que les mesures ECG soient classiquement effectuées en utilisant 12 dérivations, le signal peut être capté en utilisant deux électrodes placées sur la poitrine, ce qui permet la conception de capteurs sous une forme portable (Khan *et al.*, 2016). Pour les produits classés dans le tableau 6, les systèmes contiennent effectivement 2 électrodes ECG à quelques exceptions près, où 3 ou 4 dérivations ont été déployées. Les patchs intelligents présentés dans le tableau 7 utilisent, pour leur part, 1, 2 voire 3 dérivations. Il est à noter que dans le cadre des mesures médicales conventionnelles, les signaux biopotentiels sont mesurés par des électrodes jetables, dites humides, à base d'argent/chlorure d'argent. Ces électrodes sont composées d'une couche de gel conducteur pour réduire l'impédance de contact peau-électrode et d'un adhésif pour un contact optimal avec la peau (Acar *et al.*, 2019). Malgré une qualité de signal supérieure, ces électrodes ne conviennent pas au système de surveillance portable et aux mesures de longues durées (Majumder, Mondal et Deen, 2017), car leur performance se dégrade avec le temps, au

⁶ Circuit frontal analogique : un dispositif de conditionnement de signal analogique qui utilise des amplificateurs analogiques sensibles, des amplificateurs opérationnels, des filtres, et parfois des circuits intégrés spécifiques à l'application de capteurs.

fur et à mesure que la couche de gel sèche, ce qui entraîne en outre une dégradation de la qualité du signal détecté (Acar *et al.*, 2019). De plus, l'emploi excessif de gel conducteur et la composition des adhésifs peuvent provoquer une irritation, des réactions allergiques ou une inflammation chez certains individus (Majumder *et al.*, 2017) et la méthode nécessite une préparation de la peau telle que le rasage et le nettoyage du site de fixation des électrodes (Acar *et al.*, 2019). Afin de surmonter ces problèmes, des textiles conducteurs ou des électrodes sèches à base de matériaux conducteurs flexibles sont à l'étude dans la conception des dispositifs portables (Dias et Cunha, 2018). Par ailleurs, les vêtements biométriques et les sangles pectorales connectées (tableau 6) utilisent des électrodes ECG à base de silicone conducteur ou des électrodes textiles à base de fils conducteurs qui sont effectivement mieux adaptés aux dispositifs portables. Toutefois, comme ces électrodes ne sont pas adhésives, des artefacts dus aux mouvements du corps peuvent apparaître dans la lecture des signaux, ce qui rend très difficile et délicate la conception de ces dispositifs et plus spécifiquement celle des chandails biométriques (Dias et Cunha, 2018).

L'analyse des données collectées pour les produits du tableau 6 a également révélé qu'un design ajusté au corps, à base de fibres extensibles, a été développé pour la conception de vêtements biométriques, permettant ainsi diminuer l'impact des artefacts dus au mouvement. Des points en silicone ou des technologies d'aspiration ont également été utilisés sur la surface interne des sangles biométriques afin de les maintenir fermement en place. Bien que les fabricants de ces dispositifs ne fournissent pas d'informations détaillées sur la conception des électrodes en textiles conducteurs qu'ils utilisent, il est à noter que ces types d'électrodes peuvent être réalisés par des techniques connues de l'industrie du textile comme le tissage ou le tricotage, en utilisant des fils conducteurs. Les électrodes sont, par la suite, intégrées aux vêtements par une couture ou par thermoadhésion. Elles peuvent également être préparées par tissage ou par tricotage lors de la fabrication du vêtement (Majumder *et al.*, 2017) ou encore être ajoutées à la surface du tissu par une broderie de fils conducteurs ou par la déposition de compositions conductrices (à base de métaux, de polymères conducteurs ou d'allotropes de carbone), en utilisant la galvanoplastie, le dépôt physique en phase vapeur, la polymérisation chimique, le revêtement par immersion ou l'impression (Acar *et al.*, 2019). D'après les données collectées dans la présente étude, les sangles pectorales sont offertes sous une forme ajustable afin de couvrir une gamme plus large de tailles de poitrine (par exemple, une sangle s'ajustant de 64 à 132 cm), et les vêtements biométriques sont proposés sur au moins 4 tailles. Alors que les chandails adoptent une coupe unisexe, certains fabricants proposent des articles spécifiquement dédiés à la clientèle féminine comme des camisoles ou des brassières biométriques. Malgré toutes les avancées réalisées dans la conception des électrodes sèches et les stratégies déployées pour l'ajustement du design des sangles pectorales et des chandails biométriques, certains des produits recensés nécessitent d'humidifier la surface des électrodes pour optimiser leur contact avec la peau. L'ensemble des patchs intelligents requièrent aussi une préparation spécifique de la peau pour assurer un maximum d'adhésion du patch, de sorte que l'individu ne doit avoir utilisé aucune huile ou lotion. Il est aussi préconisé d'identifier la surface la plus plane

possible, pour ainsi minimiser l'influence des mouvements du corps. De plus, en fonction de la conception du système de mesure, chaque dispositif propose des emplacements spécifiques du patch : au milieu de la poitrine, sous les pectoraux, sur la cage thoracique près du cœur ou sur le haut du bras. La préparation quotidienne de la peau pour assurer l'adhérence du patch, et l'attention que le travailleur doit porter au positionnement exact du patch sur la peau peuvent rendre délicate l'application des patchs dans les milieux de travail.

D'un point de vue d'architecture de communication, ce type de dispositifs équipés de capteurs biométriques comprend généralement trois éléments : (i) une passerelle de communication permettant l'échange des données avec le dispositif portable et l'envoi des données aux services distants, (ii) un serveur cloud pour le stockage des données et pour offrir des services à distance aux utilisateurs, et (iii) une chaîne de blocs afin d'assurer différentes fonctionnalités telles que la fiabilité et la sécurité des données (Fernández-Caramés et Fraga-Lamas, 2018). Dans ce cadre, les signaux biométriques mesurés nécessitent une communication en deux étapes pour transmettre les données. Dans un premier temps, un protocole de communication à courte portée est utilisé pour transmettre les données mesurées à un nœud de passerelle le plus proche (c.-à-d. un téléphone intelligent, un ordinateur, ou même une carte de traitement basée sur un microcontrôleur). Dans un deuxième temps, les données peuvent être transmises par Internet ou par un réseau de communication cellulaire. Dans le cas de la communication à courte portée, les dispositifs capteurs peuvent communiquer directement à travers la passerelle par l'entremise d'un support sans fil (Majumder *et al.*, 2017). La quasi-totalité des produits retenus dans le tableau 6 et le tableau 7 utilise le Bluetooth comme technologie de communication radiofréquence, afin d'assurer l'échange de courte portée avec le premier nœud de la passerelle de communication, dans une distance de transmission allant de 1 à 10 mètres. Un certain nombre des produits recensés emploie une version de puissance ultra-faible de la technologie Bluetooth appelée *Bluetooth Low Energy* (BLE) ou Bluetooth V4. Il est à noter que le BLE utilise la même bande de fréquences que le Bluetooth classique, mais saute sur plus de 40 canaux, chaque canal ayant une bande passante de 2 MHz. La particularité du BLE demeure dans sa capacité à offrir une connectivité sans fil de faible puissance (~ 10 mW), ce qui rend le dispositif qui l'utilise capable d'effectuer des surveillances à plus long terme (Majumder *et al.*, 2017).

Mis à part le Bluetooth, certains des produits regroupés dans le tableau 6 et le tableau 7 utilisent aussi l'ANT, une technologie de réseau de capteurs sans fil multicast, conçue et commercialisée par ANT Wireless. Il s'agit d'un protocole propriétaire pour les communications sans fil à très faible énergie et à courte portée dans les réseaux de capteurs, en particulier pour les systèmes de surveillance de la santé et de la condition physique. La faible consommation d'énergie est en effet obtenue en utilisant un faible débit de données, des cycles de retard plus courts et la mise en veille du système de communication (Majumder *et al.*, 2017). Le protocole ANT+, majoritairement employé par les produits ayant la capacité de communiquer avec le protocole ANT, est une fonction d'interopérabilité ajoutée au protocole ANT de base, qui permet la mise en réseau des

appareils ANT+ à proximité pour faciliter la collecte ouverte et l'interprétation des données des capteurs (Majumder *et al.*, 2017). En raison de l'utilisation d'émetteurs-récepteurs de communication sans fil avec possibilité de modes de veille ou de transmissions périodiques, la consommation énergétique moyenne des produits étudiés dans cette section est estimée à 500 mW (Fernández-Caramés et Fraga-Lamas, 2018). Tandis que la très grande majorité des produits utilisent des batteries rechargeables avec des durées d'autonomie très variable, quelques-uns emploient des batteries jetables de type zinc-air.

Afin de faciliter la lecture immédiate des données, une très grande partie des produits proposent des applications mobiles spécifiques afin de fournir les résultats à travers une interface usager. Cependant, quelques sangles biométriques analysées offrent une plateforme compatible avec plusieurs applications génériques de *fitness* au lieu d'une application distincte. Alors que certains produits offrent une interface avec une vue de tableau de bord pour PC ou de logiciels spécifiques pour les analyses plus approfondies ou simultanées d'un groupe d'individu, quelques produits proposent une interface de programmation publique (Open API) pour une plus grande liberté de l'utilisateur dans l'exploitation des données collectées. Ce type de système pourrait ainsi permettre d'étendre les champs d'application du dispositif à de nouveaux domaines tels que la santé et la sécurité du travail. Le prix unitaire de ces types de dispositifs portables est disponible sur demande, cependant un grand nombre de fabricants semblent préconiser plutôt une approche de service interentreprises en limitant l'accès direct du grand public à leurs produits.

Parmi les accessoires portables, la présente étude a aussi repéré un dispositif intra-auriculaire portable (Cosinuss^o One™, figure 4 g) qui permet de mesurer des paramètres tels que la FC, la VFC, la T_c , la fréquence respiratoire, la SpO_2 et la variation de la pression artérielle à l'aide de capteurs intra-auriculaires de type pléthysmographie (par pression et par voie optique) et d'un thermomètre optique intégré (tableau 6). Il s'agit en effet d'une catégorie émergente d'accessoires portables qui est considérée comme une solution viable, en raison d'une surface de contact principalement constituée de cartilage éliminant des interférences musculaires et la présence des artères près de la surface (Dias et Cunha, 2018). Cependant, il a été rapporté que les mesures effectuées par ce type d'appareils intra-auriculaires portables peuvent être grandement affectées par les mouvements du corps, introduisant alors des erreurs de lecture (Majumder *et al.*, 2017).

4.2 Capteur de température

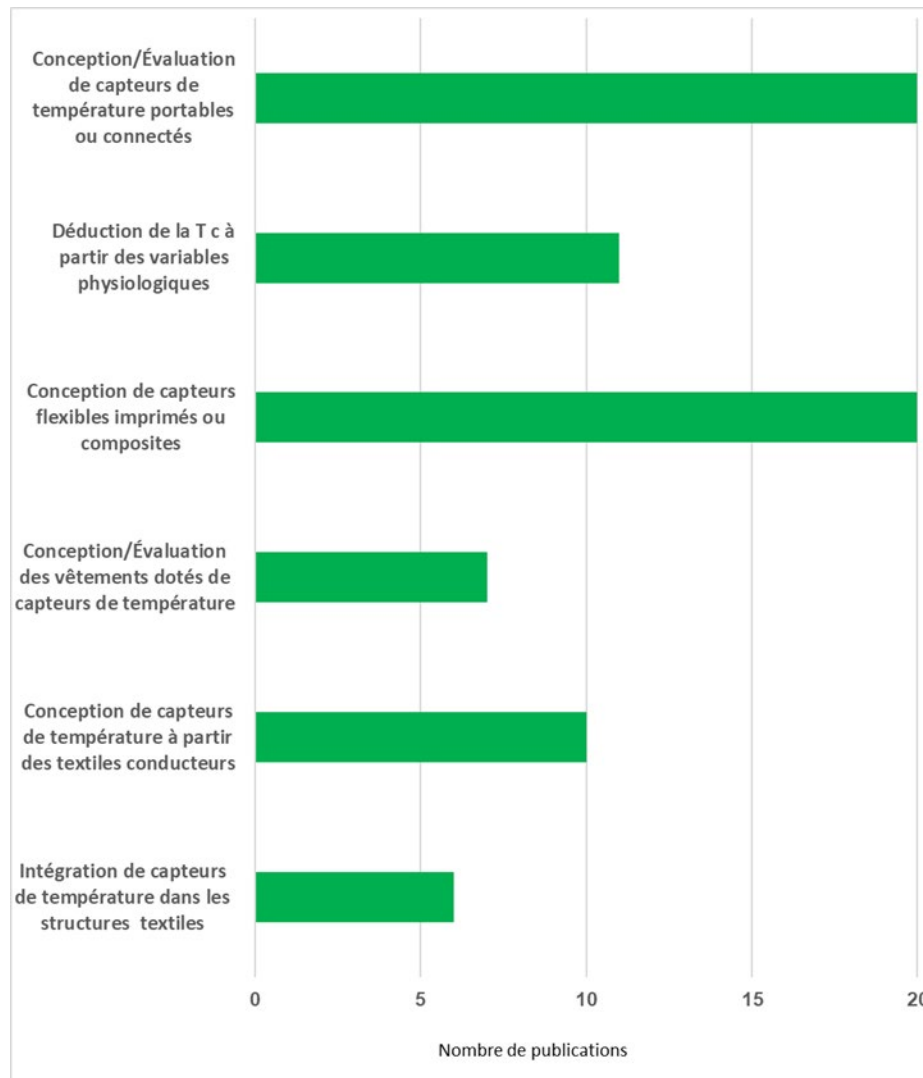
Bien que divers types de capteurs soient utilisés dans le domaine médical pour mesurer la température corporelle, la présente étude s'est particulièrement intéressée aux systèmes qui permettent de faire le suivi en temps réel de la T_s et la T_c d'une personne en activité. Par ailleurs, une attention particulière a été portée envers les capteurs intégrables dans les équipements de protection individuels afin de faciliter l'acquisition de la température du microclimat sous le vêtement ou la température extérieure avec l'objectif d'avertir le travailleur en cas d'exposition prolongée à des températures extrêmes.

4.2.1 Capteur de température : revue de la littérature

L'étude a retenu 74 publications dans l'analyse des travaux de recherche au sujet des capteurs de température applicables à la gestion thermique intelligente, en les répartissant selon 5 sous-catégories en fonction du principe technologique déployé (figure 5).

La surveillance en temps réel de la température corporelle est un facteur très important pour permettre de prévenir à temps le dysfonctionnement de nombreux organes pendant l'exposition à des contraintes thermiques élevées (Dias et Cunha, 2018). Le calcul de la température corporelle peut se baser sur deux mesures principales : la température centrale du corps (T_c) et la température de la peau (T_s). Tandis que la T_c est ajustée par les mécanismes de thermorégulation du corps, la T_s est affectée par la circulation sanguine et liée à la FC et au taux métabolique (Dias et Cunha, 2018). Que ce soit dans un cadre médical ou dans l'objectif de protéger les individus lors des expositions à des contraintes thermiques, la mesure précise de la T_s peut fournir des informations pertinentes sur la physiologie humaine, y compris la santé cardiovasculaire et l'état cognitif (Liu, Y. *et al.*, 2018). Tout en étant un très bon indicateur de l'état de la personne, la valeur de la T_s peut être de quelques degrés Celsius inférieurs à celle de la T_c , qui demeure dans une gamme étroite de 36 à 37,5 °C à l'état normal (Khan *et al.*, 2016). Cette différence de valeur entre la T_s et la T_c peut même atteindre 2,5 °C dans certaines situations (Majumder *et al.*, 2017), surtout que la valeur de la T_s peut varier en fonction des propriétés de la peau, l'emplacement de la mesure, la dimension et les caractéristiques du capteur et sa méthode de fixation sur la peau (Khan *et al.*, 2016). La mesure de la T_s montre également une forte dépendance aux fluctuations de la température environnementale, à la vitesse de l'air, à l'humidité et au microclimat autour de la peau (MacRae, Annaheim, Spengler et Rossi, 2018). Par conséquent, les capteurs utilisés pour mesurer la T_s et la T_c doivent couvrir une plage de température de 35 à 40 °C, tout en offrant idéalement une précision de mesure de 0,1 °C (Majumder *et al.*, 2017).

Figure 5. Répartition des articles analysés concernant les capteurs de température à utiliser dans la gestion thermique intelligente en fonction du principe technologique.



Afin de mesurer la température corporelle (T_s ou T_c), divers types de capteurs électriques analogiques ou numériques ont été déployés durant les dernières années (Dias et Cunha, 2018). D'une part, les capteurs analogiques sont généralement basés sur des thermistances, des détecteurs de température à résistance électrique (RTD) ou des thermocouples. Ces capteurs sont capables de fournir des mesures à la fois de hautes sensibilités et de hautes précisions ($\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cependant, leur mise en œuvre nécessite des circuits sophistiqués pour assurer la linéarisation, l'étalonnage et la numérisation. D'autre part, les capteurs numériques comprennent des thermomètres embarqués et des circuits intégrés qui les rendent plus faciles à mettre en œuvre, car ils ne requièrent aucun étalonnage, autoéchauffement ou correction de linéarité. De plus, ils fournissent des sensibilités similaires à celles des capteurs analogiques. Toutefois, leur précision est

faible (± 1 °C), mais elle est considérée comme étant suffisante pour certaines applications médicales (Oğuz et Ertaş, 2013). Dans ce cadre, des systèmes portables ont été développés afin de mesurer, en temps réel, les deux types de température corporelle, T_s et T_c .

Malgré les défis liés à la mesure de T_s , ce paramètre étant utilisé par différents experts dans le calcul des indices de stress thermique (Annaheim *et al.*, 2015 ; Fletcher *et al.*, 2014 ; Wu, Jiansong *et al.*, 2017), la présente étude s'est tout de même intéressée aux méthodes et aux outils permettant de détecter la T_s . En effet, diverses méthodes ont été déployées par des chercheurs pour l'élaboration de dispositifs portables de détection de la T_s , notamment a) en intégrant une thermistance commerciale de type coefficient de température négatif (NTC) dans un bracelet associé à un mode de communication radiofréquence pour la transmission de données (Boano, Lasagni, Romer et Lange, 2011), b) en insérant un réseau 4x4 bidimensionnel de capteurs de précision de type Silicon Kelvin, ayant des composants d'un thermomètre commercial associés à une chaîne de traitement du signal et un réseau de communication mobile GSM, dans une bande à fixer au bras (Giansanti, Maccioni et Bernhardt, 2009), c) en utilisant un capteur de température à broche de type LM35 à placer au niveau de la main, relié à un microcontrôleur et à un protocole de communication radiofréquence sans fil Zibgbee (Mansor, Shukor, Meskam, Rusli et Zamery, 2013) et, finalement, d) en mettant au point un nœud de capteur composé d'un émetteur-récepteur radio (à 2,4 GHz avec une portée de 30 mètres), utilisant une antenne planaire inversée de type F, un microcontrôleur et deux capteurs de température numériques à placer sous le bras du sujet (Javadpour, Memarzadeh et Saghafi, 2015). Par ailleurs, un thermocouple commercial placé au niveau des aisselles à l'aide d'une ceinture élastique associée à un protocole de communication radiofréquence sans fil Zibgbee a été utilisé pour mesurer la T_s des pompiers en temps réel (Hertleer *et al.*, 2013).

D'autres travaux ont opté pour des étiquettes d'identification par radiofréquence (RFID) à placer sur la peau pour mesurer la T_s . Ces études ont, par exemple, opté pour l'élaboration d'une étiquette rigide de RFID passive à ultra haute fréquence (UHF), basée sur la dépendance à la température de la fréquence de l'oscillateur en anneau et permettant d'envoyer les données à un appareil lecteur à 868 MHz avec une portée de 2 mètres (Vaz *et al.*, 2010). Un travail similaire a mis au point une étiquette RFID flexible comprenant une micropuce commerciale procurant directement une lecture thermique et une antenne conçue avec de l'adhésif en cuivre transféré sur une membrane en poly caprolactone à fixer avec une colle cosmétique hypoallergénique sur le bras ou sur l'abdomen de l'individu. L'étiquette permettait d'envoyer les données relevées dans une bande de 780-950 MHz et une plage de 30 à 80 cm à un appareil lecteur placé à proximité (Milici, Amendola, Bianco et Marrocco, 2014). Selon les analyses de cette étude, l'étiquette placée sur la peau nécessite que l'étiquette elle-même ne modifie pas la T_s mesurée localement et doit permettre de préserver la transpiration naturelle de la peau (Milici *et al.*, 2014). Dans un autre travail, un patch modulaire avec 2 composants détachables, dont une partie intérieure réutilisable hébergeant des éléments électroniques

(l'antenne, le circuit intégré et la batterie) et une couverture jetable encapsulant le capteur associé à un adhésif de qualité médicale assurant l'adhérence à la surface de la peau, a permis d'élaborer un capteur de température épidermique en temps réel à l'aide d'une communication RFID de type UHF (Miozzi, Amendola, Bergamini et Marrocco, 2017). En plus d'un écart de 0,6 °C par rapport aux méthodes de mesure de référence, l'influence de la variabilité des personnes et des conditions environnementales sur la sensibilité de ce capteur demeure à clarifier (Miozzi *et al.*, 2017).

Par ailleurs, quelques études ont tenté de mettre au point des systèmes combinant deux types de capteurs connectés, comme l'emploi d'un capteur de température à broche de type LM35 connecté à un microcontrôleur, en association avec un capteur PPG de la FC et un moyen de transmission de données Bluetooth dans un dispositif à porter sur le pouce gauche (Miah, Kabir, Tanveer et Akhand, 2015). Des travaux similaires ont permis de développer un système comprenant un capteur de température commercial (de type LM35) et un capteur PPG de la FC à porter sur l'extrémité du doigt qui utilisait un hôte Ethernet pour envoyer les données mesurées, par Internet, vers un serveur (Rahman, Barai, Islam et Hashem, 2012). Un autre dispositif a été développé pour être fixé sur la surface intérieure d'un masque respiratoire de type N95 qui comprenait un capteur de température et un capteur de RH% connectés à un microcontrôleur et utilisait le Bluetooth pour la transmission des données collectées sous l'espace mort du masque (Roberge, Kim et Benson, 2012). Force est de constater que, mise à part une étude (Hertleer *et al.*, 2013) qui comprenait une validation dans un environnement proche de la réalité, tous les autres travaux concernant l'élaboration de capteurs de température portables ont été limités à des validations de concept en laboratoire sur très peu de sujets humains.

L'utilisation des appareils intra-auriculaires portables est une autre tendance qui a attiré l'attention de la communauté scientifique durant les dernières années afin de mesurer la température corporelle en temps réel. Par exemple, un appareil de mesure de température corporelle sans fil à double canal a été mis au point en utilisant deux capteurs de température numérique à insérer simultanément dans les deux canaux auditifs, avec un mode de transmission de données Bluetooth (Oğuz et Ertaş, 2013). Dans un autre travail, une thermopile⁷ infrarouge (IR), intégrée dans un cache-oreilles pour mesurer la température tympanique à l'intérieur de l'oreille, a été associée à deux thermistances de type NTC afin de mesurer, respectivement, la T_s et la température ambiante dans la zone de l'oreille (Boano, Lasagni et Römer, 2013). Ce concept, qui employait un nœud récepteur radio pour la collecte des mesures, a montré des erreurs de mesures lors des baisses de température externe et par des vents froids. Ces erreurs sont entre autres expliquées par une baisse physiologique de la température tympanique en raison du flux sanguin froid du visage vers l'oreille interne, ainsi que par le flux d'air

⁷ Thermopile : dispositif électronique convertissant l'énergie thermique en énergie électrique, composé de thermocouples connectés en parallèle ou en série

externe et le vent générant des gradients de température à l'intérieur de l'emballage de la thermopile (Boano *et al.*, 2013). Afin d'augmenter la précision des mesures par des thermopiles IR dans des appareils intra-auriculaires portables (spécifiquement dans les premières minutes de mesure), une dispersion à base de graphène – un matériau hautement conducteur et connu pour sa forte absorption optique dans la gamme infrarouge – a été enduite sur le substrat en silicium de la lentille d'une thermopile de ce type. La thermopile modifiée a été reliée à un microcontrôleur pour la collecte des mesures et utilisait un mode de transmission de données Bluetooth (Chaglla, Celik et Balachandran, 2018). Bien que le concept ait permis d'accroître la précision de mesure, tout en permettant d'effectuer un suivi de la température tympanique sur de plus longues périodes durant les phases d'activité, la forme du dispositif (un boîtier de 6 cm x 6 cm x 2 cm, à porter derrière l'oreille) est loin d'être pratique et requiert des travaux de miniaturisation.

Concernant la température centrale du corps, la thermométrie rectale demeure la méthode la plus précise pour mesurer la température corporelle et sa valeur est également reconnue comme étant la plus représentative de la T_c (Dias et Cunha, 2018). D'ailleurs, la thermométrie rectale a été largement utilisée comme étant une mesure standard dans les études sur le stress thermique, notamment dans les travaux sur le développement des indices de contrainte physiologique ou de contrainte perceptuelle (Butts *et al.*, 2017 ; Moran *et al.*, 1998 ; Petruzzello *et al.*, 2009 ; Tikuisis *et al.*, 2002). Cependant, la thermométrie rectale est une méthode invasive, elle prend du temps et nécessite des arrangements privés, ce qui la rend inadaptée à des fins de surveillance continue, surtout dans les phases d'activité (Majumder *et al.*, 2017).

Certains dispositifs intra-auriculaires prétendent pouvoir présenter une valeur de T_c à partir de paramètres mesurables tels que la température tympanique à l'intérieur de l'oreille. Dans une étude très récente, l'aptitude d'un appareil intra-auriculaire commercialisé (Cosinuss^o de type C-med[®]) à suivre la T_c a été évaluée tout en comparant sa performance avec un thermomètre auriculaire IR commercial utilisé dans le domaine médical (ThermoScan[®] 7 de Braun GmbH) et avec une pilule téléométrique disponible permettant de mesurer la température de l'appareil digestif (CorTemp[®] HT150002). L'évaluation de la performance de ces appareils portés par des pompiers lors de simulations de tâches de lutte contre l'incendie a permis de constater que, sans l'application d'un coefficient de correction aux données, l'appareil commercial de Cosinuss^o montrait une faible corrélation avec les données collectées par les autres méthodes. L'écart très important des données collectées avec celles issues des autres appareils dans les phases d'activité est probablement dû à l'emplacement du capteur, ainsi qu'à une fixation non adéquate de l'appareil de Cosinuss^o, provoquant un mouvement du capteur par rapport à l'oreille. Par conséquent, les auteurs ont conclu que l'appareil intra-auriculaire portable Cosinuss^o est une méthode non valide pour mesurer la T_c des pompiers en activité (Roossien *et al.*, 2020).

Quelques experts suggèrent aussi de détecter la T_c grâce à l'utilisation de dispositifs non intrusifs à double capteur, composés de deux capteurs pour mesurer respectivement la T_s et le flux de la chaleur (Gunga *et al.*, 2009), de deux sondes mesurant la T_s (Kimberger *et al.*, 2009), d'un double capteur de flux de la chaleur (Kitamura, Zhu, Chen et Nemoto, 2010) ou d'un double capteur de flux de la chaleur associé à un double capteur de la T_s (Sim, Lee, Baek et Park, 2012). Ces dispositifs, placés sur la peau de l'individu, sont principalement destinés au domaine médical et prennent en compte des équations basées sur les températures saisies à chaque point de mesure, la résistance thermique des couches isolantes utilisées dans la conception du dispositif et la résistance thermique de la peau et du tissu sous-cutané pour faire une estimation de la T_c (Kitamura *et al.*, 2010 ; Sim *et al.*, 2012). Le thermomètre à micro-ondes fut aussi proposé pour mesurer la T_c à partir du torse de la personne, en fonctionnant dans deux bandes silencieuses à 1,4 et 2,7 GHz. Dans ce type de thermomètre, l'objet à mesurer se trouve normalement dans le champ lointain de l'antenne qui reçoit les ondes planes rayonnées par l'objet. Dans le cas de la thermométrie de la T_c , la puissance émanant des tissus du corps est reçue par une sonde située en champ proche, sur la peau (Popovic, Momenroodaki et Scheeler, 2014). Aucun de ces concepts à double capteur ou à micro-ondes pourtant portables ne permet la transmission sans fil des données. Ils peuvent toutefois constituer une base d'inspiration pour l'adaptation de tels concepts pour la surveillance en temps réel de la T_c durant le travail, tout en exigeant un effort de miniaturisation des dispositifs actuels (Popovic *et al.*, 2014).

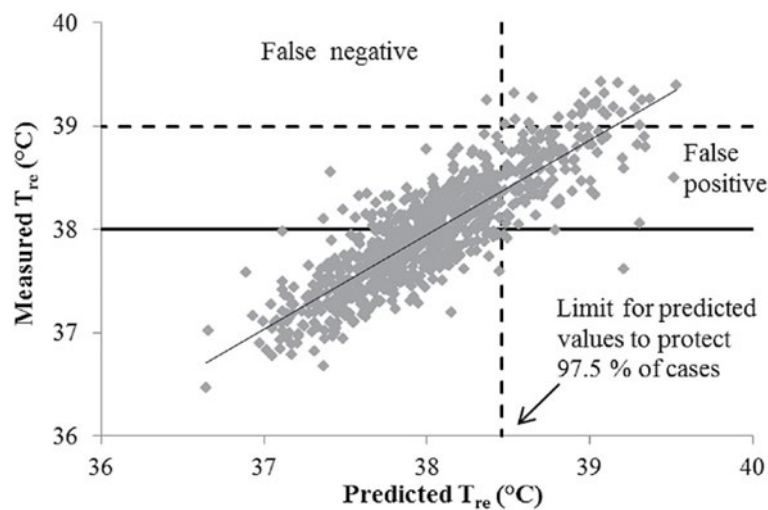
Parmi l'éventail des dispositifs portables, des pilules télémétriques avalables et connectées ont également été proposées afin de mesurer et de communiquer la T_c en temps réel, à partir de l'appareil digestif de l'individu (voir le tableau 6 et le tableau 8, annexe A). Bien qu'il s'agisse d'une méthode alternative à la thermométrie rectale tout en facilitant le suivi en continu de la T_c , elle demeure intrusive. Son application est essentiellement limitée aux travaux de recherche ou au suivi de l'état de groupes restreints de travailleurs, lors des séances d'entraînement de lutte contre les incendies, par exemple, ou de militaires. Par ailleurs, il a été rapporté que la lecture des pilules télémétriques peut être fortement influencée par l'ingestion de fluides chauds ou froids (Dias et Cunha, 2018). De plus, l'estimation de la T_c par des modèles de transfert de chaleur basés sur la production de chaleur métabolique est très complexe, car en plus du taux métabolique, ces modèles nécessitent de multiples paramètres d'entrée associés à l'environnement, aux caractéristiques individuelles et aux vêtements (Buller, Tharion, Hoyt et Jenkins, 2010).

Afin de pallier les problèmes liés aux méthodes d'obtention de la T_c , certains travaux de recherche ont tenté d'obtenir indirectement la T_c en mettant en place des algorithmes et des modèles mathématiques basés sur la mesure en temps réel par des dispositifs portables de paramètres tels que la FC ou la T_s . Malgré la différence dans les variations de T_c et de T_s en fonction de divers stimuli, quelques études ont essayé d'établir une relation entre ces deux températures afin d'obtenir une estimation de la T_c à partir de la T_s (Dias et Cunha, 2018). Des algorithmes dérivés, basés sur la corrélation des données et

la régression linéaire, ont été déployés afin d'estimer la T_c à partir des valeurs mesurées de la T_s et du flux de la chaleur. Afin de valider ces algorithmes, la déduction de la T_c à partir de données collectées sur différents sujets a été comparée avec des mesures effectuées par des pilules télémétriques avalables. Toutefois, la précision des algorithmes pour la T_c s'est avérée dépendante de l'emplacement des capteurs de T_s sur la peau. Même lorsque le capteur est positionné sur le sternum, considéré comme étant le meilleur emplacement évalué, la valeur déduite de la T_c a montré une variance de 75 % par rapport aux mesures de références dans les environnements chauds (Xu, Karis, Buller et Santee, 2013).

Dans ce contexte, une meilleure prédiction de la T_{rec} fut proposée en utilisant la régression linéaire multiple et l'analyse de la variance (ANOVA), afin de développer une équation basée sur des paramètres mesurables tels que la T_s , la T_s isolée, la température microclimatique, la FC et l'estimation de la charge de travail (Richmond, Davey, Griggs et Havenith, 2015). Bien que la validation d'un tel modèle avec des données collectées sur plusieurs sujets ait pu démontrer une meilleure estimation de la T_c (figure 6), ces résultats demeurent spécifiques aux conditions testées en laboratoire. De plus, la méthodologie déployée requiert une mesure de la T_s sur 11 sites différents, du front aux pieds, et une valeur de T_s isolée mesurée à un endroit précis de la partie inférieure du cou (Richmond *et al.*, 2015). L'ensemble de ces éléments rendent le modèle difficilement applicable à un suivi en temps réel dans un environnement de travail.

Figure 6. La température rectale mesurée par rapport à la température prédite (°C). La ligne horizontale solide indique la limite de sécurité recommandée pour un groupe de travailleurs, comme définie par l'Organisation mondiale de la Santé. La ligne verticale en pointillés montre le seuil prédit à une T_{rec} de 38,46 °C afin d'éviter que la T_{rec} de 97,5 % de la population étudiée ne dépasse les 39 °C. (Richmond *et al.*, 2015).



D'autres chercheurs ont tenté de calculer la T_c à partir de la FC mesurée en temps réel par des dispositifs portables tels que les sangles pectorales connectées disponibles dans le commerce (tableau 6). Un groupe de recherche, reconnu comme étant le pionnier de cette méthodologie, a proposé plusieurs versions d'un modèle basé sur un filtre de Kalman⁸ pour calculer la T_c à partir de la FC (Buller *et al.*, 2013 ; Buller, Tharion, Duhamel et Yokota, 2015 ; Buller *et al.*, 2010 ; Lucas *et al.*, 2017). Ce modèle suppose que la FC est liée à la fois à la quantité de chaleur générée par le travail physique, ainsi qu'à la quantité de chaleur dissipée par le système thermorégulateur, suggérant que le changement de la T_c peut être estimé par une fonction de la FC (Buller *et al.*, 2010). Alors que la première version du filtre proposé ne permettait pas de modéliser correctement les valeurs de T_c supérieures à 39,5 °C (Buller *et al.*, 2010), les versions optimisées de ce filtre Kalman ont pu être validées avec un groupe homogène et restreint de testeurs (Buller *et al.*, 2013 ; Buller *et al.*, 2015). La version optimisée du filtre de Kalman de (Buller *et al.*, 2013), testée sur les récolteurs de canne à sucre au Salvador, a démontré un assez bon accord entre les données issues du modèle et les températures gastro-intestinales des travailleurs collectées par des pilules avalables téléométriques (Lucas *et al.*, 2017). Cependant, les auteurs admettent que ces versions optimisées doivent encore être ajustées en tenant compte de la réduction de la FC maximale avec l'âge, du sexe, de même que des niveaux de forme physique sensiblement différents des individus (Buller *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'algorithme a sensiblement mieux performé lorsqu'il a été alimenté par une valeur connue de la T_c initiale, une condition qui rend son application difficile dans un contexte de santé et de sécurité du travail, car cela exigerait des mesures de la T_{rec} ou de la T_c au début de l'activité. Dans une étude similaire, une équation sigmoïde basée sur un filtre de Kalman étendu et incorporée dans l'algorithme a été utilisée pour effectuer une estimation de la T_c au repos à l'aide de la collecte de la FC (Looney *et al.*, 2018). Malgré une corrélation acceptable des données modélisées avec les températures collectées par des pilules téléométriques chez des sujets, des erreurs d'estimation ont pu être induites dans des phases d'activité influençant la T_c et la FC. Par ailleurs, le modèle reste à valider avec un groupe plus élargi que huit personnes et avec une population autre que des jeunes actifs et en bonne santé (Looney *et al.*, 2018).

Dans ce même cadre, un modèle prédictif de la T_c a été mis au point en tenant compte des paramètres tels que la consommation maximale d'oxygène (VO_2 max), la T_s mesurée à sept endroits différents du corps et la FC maximale utilisée comme coefficient de correction, tout en appliquant une analyse de régression multiple linéaire. Bien que l'introduction d'un coefficient de correction ait permis d'améliorer la prédiction de T_c par

⁸ Filtre Kalman : Algorithme fournissant des estimations de certaines variables inconnues, compte tenu des mesures observées dans le temps. Il procure une méthodologie de calcul récursive pour estimer l'état d'un processus contrôlé par des données discrètes, à partir de mesures qui sont généralement bruyantes, tout en fournissant une estimation des incertitudes (Lucas, Buller, Weiss, Peraza et Wegman, 2017).

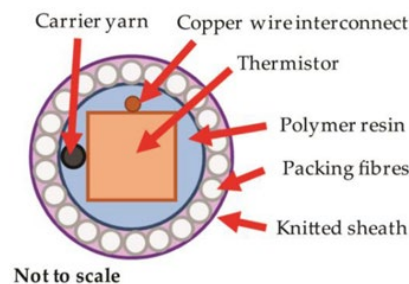
rapport aux modèles précédents, le modèle n'a pu être validé que pour les séances de repos des pompiers soumis à des tests physiques (Kim, Siyeon et Lee, 2017). Par ailleurs, dans une récente étude, une méthode de calcul de la T_c à partir des mesures séquentielles de la FC fut développée en utilisant un algorithme basé sur un filtre de Kalman étendu (Hunt, Buller, Maley, Costello et Stewart, 2019). Étant basé sur des paramètres tels que le VO_2 max et la FC maximale, la fiabilité de l'algorithme alimenté avec des données collectées chez des sujets humains s'est avérée acceptable que jusqu'à une valeur de $T_c = 38,5$ °C. De ce fait, une optimisation et une validation supplémentaire de la méthodologie sont nécessaires afin d'améliorer la précision des prévisions de hausse de la T_c au-delà de 38,5 °C (Hunt *et al.*, 2019). Une autre étude a été consacrée à la prédiction de la T_s et de la T_c , en essayant d'associer un modèle de thermorégulation humaine ayant un système actif et un système passif pour déterminer la thermorégulation du corps, avec un modèle thermique du vêtement, simulant le transfert de chaleur et d'humidité de la peau à l'environnement à travers le microenvironnement et les couches du textile (Yang, Jie, Weng, Wang et Song, 2017). Bien que cette combinaison de 2 modèles puisse être appliquée pour prédire les réponses physiologiques humaines et évaluer le confort thermique du vêtement, elle n'a pas pu réussir à prédire correctement la T_s pour certains segments du corps et requiert des travaux d'améliorations (Yang, J. *et al.*, 2017).

Mise à part les technologies permettant la surveillance de la T_s et la T_c en temps réel, la présente étude s'est aussi intéressée aux travaux visant l'intégration des capteurs permettant de surveiller la température du microclimat entre le corps et le vêtement ou la température extérieure lors d'exposition à des agresseurs thermiques. Toutefois, la revue de la littérature a permis de constater qu'une partie des travaux utilisant des capteurs intégrés aux textiles était dédiée à la mesure de la T_s . Un autre constat fut le nombre très limité d'études portant sur les systèmes intégrés aux vêtements, alors que de nombreux travaux ont été dédiés à l'élaboration de capteurs de température à base de textiles intelligents et d'électroniques flexibles. Il est à noter que la principale motivation pour le développement de capteurs textiles ou flexibles est de surmonter les obstacles qui entravent la détection de la température par des dispositifs portables malgré les progrès réalisés (Khan *et al.*, 2016). En effet, la plupart des thermistances ou thermocouples utilisés dans les dispositifs portables sont sensibles à la déformation, ce qui peut altérer la détection de la température dès qu'il y a flexion ou torsion du capteur (Khan *et al.*, 2016).

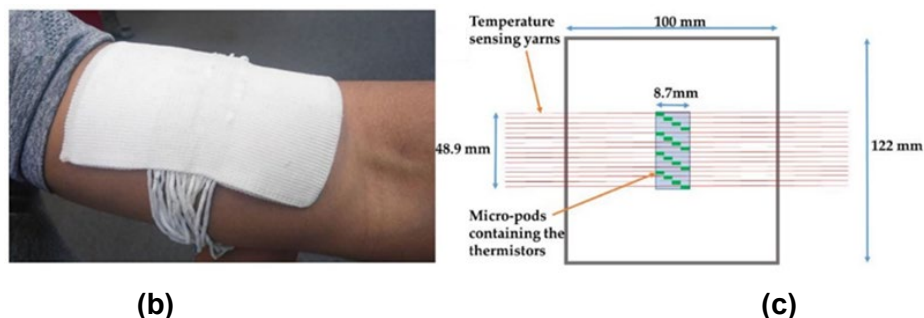
Dans une partie de ces études, une approche hybride fut proposée pour contourner la sensibilité à la déformation du capteur, en intégrant dans la structure du textile une petite thermistance rigide, incorporée dans une matrice flexible et extensible (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris et Dias, 2018). Dans le plus ancien des travaux retenus, une thermistance de type NTC, en association avec des fils textiles conducteurs, a été intégrée dans une ceinture en bambou afin de surveiller la température corporelle des nouveau-nés. Malgré une précision de détection encourageante de 0,1 °C du prototype testé dans un milieu hospitalier, le concept manquait de solidité mécanique en raison de l'utilisation de nœuds pour assurer la connexion entre le capteur et les fils textiles

conducteurs transmetteurs de signaux (Chen, Dols, Oetomo et Feijs, 2010). Dans des travaux plus récents, la résistance mécanique a pu être améliorée en encapsulant une thermistance standard dans une microcapsule en résine polymère (figure 7 a), puis en l'intégrant dans les fibres d'un fil et ensuite en l'incorporant dans une structure textile (figure 7 b, figure 7 c), (Hughes-Riley et Dias, 2018 ; Hughes-Riley, Lugoda, Dias, Trabi et Morris, 2017 ; Lugoda, Pasindu, Dias, Hughes-Riley et Morris, 2017 ; Lugoda, P, Dias et Morris, 2015 ; Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018). Dans le cadre de ces travaux, des optimisations continues ont été effectuées, notamment en encapsulant la thermistance commerciale dans une microcapsule en résine thermoconductrice pour améliorer la sensibilité du capteur (Lugoda, Pasindu *et al.*, 2017), ou en connectant les fils du capteur à un microcontrôleur et à un module Bluetooth pour assurer la transmission sans fil des données collectées (Hughes-Riley *et al.*, 2017 ; Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018). Cependant, ces concepts requièrent encore des améliorations, particulièrement en matière de précision de détection, car des différences de 0,5 à 1 °C ont été observées entre la lecture et la température réelle des surfaces des échantillons (Hughes-Riley *et al.*, 2017 ; Lugoda, Pasindu *et al.*, 2017).

Figure 7. Intégration de thermistance dans le textile : (a) schéma en coupe transversale de l'encapsulation d'une thermistance dans un fil textile avec une structure en 3 couches : la résine polymère, les fibres de garnissage et une gaine tricotée. Le fil comprend également un fil porteur dans l'encapsulation de résine pour améliorer la résistance à la traction de la structure finale (Hughes-Riley *et al.*, 2017). L'image (b) et le schéma (c) de la structure d'un thermographe textile conçu à partir des thermistances encapsulées dans une microcapsule polymérique et intégrées dans les fils textiles (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018).



(a)



Les capteurs de température peuvent également être fabriqués à base de matériaux textiles composés de fibres ou de fils conducteurs en utilisant des technologies conventionnelles de fabrication de textiles telles que le tissage, le tricotage ou la broderie (Majumder *et al.*, 2017). Dépendamment de leur principe de fonctionnement, ces types de capteurs peuvent être classés comme thermocouples ou détecteurs de type RTD. D'une part, les thermocouples textiles exploitent l'effet Seebeck qui développe une différence de potentiel correspondante entre les jonctions de deux structures métalliques différentes en raison de la différence de température entre les jonctions (Majumder *et al.*, 2017). Des structures comprenant des paires d'électrodes textiles composées de fibres graphites/fibres antistatiques, de fibres graphites non tissés/fils enduits d'argent ou de tricot hybride en acier/fil d'alliage constantan, ont été utilisés pour concevoir des thermocouples textiles (Jeon, Lee et Bao, 2013 ; Ziegler et Frydrysiak, 2009). Malheureusement, ces thermocouples présentent une relation non linéaire entre la variation potentielle et la température, et ils sont caractérisés par une faible précision et une faible sensibilité par rapport aux thermocouples à fil métallique classiques (Majumder *et al.*, 2017). De plus, ils sont sensibles aux changements d'humidité relative de l'environnement (Ziegler et Frydrysiak, 2009).

D'autre part, les RTD textiles utilisent la dépendance à la température des matériaux ayant une résistivité électrique, pour déterminer la température. Ces capteurs peuvent être élaborés en incorporant, dans le tissu, des fils métalliques ou conducteurs ayant un fort coefficient de résistance à la température (Majumder *et al.*, 2017). Or, des capteurs fibreux de type RTD ont été conçus de plusieurs façons : a) en insérant des fils métalliques (cuivre, nickel et tungstène) dans une structure tricotée (Husain, M. D., Kennon et Dias, 2014), b) en intégrant des filaments métalliques au milieu d'une structure de tricot double selon différentes densités d'incorporation de fils métalliques (Husain, M. et Kennon, 2013), c) en utilisant des fils de coton enduits d'une solution de polymère conducteur PEDOT-PSS et d'une couche d'encapsulation de polystyrène intégrable dans une structure textile (figure 8 a, figure 8 b) à l'aide du tissage ou de points de couture (Lee, J.-W. *et al.*, 2018), d) en brodant des fils d'acier inoxydable austénitique chrome-nickel sur un substrat textile (Soukup, Hamacek, Mracek et Reboun, 2014), ou e) en brodant un fil hybride composé de fibres de polyester et d'un microfil en acier inoxydable sur un tissu ayant comme application cible l'intégration sur la couche externe des vêtements de pompiers (Polanský *et al.*, 2017). Ces travaux ont pu démontrer que les RTD textiles offrent une précision et une sensibilité accrues, un temps de réponse plus

court ainsi qu'une meilleure linéarité avec la température par rapport aux thermocouples (Majumder *et al.*, 2017). Cependant, à l'opposé des capteurs conventionnels, ces capteurs textiles ne peuvent fournir des mesures de température localisées, car la mesure est plutôt effectuée sur toute la zone du textile RTD (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018 ; Polanský *et al.*, 2017).

Certains groupes de recherche ont aussi rapporté une approche de détection optique pour la mesure de la température corporelle en intégrant des fibres optiques dans la structure textile. Un réflecteur de Bragg distribué, possédant la capacité de réfléchir la lumière de longueurs d'onde spécifiques et de la transmettre à d'autres longueurs d'onde, a été utilisé. Le réflecteur de Bragg a été encapsulé avec une substance polymérique et a ensuite été tissé dans la structure d'un tissu (Li, H., Yang, Li, Liu et Wei, 2012). Les auteurs ont aussi analysé mathématiquement la transmission de la chaleur de la peau à l'environnement par l'entremise du réflecteur de Bragg et ont utilisé un modèle à coefficients pondérés pour effectuer une estimation de la température corporelle, en tenant compte du décalage de la longueur d'onde en fonction de la température. Ils ont aussi rapporté une précision élevée de $\pm 0,18$ °C dans une plage de 33 à 42 °C (Li, H. *et al.*, 2012). Une nouvelle méthode d'intégration de fibres optiques constituant un réflecteur de Bragg dans une structure de tissu à double paroi creuse a également été proposée dans une étude plus récente (Xiang *et al.*, 2019). Malgré la haute précision fournie par les réflecteurs de Bragg, le concept est loin d'être applicable à l'élaboration d'un dispositif portable, car il requiert une connexion à au moins une source de lumière à large spectre amplifiée et un analyseur de spectre optique (Xiang *et al.*, 2019). La conception d'un capteur de flux de chaleur textile a aussi été proposée en investiguant une méthode d'insertion d'un fil en constantan dans trois structures textiles différentes (tricot à base de polyamide, aramide non tissé et tissu à base d'aramide), suivi de plusieurs étapes de traitements et de post-traitements incluant le dépôt électrochimique du cuivre sur le fil constantan pour obtenir un fil thermoélectrique (Codau, Onofrei, Bedek, Dupont et Cochrane, 2015).

Bien qu'il s'agisse de travaux encore très exploratoires, certains groupes de recherche ont tenté de mettre au point des capteurs textiles à mémoire de forme. Le concept repose sur l'utilisation de polymères à mémoire de forme sensibles aux stimuli externes comme la lumière ou la température. La détection de la température peut être obtenue en filant des fibres de polymères à mémoire de forme, comme les fibres de polyuréthane, avec d'autres fibres pour concevoir des tissus textiles, ou en enduisant des émulsions de polymère à mémoire de forme sur un tissu ou un tricot (Castano et Flatau, 2014). D'autres configurations de matériaux à mémoire de forme applicables aux tissus comprennent les nanofibres et les mousses à mémoire de forme. Afin de caractériser la sensibilité thermique des capteurs textiles à mémoire de forme, la mise en place d'un coefficient de mémoire de forme en fonction du changement d'angle de déformation avec la variation de la température a été suggérée (Hu, Jinlian, Meng, Li et Ibekwe, 2012).

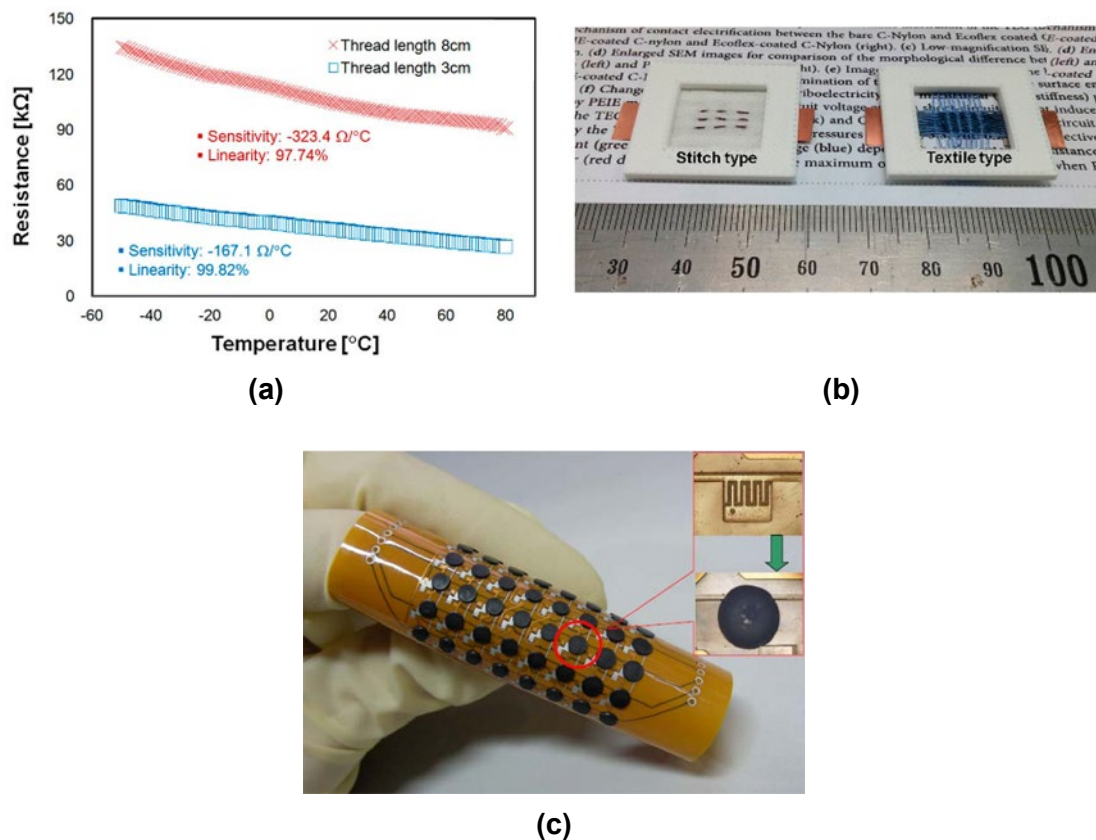
De nombreux chercheurs ont également travaillé sur le développement de capteurs de température flexibles avec le dépôt des matériaux facilitant la détection de la température sur des substrats polymériques souples à l'aide de techniques d'impression, d'enduction ou de revêtement (Majumder *et al.*, 2017). À condition de préserver leur tenue mécanique, ces types de capteurs peuvent ensuite être attachés aux tissus ou intégrés dans leur structure (Castano et Flatau, 2014). Dans ce contexte, plusieurs études se sont intéressées à l'élaboration de capteurs de température flexibles à base de graphène, un matériau hautement conducteur d'un point de vue électrique et thermique (Yan, Wang et Lee, 2015). Dès lors, des couches détectrices de température à résistance électrique ont été mises au point avec l'impression d'une formulation à base d'oxyde de graphène sur des substrats en polyimide et polytéréphtalate d'éthylène, suivi d'une cuisson à l'infrarouge pour obtenir un matériau avec un coefficient de température négatif (Kong, Le, Li, Zunino et Lee, 2012). Une couche avec une propriété RTD ayant un coefficient de température positif (PTC) a également été élaborée en déployant la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma de nanofeuillets de graphène sur un substrat en polydiméthylsiloxane (PDMS) (Yang, Jun *et al.*, 2015). Par ailleurs, une thermistance étirable a été conçue en intégrant une dispersion à base de graphène dans une matrice à base de PDMS comme canal de détection, qui a été associé à des électrodes formées à base de nanofilaments d'argent dans des membranes en polycarbonate (Yan *et al.*, 2015). Grâce à l'utilisation du graphène, une sensibilité à la température très proche de celle des matériaux de type oxyde métallique utilisés dans les capteurs classiques a été obtenue dans une structure flexible (Kong *et al.*, 2012). Cependant, la structure étirable à base de graphène a montré de fortes variations dans son comportement thermique en fonction de la déformation mécanique (Yan *et al.*, 2015), ce qui peut constituer une limitation pour leur intégration dans des structures en textile.

Les techniques d'impression ont aussi été utilisées afin de concevoir des capteurs de température flexibles. Les travaux les plus notables comprennent l'impression par sérigraphie d'une encre à base de carbone sur une feuille de poly imide pour obtenir une structure de type thermistance à PTC (Bielska, Sibinski et Lukasik, 2009), l'impression par sérigraphie de différentes encres résistives sur du poly éthylène naphtalène étant protégées par une couche de passivation d'encre diélectrique et un post-traitement au plasma pour améliorer le coefficient de résistance à la température de la couche imprimée (Aliane *et al.*, 2014), l'impression par jet d'encre d'une dispersion à base de nanoparticules d'oxyde de nickel dans l'espace entre deux électrodes imprimées en argent, en utilisant un substrat en poly imide pour mettre au point une thermistance NTC (Huang, Kao et Liao, 2013) et l'impression par jet d'encre d'une dispersion à base de complexe d'argent sur un substrat en poly imide pour obtenir une couche avec un comportement de thermistance à PTC (Dankoco, Tesfay, Bènevent et Bendahan, 2016). Globalement, les structures thermosensibles imprimées ont pu offrir une sensibilité élevée à la température, tout en ayant de très faibles hystérésis lors des cycles de chauffage et de refroidissement (Aliane *et al.*, 2014 ; Dankoco *et al.*, 2016 ; Huang *et al.*, 2013). L'impression par sérigraphie des dispersions à base de polymère conducteur PEDOT-PSS et des nanotubes de carbone sur des substrats en poly imide, et l'utilisation des

électrodes imprimées à base d'argent a également permis de mettre au point des couches RTD. Les couches RTD imprimées ont été par la suite associées à des transmittances de signaux radio pour concevoir une étiquette (Honda, Harada, Arie, Akita et Takei, 2014a) ou un bandage (Honda, Harada, Arie, Akita et Takei, 2014b) à placer sur la peau d'un individu permettant de communiquer avec un appareil lecteur externe (Honda *et al.*, 2014a). Des capteurs de température imprimés ont aussi été développés sur des substrats en papier (Courbat, Kim, Briand et De Rooij, 2011 ; Tao, Jia, He, Liao et Wang, 2017). Dans leur état actuel, ces types de développement sont plutôt destinés au domaine de l'emballage et requièrent un travail de reformulation des encres utilisées pour les rendre compatibles avec des substrats polymériques non poreux ayant des propriétés de surface différentes de celles du papier (Dias et Cunha, 2018).

La formation des couches composites sur des substrats flexibles a aussi été une autre méthode utilisée pour la conception de capteurs de température flexibles. Dans ce registre, un film composite avec des propriétés RTD a pu être obtenu avec l'enduction d'un mélange de poly o-méthylaniline et d'oxyde de manganèse (Mn_3O_4) sur un substrat solide (Kumar, Singla, Kumar et Rajput, 2015). Par ailleurs, un film composite à base de nanofilaments de tellure dans une matrice de poly 3-hexylthiophène ayant été déposé sur un substrat flexible a permis d'obtenir un comportement RTD (Yang, Ya, Lin, Hou, Zhang et Wang, 2012). La déposition des particules de graphite dispersées dans une matrice de PDMS sur des électrodes interdigitées de cuivre préfabriquées sur un substrat en poly imide (figure 8 c) a également permis d'obtenir un film composite démontrant des propriétés RTD (Shih *et al.*, 2010). Une dispersion de nanotubes de carbone multiparois dans une solution à base de toluène de poly styrène – éthylène – butylène – styrène (SEBS), déposée sur des électrodes en or fabriquées sur un substrat en poly imide, a permis d'obtenir un film composite montrant une caractéristique thermoélectrique de type NTC avec une sensibilité comparable aux valeurs les plus élevées pour les métaux (Matzeu, Pucci, Savi, Romanelli et Di Francesco, 2012). Dans une étude similaire, le dépôt d'une dispersion de mélange de nanotubes de carbone multiparois et un dérivé de poly vinyle benzyle avec triméthylamine sur une paire d'électrodes en or fabriquées sur un film en poly imide a conduit à la formation d'un film composite avec un comportement RTD et une sensibilité comparable à celle des métaux (Giuliani, Placidi, Di Francesco et Pucci, 2014). L'association d'un film composite binaire de polyéthylène et d'oxyde de polyéthylène chargé de microparticules de nickel avec une antenne RFID passive a permis de concevoir un capteur de température portable de type RTD. Malgré la portabilité de ce prototype de capteur, il possédait une sensibilité trois fois plus grande que celle des capteurs commerciaux semblables et une erreur de mesure non négligeable de $\pm 2,7$ °C (Jeon *et al.*, 2013). Dans ce cadre, un réseau de 16 capteurs de température de type RTD a également été fabriqué avec des traces d'or en serpentín étroit à l'aide d'une technique de microlithographie sur de minces couches de poly imide pour ainsi concevoir une peau électronique à fixer sur la peau par l'action des forces de Van der Waals (Webb *et al.*, 2013).

Figure 8. Capteur de température flexible à base de polymères conducteurs et pouvant être intégrés dans des textiles: (a) comparaison de la résistance électrique avec la température d'un fil de détection de température à base de PEDOT-PSS avec deux longueurs de 8 cm et 3 cm démontrant des sensibilités et linéarités différentes, (b) le fil à base de PEDOT-PSS utilisé comme capteur de température intégré sous forme de couture et de tissu (Lee, J.-W. *et al.*, 2018), (c) un réseau de capteurs de température flexibles avec des agrandissements de l'image exposant respectivement la structure de l'électrode et les composites formés sur l'électrode (Shih *et al.*, 2010).



L'analyse globale des travaux sur les capteurs de température intégrés dans les structures textiles, les capteurs textiles et les capteurs de température flexibles a permis de constater que la grande majorité de ces études demeurent au stade de la preuve de concept des composants qui sont encore à intégrer dans des vêtements. Malgré cette observation, la revue de la littérature dans la présente étude a tout de même identifié quelques travaux dédiés aux capteurs de température intégrés dans les vêtements de travail. Dans le plus ancien des travaux sélectionnés par la présente étude, la température ambiante et le flux de chaleur à travers le vêtement ont pu être mesurés par un réseau de capteurs modifiés de grade PTC intégré dans la face extérieure et le côté interne des vêtements de protection des pompiers avec la transmission des données collectées à un

appareil de lecteur externe assuré par le protocole de communication Zigbee. Le prototype, testé sur un mannequin thermique en laboratoire, restait encore à valider dans un environnement opérationnel (Oliveira *et al.*, 2010). Une veste de travail intégrant un capteur de température IR et deux capteurs combinés d'humidité/température a aussi été mise au point pour offrir une meilleure protection aux travailleurs du domaine pétrolier opérant dans le grand froid. De ce fait, un capteur d'humidité/température a été placé à l'extérieur de la veste et le second du côté opposé à l'intérieur de la veste. Le capteur IR a été monté face à la peau, à l'intérieur de la manche, afin d'effectuer des mesures sans contact de la T_s au niveau du poignet. Un microcontrôleur relié aux capteurs permettait de transmettre les données collectées avec le Bluetooth BLE (Seeberg, Hjelstuen, Austad, Larsson et Storholmen, 2011). Cette veste, équipée de capteurs de température, a pu être optimisée notamment en plaçant une couche de film réfléchissant la chaleur dans la doublure de la veste à l'intérieur, afin de diminuer l'influence de la chaleur de la personne sur les mesures de la température extérieure, et en ajoutant une couche de matériau élastomérique autour du capteur extérieur, afin de réduire le flux de chaleur à travers la veste dans la proximité du capteur. Cependant, le prototype n'a pu être testé que sur une seule personne dans un environnement de laboratoire (Seeberg *et al.*, 2013).

Deux électrodes à base de textiles conducteurs pour mesurer la réponse galvanique cutanée et un capteur d'un thermomètre numérique commercial pour relever la T_s ont été utilisés pour concevoir un gant intelligent et une sangle intelligente pour le bras dans une étude qui avait pour objectif de tester la performance de deux dispositifs portables de même fonction dans l'évaluation du stress mental des combattants en temps réel. Malgré la validation des deux concepts sur une quarantaine de sujets, le montage demeurait encombrant et les principales connexions entre les capteurs et le microprocesseur étaient assurées avec des fils électriques pouvant être vulnérables aux sollicitations mécaniques. Par ailleurs, le dispositif était dépourvu de moyen de communication sans fil, car les données collectées étaient préservées sur une carte mémoire (Seoane *et al.*, 2014). Dans le cadre d'un travail théorique, un système intelligent portable pour suivre l'état physiologique des pompiers en temps réel a été présenté en se basant sur un modèle de système de détection et de surveillance. Selon ce modèle, l'habit de pompier devrait comprendre 3 composants principaux, dont des capteurs physiologiques (température corporelle, fréquence cardiaque et accéléromètre), des capteurs liés à la lutte contre l'incendie (capteurs de température de champ et de fumée) et un nœud de calcul (intégré avec un processeur de signal numérique et le module de communication Zigbee). Avec l'ensemble des données collectées, un diagramme en deux dimensions serait à établir pour évaluer l'état physiologique du pompier, classé selon 4 valeurs à surveiller : le plus haut niveau d'activité, le niveau statique, le plus haut niveau de la FC et la FC inférieure à la normale (Bu *et al.*, 2015). Dans une autre étude, la conception d'un vêtement de navigation nautique doté de capteurs de FC et de température ambiante, d'un microcontrôleur et d'un module Bluetooth, a été suggérée pour une meilleure sécurité des marins. Connecté à un capteur de FC placé sur le lobe de l'oreille, le système de détection est inséré dans une poche étanche au-dessus du revers de la veste. Un système maître pourrait être monté au centre du bateau afin de communiquer et de

surveiller simultanément plus de neuf membres de l'équipage (Kara, Yesilpinar, Senol et Akkan, 2017).

Dans une étude analytique, la possibilité de l'utilisation d'une thermistance microencapsulée et intégrée dans un fil (Lugoda, Pasindu *et al.*, 2017 ; Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018) pour mesurer la T_s à partir d'un brassard, d'un gant ou d'une chaussette, a été analysée (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Oliveira, Morris et Dias, 2018). Le brassard a été conçu avec quatre fils contenant une thermistance et en suivant trois itérations de design, donc trois modes de transmission : par le stockage de données sur une carte mémoire, par un câble USB directement lié à un ordinateur, et par une communication sans fil par Bluetooth. Le gant et la chaussette, dont le design était basé sur cinq fils contenant une thermistance, ont respectivement utilisé le Bluetooth et une carte d'acquisition de données liée directement à un ordinateur comme moyen de transmission de données. Selon les analyses effectuées dans cette étude, la pression de contact affecte grandement les mesures sur les mains en raison de la déformation de la structure du fil du capteur. Il a aussi été remarqué que l'ajustement de la chaussette peut considérablement affecter les mesures, tout comme le port d'une chaussure ou la marche, qui ont également fortement influencé les mesures de température. D'après les auteurs, ces erreurs de mesures semblent montrer que la surveillance de la température de la peau du pied par des capteurs intégrés aux textiles pourrait être problématique pour les applications où une précision avec de faibles écarts de mesure est requise. En somme, les expériences de cette étude ont montré que les tissus incorporant les fils-capteurs devraient être conçus en fonction de la pression de contact exercée au point de mesure de la température (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Oliveira, *et al.*, 2018).

Il convient de souligner que la maturité technologique des systèmes dans les études concernant les capteurs de température à utiliser dans la gestion thermique intelligente se situe majoritairement à un niveau TRL de 3 (critique analytique, validation du concept) ou de 4 (validation de concept ou de modèle en laboratoire). Quelques-uns des travaux sur la conception de capteurs flexibles peuvent même être placés à un niveau TRL situé entre 2 et 3. Seulement une étude dans la catégorie des travaux sur l'intégration de capteurs de température dans les structures textiles atteint un niveau de 7 (démonstration dans un environnement opérationnel). Parmi les études sur la conception ou sur l'évaluation de capteurs de température portables ou connectés et celles sur la déduction de T_c à partir des variables physiologiques, quelques-unes atteignent un niveau TRL de 6 (essais dans un milieu très représentatif en laboratoire ou en milieu opérationnel simulé).

4.2.2 Capteur de température : produits commerciaux

L'étude sur les capteurs de température pouvant servir à la gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels s'est principalement concentrée sur les dispositifs portables ou sur les capteurs intégrables aux vêtements de travail, permettant de collecter en temps réel les températures corporelles T_s et T_c , ou les températures environnementales et microclimatiques. Comme pour les dispositifs commerciaux de

détection de signes biométriques facilitant le repérage du stress thermique, des tableaux détaillés d'informations techniques collectées sont disponibles à l'IRSST sous forme de documents additionnels au présent rapport. À des fins de simplification, seules les informations telles que le secteur d'application, les paramètres mesurés, le principe technologique et la méthode d'intégration ont été classifiées dans les colonnes du tableau 8 pour chacun des produits sélectionnés. Les autres aspects technologiques de ces dispositifs ont été discutés d'une manière plus générale dans la présente section. Des dispositifs présentés dans le tableau 8 ont pour vocation principale de mesurer la température en étant portés par l'individu.

Comme discuté précédemment, certains dispositifs de détection de signes biométriques possédant une structure multi capteurs (tableau 6 et tableau 7, annexe A), permettent aussi de prélever des valeurs de la T_s et de la T_c , ou d'en faire une estimation indirecte. Afin d'éviter toute redondance, ces dispositifs n'ont pas été repris dans le tableau 8 (annexe A). Parmi les dispositifs commerciaux de détection de signes biométriques sous forme d'accessoires portables ou de textiles intelligents présentés dans le tableau 6, seulement quatre systèmes permettent de mesurer les paramètres liés à la température corporelle. Deux des sangles pectorales connectées (Biopeak, QardioCore) utilisent des capteurs de température par contact pour mesurer la T_s à partir de la poitrine de la personne. Le dispositif Equivital (figure 4 a), qui est également une sangle pectorale pour suivre le comportement du cœur, permet de détecter respectivement la T_c et la T_s grâce à une pilule téléométrique avalable et à un patch connecté. Le patch contient un capteur de température qui envoie les données collectées à l'unité amovible de traitement et de transmission des données attachée à la sangle. Finalement l'appareil intra-auriculaire portable One™ de Cosinuss° (figure 4 g) prélève la température tympanique par un capteur de température par contact de type RTD, en parallèle aux signaux biométriques (tableau 6). Selon les informations disponibles par les fabricants, certains dispositifs tels qu'Equivital et One™ (Cosinuss°) garantissent des précisions de mesure d'environ $\pm 0,1$ °C, acceptable pour les appareils de grade médical. Par ailleurs, 60 % des patches intelligents de détection des signes biométriques exposés dans le tableau 7 permettent de caractériser des paramètres liés à la température corporelle. Alors que deux dispositifs (Cardiomo Care (figure 4 f) et Vitalconnect (figure 2 e)) déploient des capteurs de température par contact de type RTD pour repérer la T_s , le reste des patches intelligents utilisent des capteurs optiques IR pour détecter la température de la peau de la personne (Inomedis, Kenzen, Isansys, Vivonics). Le dispositif Kenzen (figure 4 d) seul dispositif dédié à la détection du stress thermique et à son signalement en temps réel, associe des capteurs de flux thermiques, de bio-impédance et électrochimique (mesurant le taux de sueur) avec son thermomètre optique intégré afin d'alimenter au mieux son algorithme de détection de stress thermique (tableau 7). Il est à noter que la plupart des manufacturiers de patches intelligents mettent en avant une précision de collecte de données acceptable pour le domaine médical.

En ce qui concerne les dispositifs commerciaux retenus dans le tableau 8 qui sont spécifiquement dédiés à la saisie de la température en temps réel, plusieurs principes technologiques sont à noter. Ils peuvent être classés selon trois catégories principales, dont des exemples sont illustrés à la figure 9 : i) capteurs thermiques intégrés dans le vêtement, ii) capteurs portables ou connectés, et iii) capteurs flexibles, qui représentent respectivement 19 %, 69 % et 12 % de l'ensemble des produits recensés. Les capteurs de température flexibles, qui sont principalement des thermistances imprimées associées à une puce électronique, peuvent être combinés dans un système hybride avec les protocoles de transmission de données sans fil. Permettant d'assurer des précisions de mesures allant de $\pm 0,1$ à $\pm 0,25$ °C, ces capteurs présentent la particularité de fournir un temps de réponse allant de 100 à 250 ms et requièrent de faibles puissances de travail dans l'ordre du nano ou du micro watts. En offrant une grande zone de détection active avec une structure légère, les capteurs de température flexibles sont principalement dédiés à des domaines tels que le transport, la logistique, la chaîne d'approvisionnement alimentaire, l'électroménager, etc. Leur adaptation à des structures textiles semble constituer encore un défi à relever, notamment en termes de durabilité au port ou à l'entretien (Liu, Y. *et al.*, 2018).

Figure 9. Exemples de dispositifs portables, disponibles dans le commerce et dédiés à la saisie de la température en temps réel : (a) capteur thermique intégré dans une semelle (par Flextrapower - anciennement Bonbouton, New York, NY, É.-U.), (b) capteur thermique intégré dans un vêtement de pompier « VIKING Life-Saving Equipment » (par Ohmatex, Viby, Danemark), (c) dispositif intra-auriculaire portable Degree° (par Cosinuss°, Munich, BY, Allemagne), (d) capteur thermique connecté CORE™ (par GreenTEG, Zurich, Suisse), (e) bracelet E4 (par Empatica, Boston, MA, É.-U.), (f) capteurs flexibles « Thermistor » et « TiM and XY-T Array » (par PST, Ndabeni, Cape Town, Afrique du Sud).



Un autre constat important des recherches effectuées dans le cadre du présent rapport a été le nombre très limité de produits basés sur les capteurs de température intégrés dans le vêtement. Cependant, les exigences du secteur de la lutte contre l'incendie ont favorisé l'utilisation, dans quelques pays, d'équipements de protection intégrant des capteurs de température. Aux États-Unis, cette implémentation technologique a été facilitée par des réglementations qui rendent obligatoire le port d'un système d'alerte personnelle (connu

comme PASS, pour *Personal Alert Safety System*) par tous les pompiers en vertu de la norme NFPA 1500 (norme sur le programme de santé et de sécurité du travail du service d'incendie). S'agissant par ailleurs d'un des rares équipements de protection individuels intelligents ayant été approuvés et requis par une norme, le dispositif PASS utilise un détecteur de mouvement pour repérer le mouvement ou le manque de mouvement d'un pompier et émet une alarme si un pompier s'effondre ou reste immobile pendant plus de 30 secondes. Des capteurs thermiques ont aussi été intégrés dans plusieurs appareils PASS pour avertir les pompiers d'expositions thermiques éprouvantes (Cao, 2013). Dans ce cadre, la collaboration des compagnies Ohmatex et Viking a permis de présenter un habit de pompier avec des capteurs thermiques intégrés dans les couches intérieures et extérieures de la veste de pompier pour surveiller respectivement la chaleur environnementale et celle près du corps (figure 9 b). Les capteurs ont été attachés à l'aide d'un ruban conducteur aux écrans DEL sur la manche et à l'arrière de l'épaule gauche. L'affichage DEL de l'épaule est visible pour les autres pompiers afin de leur indiquer des situations potentiellement dangereuses, alors que la DEL sur la manche inférieure permet d'indiquer au pompier les niveaux de chaleur élevés à l'intérieur et à l'extérieur de la combinaison coupe-feu. Le cercle extérieur de l'écran clignote lentement lorsque la température extérieure atteint environ 250 °C, alors qu'il clignote rapidement à 350 °C. De la même manière, une longue ligne sur l'écran clignote lentement lorsque la température à l'intérieur du vêtement atteint environ 50 °C, et rapidement à 68 °C. Enfin, ce vêtement a présenté l'avantage de résister à au moins 25 cycles de lavage, malgré la présence d'un dispositif électronique intégré (Hertleer *et al.*, 2013).

L'autre exemple est la compagnie TeckniSolar Seni qui propose un vêtement de pompier muni de capteurs de température et d'humidité. À l'extérieur de la veste, un capteur mesure la température ambiante et, à l'intérieur de la veste, la température microclimatique est mesurée. De plus, une caméra thermographique indiquant la température ambiante en temps réel est intégrée au casque. Alors que l'ensemble des paramètres mesurés sont retransmis à distance par les ondes radio, lorsque la température dépasse 45 °C sous la veste et 144 °C à l'extérieur, le pompier est averti par une alarme sonore visuelle (Duval, 2016 ; Hertleer *et al.*, 2013). Une première analyse de ces produits commercialement disponibles pour les pompiers montre que ces deux vêtements, utilisant le même principe, avertissent les utilisateurs à des seuils de température complètement différents. Ceci peut être expliqué par les compositions variées des vêtements de pompiers proposés et donc par les différents degrés de protection et d'évacuation de la chaleur. Toutefois, les systèmes de capteurs intégrés déclenchent des alertes qu'à des seuils définis de température et ne semblent pas adaptés à la situation personnelle de chaque pompier.

Mis à part les vêtements de travail équipés de capteurs de température, certains produits destinés au domaine médical peuvent être un sujet d'intérêt pour le transfert de connaissances envers une application en santé et en sécurité du travail. Par exemple, une entreprise (Flextrapower, figure 9 a) propose une semelle connectée avec une thermistance intégrée qui est destinée à surveiller en continu et discrètement les

changements de température dans les pieds des patients et qui détecte les premiers signaux d'ulcères du pied chez les personnes diabétiques. Ce concept s'appuie sur l'utilisation d'une couche de graphène pour constituer un capteur de température de type RTD de haute sensibilité (Yan *et al.*, 2015).

Pour ce qui est des capteurs de température portables ou connectés, la présente étude a retenu un capteur portable IR intra-auriculaire de type Degree par Cosinuss° (figure 9 c), qui s'appuie sur la mesure du rayonnement thermique du tympan, ainsi que sur la chaleur rayonnée du canal auditif environnant avec des précisions annoncées de $\pm 0,1$ °C, dans une gamme de température de 34 à 43 °C. Cependant, comme discuté dans la section de la revue de la littérature sur les capteurs thermiques, une récente étude a pu conclure qu'un capteur IR intra-auriculaire portable de Cosinuss° ne permettait pas de mesurer adéquatement la T_c des pompiers en activité en raison des erreurs de mesure survenues dues à l'emplacement du capteur et son mouvement par rapport à l'oreille (Roossien *et al.*, 2020). Cela démontre que la conception de ce type de capteurs est encore à optimiser ou à mieux adapter à une mesure lors d'activités intenses au travail.

Une autre catégorie de capteurs de température portables inclut les patches intelligents qui permettent de mesurer la T_s à l'aide de capteurs de température par contact de type RTD (Temp°Traq de Blue Spark, gSKIN® BodyTemp et CORE™ de GreenTEG (figure 9 d)) ou de capteurs de température IR intégrés (Fever scout de VivaLNK et TM 735 de Medisana). Ces patches présentent à l'utilisateur l'évolution de sa T_s en temps réel, à l'aide d'applications mobiles connexes. À l'exception du patch Temp°Traq de Blue Spark qui est entièrement jetable, tous les patches intelligents retenus comprennent des dispositifs de capteurs électroniques réutilisables à placer sur la peau à l'aide de rubans adhésifs jetables (tableau 8). Par ailleurs, le CORE™ de GreenTEG (figure 9 d) permet de faire une estimation de la T_c à partir de la T_s en appliquant un algorithme associé. Le suivi de l'état de santé de la personne est la principale application proposée pour ces patches qui prétendent obtenir des précisions de mesure $\pm 0,1$ °C, acceptable pour le domaine médical. Cependant, comme pour les patches intelligents présentés dans le tableau 7, ces produits nécessitent également une préparation spécifique de la peau avant leur application et requièrent d'être positionnés à des emplacements spécifiques sur le corps en fonction de la conception de leur système respectif. Certains produits, sous forme de bracelets connectés proposant une plateforme multi capteurs, offrent une mesure de la T_s à l'aide des capteurs de température IR. Dans les deux exemples de bracelets connectés retenus dans le tableau 8, une précision assez acceptable de $\pm 0,15$ °C est proposée par le manufacturier (bracelets Embrace2 et E4 par Empatica (figure 9 e)). Cependant, ces types de bracelets exigent des études de validation dans un contexte d'utilisation en milieu de travail, car il est connu que les dispositifs portables placés sur le poignet peuvent être exposés à des erreurs de mesure en raison du grand mouvement de cette partie du corps lors des activités quotidiennes (Khan *et al.*, 2016) ou des interférences de bruits optiques (Khan *et al.*, 2016). La présente étude a aussi sélectionné un capteur de température sous forme de pilule téléométrique avalable qui est spécifiquement dédié à la mesure de la température de l'appareil digestif (VitalSense® de Philips). Bien que cette

méthode ait été utilisée comme une référence de comparaison dans l'évaluation de la T_c dans des travaux de recherche (Buller *et al.*, 2015 ; Buller *et al.*, 2010 ; Looney *et al.*, 2018), la technologie de la pilule téléométrique est considérée comme un moyen intrusif. De plus, son application requiert le respect de conditions contrôlées pour éviter que la consommation de breuvages chauds ou froids influence les mesures (Dias et Cunha, 2018). Finalement, il est aussi à noter que l'ensemble des capteurs de température portables analysés utilisent le Bluetooth comme principal moyen de transmission des données collectées.

À titre indicatif, un appareil portable équipé d'un écran d'affichage permettant de tracer la variation de la température environnementale à l'aide d'un capteur de température numérique intégré (Endicate™ par American Thermal Instruments) a aussi été rapporté dans le Tableau 8. Bien que ce dispositif soit destiné aux domaines pharmaceutique et médical, aux procédés industriels et aux chaînes d'approvisionnement alimentaire, la technologie déployée dans sa conception peut, à terme, être transférée à une application afin de permettre au travailleur de suivre sa température environnementale en temps réel. De la même manière, bien qu'il ne s'agisse pas d'équipements électroniques portables prêts à l'emploi, deux types de capteurs de température destinés à être intégrés dans la conception d'appareils portables (capteur MAX30205 par Maxim Integrated et la plateforme de capteurs pour l'internet des objets de Kallisto® par Sensry) ont été présentés à titre d'exemple de principaux composants disponibles pour l'élaboration de systèmes intégrés de détection de température.

4.3 Actuateur chauffant

Au cours des dernières années, l'industrie textile a proposé de multiples solutions pour offrir une meilleure protection contre le froid lors des activités de plein air en hiver. En utilisant des textiles techniques, les solutions proposées ont permis de réduire les pertes de chaleur du corps tout en assurant la transmission de l'humidité issue de la sueur à travers un vêtement qui doit demeurer résistant à l'eau et au vent (Li, Z., Ke, Wang et Yang, 2018). Malgré les avancées technologiques, ces types de vêtements sont encore à améliorer. En effet, la plupart des vêtements contre le froid extrême restent volumineux en étant basés sur des structures fibreuses multicouches, tirant profit de la résistance thermique des matériaux textiles qui dépend principalement de leur teneur en air emprisonné à l'intérieur. De plus, les vêtements hautement isolants peuvent parfois limiter les mouvements du corps et des bras, et réduire la dextérité manuelle pour ainsi nuire aux performances des individus. Une sensation d'inconfort peut particulièrement être accentuée lorsque les vêtements contre le froid sont portés en combinaison avec d'autres tenues (Cao, 2013 ; Michalak et Krucińska, 2016). Par ailleurs, il a toujours été difficile d'effectuer une estimation correcte du vêtement ou du nombre de couches optimales à porter lors d'activités physiques soutenues dans des conditions environnementales variables (Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010). Lors d'activités intenses dans le froid, la transpiration excessive, et en conséquence l'humidification des couches intérieures du vêtement, peut mener à une diminution considérable de l'isolation thermique et ainsi

augmenter le risque de blessures liées au froid (Hu, J. et Murugesh babu, 2009 ; Jussila, Kirsi, Rissanen et Rintamäki, 2017). Pour offrir un meilleur niveau de confort et une endurance supérieure lors d'activités dans le froid extrême, des vêtements chauffants personnels ont été proposés par les acteurs de l'industrie du textile. Ces types de vêtements ayant aussi pour vocation d'offrir des solutions plus personnalisées aux individus, incorporent des technologies additionnelles à leur structure de base en textile. L'élaboration de vêtements chauffants personnels trouve un intérêt particulier dans un contexte de travail afin de protéger les travailleurs contre les blessures liées directement ou indirectement à une exposition prolongée au froid extrême (Jussila, Kirsi *et al.*, 2017). Ces vêtements peuvent être présentés sous quatre catégories principales selon leur principe de fonctionnement : 1) vêtement chauffant à base de flux de fluide, 2) vêtement chauffant à matériau à changement de phase ; 3) vêtement chauffant chimique ; 4) vêtement chauffant électrique (Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010).

Parmi les différentes catégories de vêtements chauffants personnels, la présente étude s'est particulièrement intéressée aux vêtements chauffants électriques, car ces vêtements possèdent la capacité de fournir la chaleur d'une manière durable et soutenue tout au long de l'exécution des tâches dans le froid extrême, tant que leurs sources d'énergie portables le permettent. En outre, leur structure qui incorpore un élément chauffant peut permettre d'assurer la diffusion de la chaleur dans un vêtement de protection contre le froid peu encombrant et de moindre épaisseur (Song, Lai et Wang, 2015 ; White, 2014). En plus, l'intégration de modules électroniques en association avec les éléments chauffants électriques ouvre la possibilité de la mise en place de vêtements avec des niveaux de chauffage modulables, qui peuvent même être ajustés selon la situation personnelle de l'individu (Dupler *et al.*, 2019). Au contraire des vêtements chauffants électriques, les vêtements chauffants à base de flux de fluide sont très encombrants. La quasi-totalité de ce type de vêtement chauffant, basé sur un système de tubulure souple de circulation de liquide ou d'air chaud, requiert une source d'énergie externe et d'alimentation de fluide. De plus, le système de tubulure intégré dans le vêtement le rend plus ou moins rigide, ce qui peut limiter son utilisabilité lors d'activités (Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010). Néanmoins, grâce à une efficacité thermodynamique pour chauffer le corps humain et à une capacité d'échange thermique des zones spécifiques, les vêtements chauffants à base de flux d'air ont été appliqués avec succès pour des chirurgies médicales (Min, Yoon, Yoon, Bahk et Seo, 2018).

Les vêtements chauffants à base de matériau à changement de phase (PCM), un procédé pourtant réputé pour son effet régulant, ont aussi d'importantes limites malgré un potentiel très intéressant et de nombreux efforts dédiés. La limite la plus importante de cette technologie est son effet de chauffage temporaire. Bien qu'il soit actif durant sa période de changement de phase, le dégagement de la chaleur cesse lorsqu'un PCM, initialement à l'état liquide, se solidifie avec l'exposition au froid. Ainsi, pour retrouver sa source de chaleur basée sur un mécanisme de changement de phase, il est nécessaire que le PCM atteigne à nouveau son état liquide en s'éloignant de l'environnement froid (Ramesh Babu et Arunraj, 2018). Il a été également rapporté dans la littérature que

l'intégration des PCM microencapsulés dans les vêtements par des techniques d'enduction, de revêtement et de filage de fibres montre un faible effet chauffant en raison de leur faible masse. En plus, cet effet peut disparaître progressivement lorsque les vêtements sont lavés plusieurs fois (Salaün, 2019). Comme la capacité de régulation thermique des textiles incorporant un PCM dépend fortement de la quantité de matériau utilisé, l'utilisation de pochettes de PCM mène généralement à un habit lourd et peut ne convenir qu'aux personnes pour qui, selon les activités, le poids supplémentaire n'est pas un problème (Salaün, 2019). Afin de pallier ces problèmes, de nombreux travaux de recherche sont en cours. Cependant, d'importants efforts semblent encore nécessaires afin d'optimiser l'enthalpie globale de changement de phase et la fenêtre thermique des PCM pour assurer un effet de dégagement de chaleur soutenu (Ramesh Babu et Arunraj, 2018 ; Salaün, 2019 ; Zarma, 2017) et ainsi répondre aux exigences des heures continues de travail.

Enfin, les vêtements chauffants chimiques étant principalement basés sur l'énergie chimique transformée en énergie thermique par oxydation lors de réaction de substances chimiques, ils sont essentiellement utilisés dans les combinaisons de plongée pour protéger les plongeurs en eau froide. La méthode d'intégration reste primitive, car le matériau réactif placé dans des emballages sous forme de coussin est collé par un adhésif sur la surface intérieure du vêtement. Les substances chimiques générant de la chaleur sont conservées dans des compartiments séparés à l'intérieur du coussin. Lorsque l'utilisateur presse le coussin, la barrière entre les substances se rompt et les réactifs se mélangent, produisant de la chaleur. Bien que ce système puisse utiliser une masse de réactifs sélectionnés pour fournir une réaction chimique hautement exothermique dépourvue de sous-produits gazeux, la température dégagée est difficilement contrôlable et de durée limitée (Thilagavathi, Muthukumar et Kannaian, 2017 ; Wang, F. et Lee, 2010). En effet, la vitesse et la durée de chauffage peuvent être contrôlées par la taille des particules et le rapport de mélange des particules constitutives (par exemple les particules de magnésium et de fer). La durée de chauffage peut varier de quelques minutes à quelques heures. Une durée moyenne de 2,5 heures a été évoquée pour exprimer la durée efficace de chauffage fournie par cette technologie. En plus de la difficulté dans l'obtention de températures exactes, une des importantes limites de cette technologie est l'impossibilité d'arrêter le chauffage lorsque la réaction est enclenchée. En fonction des substances utilisées, des températures allant de 25 à 54 °C peuvent être obtenues. En fonction des couches utilisées dans le vêtement ou des sous-vêtements portés, une température de chauffage supérieure à 42 °C peut provoquer des brûlures de la peau. Certaines études montrent que le chauffage du torse par cette technologie est acceptable tout au long de l'exposition, mais que les jambes et surtout les pieds deviennent très froids vers la fin de l'exposition. Les vêtements chauffants chimiques sont néanmoins largement utilisés dans les combinaisons de plongée pour protéger les plongeurs en eau froide (Dupler *et al.*, 2019 ; Li, Z. *et al.*, 2018 ; Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010)

4.3.1 Actuateur chauffant : revue de la littérature

Le fonctionnement des vêtements chauffants électriques est basé sur le principe de chauffage Joule également connu sous le nom de chauffage ohmique, selon lequel le passage d'un courant électrique à travers un conducteur génère de la chaleur en affectant l'intégrité du corps conducteur. Selon la première loi de Joule, la puissance de chauffage de ce principe est proportionnelle au produit de la résistance du corps conducteur et du carré du courant électrique passant (Olszewski, 2018). Dans les premières versions de vêtements chauffants électriques, l'élément chauffant était basé sur un fil électrique intégré ou sur un coussin 3D composé de fils électriques ou d'éléments graphites. Malgré leur avantage en matière de confort accru dans le froid, certains utilisateurs ont souligné les inconvénients tels que l'encombrement, la restriction de mouvement, la surchauffe et les problèmes de durabilité du système de câblage électrique à l'usage et à l'entretien (Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010). Par ailleurs, le fil électrique chauffant présentait des limites techniques, car en restreignant le chauffage au trajet du passage du fil, il ne parvenait pas à produire de la chaleur uniforme sur une zone sélectionnée (White, 2014). Afin de contourner ces inconvénients, la conception d'éléments chauffants à partir de fibres textiles conducteurs ou de couches conductrices apposées sur la surface des structures textiles a été proposée par la communauté scientifique (Thilagavathi *et al.*, 2017).

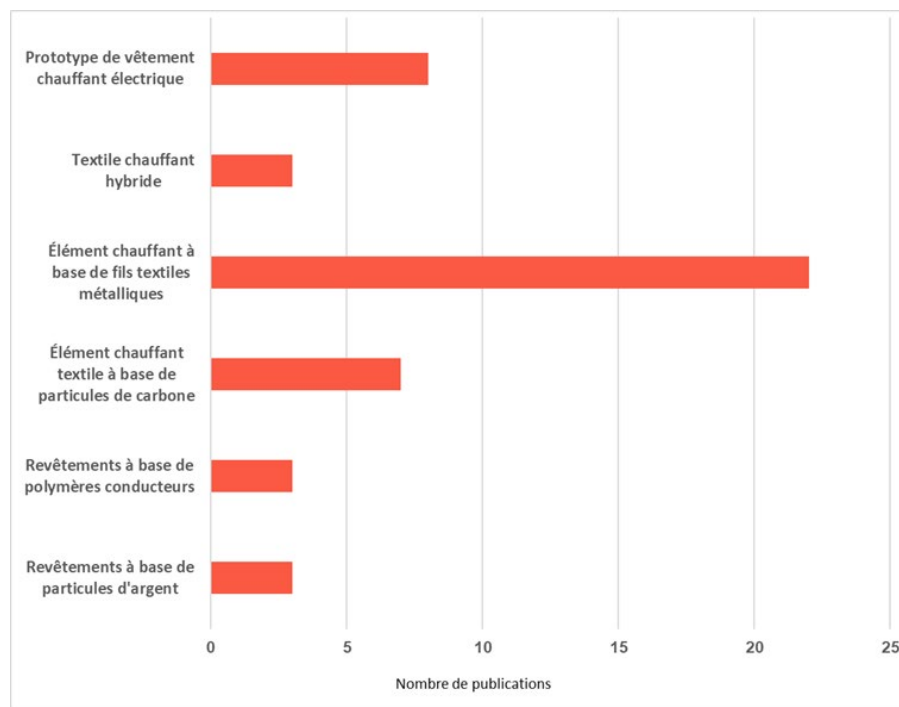
Jusqu'à présent, la faible capacité des batteries assurant le bon fonctionnement du système lors de longues expositions au froid a été un des inconvénients majeurs des tissus incorporant des éléments chauffants électriques (Dolez *et al.*, 2018).

Le développement rapide des téléphones et des ordinateurs portables a abouti à la disponibilité de batteries puissantes et durables qui peuvent également être utilisées pour un chauffage d'appoint. Cependant, ces batteries peuvent présenter des inconvénients en matière de poids, d'encombrement dans la structure du vêtement, ainsi que le danger de surchauffe pour certains types de batteries lithium-ion (Dolez *et al.*, 2018). Le problème de l'alimentation énergétique efficace des fonctions électriques étant un défi majeur dans la conception des textiles intelligents, de nombreux travaux ont été entrepris afin de développer de nouvelles méthodes d'intégration de sources d'énergie (Gulzar *et al.*, 2016) et des batteries de structure textile (Zhao, T., Zhang, Zhou, Zhang et Deng, 2018), tout en recherchant de nouvelles sources d'énergie régénérées telles que l'énergie solaire, la puissance des ondes sonores, le mouvement humain ou même l'énergie de frottement des vêtements (Liu, Z. *et al.*, 2018).

S'agissant d'un sujet d'intérêt scientifique important qui touche l'ensemble du domaine des textiles intelligents, la discussion sur les progrès du stockage d'énergie flexible et portable pour les différents types de textiles électroniques nécessite une étude exhaustive et distincte du présent rapport sur l'état de l'art des technologies de la gestion thermique intelligente. Ainsi, la revue de la littérature des actuateurs chauffants s'est principalement concentrée sur les techniques de développement d'éléments chauffants électriques qui permettent d'offrir une consommation énergétique plus efficace avec les sources

existantes d'énergie portables, ainsi qu'un meilleur apport thermique, tout en garantissant des structures maniables et flexibles afin de mieux supporter les sollicitations lors de l'usage et l'entretien des équipements de protection individuels. À partir des articles initialement sélectionnés pour évaluer l'état actuel des connaissances sur les actuateurs chauffants, 46 travaux ont été retenus pour effectuer l'analyse détaillée des éléments chauffants électriques qui ont pu être répartis en six catégories : 1) substrats textiles enduits avec des compositions à base de particules d'argent, 2) supports textiles recouverts avec des polymères conducteurs, 3) éléments chauffants textiles à base de particules de carbone, 4) éléments chauffants à base de fils textiles métalliques, 5) textiles chauffants hybrides conçus grâce à l'association d'éléments chauffants électriques et d'éléments chauffants passifs et 6) prototypes de vêtement chauffant électrique (figure 10).

Figure 10. Répartition des articles analysés concernant les actuateurs chauffants électriques à utiliser dans la gestion thermique intelligente.



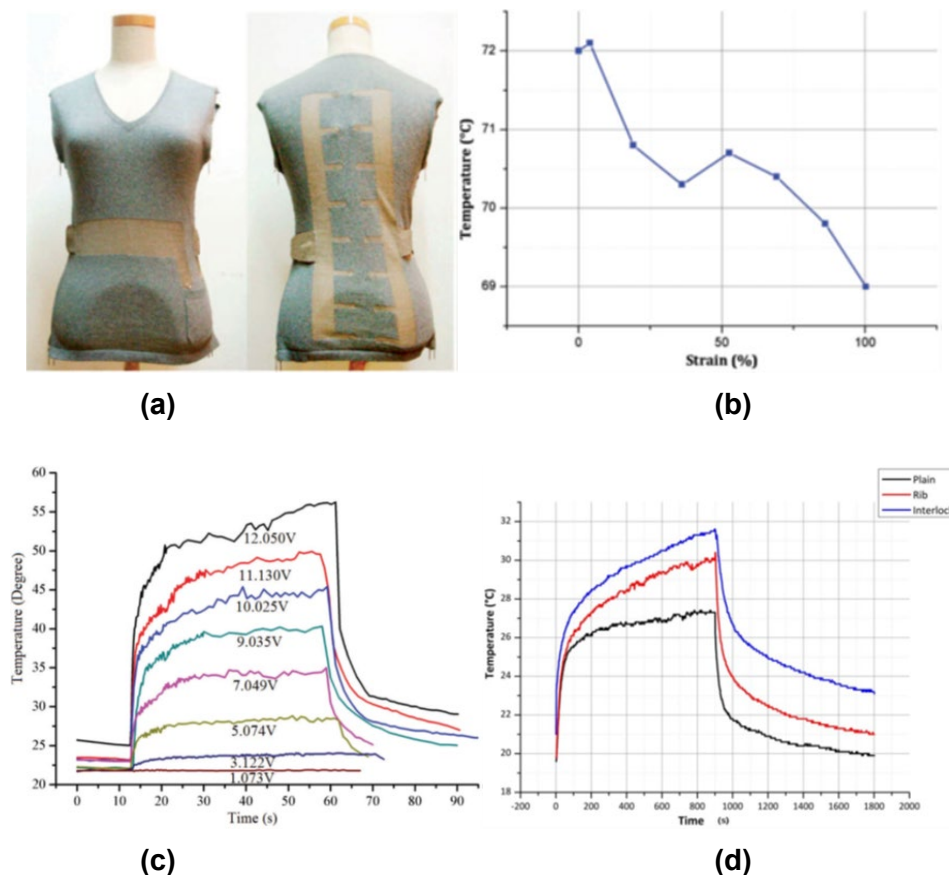
Afin de remédier aux problèmes liés à l'utilisation des fils électriques comme élément chauffant, plusieurs travaux ont été consacrés à l'application de fils textiles métalliques ou à base de compositions métalliques. Dans une partie de ces travaux, des éléments chauffants ont été mis au point en effectuant des coutures de fils textiles métalliques à la surface de divers types de tissus. Dans une étude analytique, des fils conducteurs, basés sur des fibres Vectran™ (un type de polyester aromatique) enduites par argent, ont été cousus en forme de serpentín sur trois compositions de tricot extensibles en coton-élasthane, polyester-élasthane et nylon-élasthane selon différentes variations. Il a pu être constaté que divers niveaux de chaleur peuvent être générés en fonction du nombre

de passages de fil, de l'espacement des courbes du serpentín et du type de tricot, qui dictent également le niveau de puissance électrique requise (Foo *et al.*, 2017). À partir des connaissances sur l'espacement entre les courbes du serpentín et le nombre de couches de fils superposés permettant d'obtenir la meilleure réponse thermique en matière de puissance en fonction de la température (Foo *et al.*, 2017), un prototype de poignet chauffant fournissant une gamme de température de 33 à 40 °C a été mis au point en utilisant également des fils conducteurs à base de fibres VectranTM (Gagliardi, Foo, Dupler, Ozbek et Dunne, 2018). Selon ces études, la création d'éléments chauffants à partir de fils textiles conducteurs brodés pourrait permettre de générer une plage de chaleur beaucoup plus élevée en appliquant la même puissance utilisée pour alimenter des éléments chauffants à base de fils électriques. Cependant, les auteurs admettent que l'influence de la teneur en fibres du substrat, la configuration des points de couture et l'augmentation de la zone de chauffage demande encore des travaux (Foo *et al.*, 2017 ; Gagliardi *et al.*, 2018). En utilisant la même technique, un élément chauffant à base d'un fil en argent a été conçu pour fournir une chaleur proche de celle de la température corporelle avec une puissance de 5 W supportée par une batterie portable de 10 V ayant une capacité de 6000 mAh pendant 8 à 10 h (De Mey *et al.*, 2014). Par ailleurs, la puissance d'alimentation et le temps de saturation pour une température donnée ont été analysés pour un élément chauffant conçu à partir de la couture d'un fil de nylon enduit d'argent sur un tissu à base de polyester, afin de déterminer la puissance requise pour obtenir une température allant de 27 à 43 °C (Thilagavathi *et al.*, 2017). Ces résultats peuvent alimenter la réflexion sur la conception d'éléments chauffants avec des techniques telles que la broderie à une échelle industrielle.

En raison d'une structure flexible et étirable, la conception des éléments chauffants tricotés a particulièrement attiré l'attention de la communauté scientifique durant les dernières années (figure 11). Dans ce cadre, la production de chaleur de deux fils textiles enduits d'argent ayant une résistance électrique différente, incorporés dans un tricot de laine traditionnelle, a pu être explorée en appliquant divers niveaux de tensions électriques pendant plus d'une heure. Selon les analyses effectuées, la résistance électrique totale du tricot conducteur diminue considérablement lorsque le tissu est chauffé, car la résistance linéaire des fils conducteurs, ainsi que la résistance des points de contact entre les fils conducteurs superposés dans la structure du tricot, diminuent avec l'augmentation de la température (Tong, J., Ding, Tao, Au et Li, 2014). L'étude de l'intégration d'un fil de polyester plaqué d'argent dans trois structures différentes de tricots a permis de constater que la température d'équilibre maximale de surface des tricots chauffants est fortement corrélée à la densité de consommation d'énergie. Par ailleurs, la température d'équilibre maximale de surface peut en partie être influencée par la méthode de tricotage, car la résistance électrique de certaines structures semble demeurer plus stable que d'autres durant le processus de chauffage (Liu *et al.*, 2016). L'exploration de la conception de coussins chauffants tricotés en trame utilisant trois types de fils textiles conducteurs intégrés dans deux structures de tricot similaires, mais à base de fils principaux différents (respectivement acrylique et polyester), a démontré que la résistance électrique du fil conducteur et la composition des fibres textiles du tricot dictent la chaleur

produite à un voltage d'alimentation fixe. Les auteurs ont pu conclure que le fil d'acrylique du tricot permettait d'obtenir de meilleures propriétés de chauffage et de rétention de chaleur par rapport au polyester lors de l'utilisation du même type de fil conducteur (Akbar *et al.*, 2016). L'influence du design et la méthode d'intégration d'un fil conducteur sur la chaleur produite ont également été étudiées en intégrant un fil textile enduit d'argent dans une structure totalement tricotée et en réalisant des points de couture à la surface d'une semelle de soulier. En fonction du design et du type de fils textiles constituant le tissu, des températures supérieures à celle du corps ont pu être obtenues avec des puissances électriques aussi faibles que 1,7 watt, qui peuvent être fournies par des batteries portables de faibles voltages (Poboroniuc, Curteza, Cretu et Macovei, 2014).

Figure 11. Tricot chauffant et son comportement thermique : (a) prototype d'un tricot chauffant avec un réseau de fils conducteurs en forme de peigne (Li, L., Au, Hua et Wong, 2011), (b) comportement thermique d'un tricot chauffant étiré (Hamdani, S. T. A., Fernando, Hussain et Potluri, 2016), (c) températures maximales de surface d'un tricot chauffant en fonction du voltage appliqué dans le temps (Liu *et al.*, 2016), (d) comportement thermique de tricots chauffant selon des structures unies, côtelées et interlock à base de fil d'argent à un voltage de 3 V (Hamdani, S., Potluri et Fernando, 2013).



Outre les fils textiles conducteurs en argent, plaqué d'argent ou enduit d'argent, d'autres types de fils textiles conducteurs de composition métallique ont aussi été pris en compte pour la conception d'éléments chauffants. L'étude du comportement des panneaux chauffants à base de fils d'acier en utilisant des toiles d'acier monocouches et multicouches a pu démontrer que l'effet thermique obtenu, et le temps nécessaire pour arriver à une température à l'état d'équilibre à une tension électrique fixe, dépendaient du nombre de plis de fils des toiles (Kayacan, Ozan et Yazgan Bulgun, 2009). Par ailleurs, les critères de sélection de fils conducteurs pour tricoter un élément chauffant électrique ont pu être explorés en utilisant deux types de fils en acier, deux types de fils de polyamide enduits d'argent et un fil de mélange de polyester/acier, alors que chaque fil a été tricoté suivant deux motifs : 1) un tricot laine/polyamide avec un fil conducteur de 1 m de long en trois rangées de boucles, 2) une zone conductrice dans un tricot à plusieurs plis (Šahta, Baltina, Truskovska, Blums et Deksnis, 2014). Tout en constatant que la température d'équilibre maximale des éléments chauffants était influencée par la méthode d'intégration des fils conducteurs, les auteurs ont conclu qu'un élément chauffant optimal devra inclure des fils conducteurs de faible résistance électrique, présentant des variations mineures de résistance électrique à l'allongement, procurant ainsi une bonne régularité de température pendant le processus de chauffage, tout en étant mécaniquement apte pour une structure en tricot. Dans ce travail, les fils de polyamide revêtus d'argent dans une configuration à trois plis ont pu offrir les zones de chauffage les plus uniformes tout en étant visuellement et techniquement adaptés à une structure en tricot (Šahta *et al.*, 2014). En outre, l'analyse d'une méthode de fabrication de tissus chauffants flexibles par l'intégration d'un filament en cuivre en forme de serpentín entre deux morceaux de tissus interdoublures flexibles, en utilisant le procédé d'adhérence thermique, a pu démontrer que la réduction de l'espacement des fils de cuivre et la baisse de la tension appliquée, tout en améliorant la conductivité thermique du tissu, permettent non seulement d'augmenter la température et la vitesse de chauffage, mais contribuent aussi à maintenir le tissu à une température assez uniforme (Bai *et al.*, 2018).

Dans ce contexte, un tissu ayant des propriétés d'isolation variables a pu être développé avec une structure composée de trois couches de non-tissé et deux couches intercalaires comprenant des spirales en filament de cuivre et de Nitinol comme élément à mémoire de forme sensible à la température. Les couches intérieures, chauffées par le passage d'un courant électrique, ont permis d'agrandir l'épaisseur de cette partie du tissu pendant le processus de chauffage pour ainsi assurer la hausse de l'isolation du tissu en raison de l'augmentation de l'air présent dans la direction transversale du tissu. Le changement physique induit par la chaleur des spirales conductrices pouvait être ajusté électriquement, fournissant ainsi un moyen pour contrôler le degré d'isolation globale du tissu (Michalak et Krucińska, 2016). Finalement, un tricot chauffant fut mis au point en utilisant un fil élastique conducteur de structure composite qui comprenait un filament d'élasthanne comme noyau et un filament en acier combiné avec des fibres de rayonne en tant que gaine enroulée autour du noyau. Des fils composites de différents degrés de tension ont été brodés sur la surface de tricots commerciaux pour obtenir des tissus chauffants. D'après l'analyse du comportement thermomécanique des tissus chauffants à

base de fils élastiques conducteurs, malgré une stabilité cyclique raisonnable lors des tests de traction, les températures obtenues semblaient diminuer avec la hausse de la tension d'étirement, pour atteindre malgré tout un équilibre thermique et stable après l'application de la déformation (Wang, Y., Gordon, Yu et Wang, 2018).

Afin de faciliter la conception d'éléments chauffants électriques à base de fils textiles métalliques, certains travaux de recherche ont proposé des modèles mathématiques pour mieux anticiper le comportement du textile chauffant à développer. Dans une de ces études, les propriétés thermomécaniques des structures tricotées à base de fil textile enduit d'argent ont été mathématiquement modélisées en fonction de l'influence de la pression de contact aux points de liaison structurelle sur l'intensité de chauffage. Ainsi, en tenant compte de la relation électrothermique du matériau et des paramètres structurels du tricot, la température résultante et la résistance de la boucle du tricot de largeur uniforme peuvent être prédites. Le modèle a pu être validé pour un tricot chauffant à base de fil polymérique enduit d'argent, tout en constatant que la température maximale obtenue à un voltage d'alimentation fixe dépendait de la structure du tricot en mailles unies, côtelées et interlock (Hamdani, S. *et al.*, 2013). Le même groupe a proposé un deuxième modèle afin de prédire le comportement électrothermique d'une structure tricotée de fil en acier qui a pu être évalué par la suite avec des essais expérimentaux d'intégration de fils conducteurs en acier dans des tricots à doubles plis de structures interlock et plein (Hamdani, S. T. A., Fernando et Maqsood, 2016). Les résultats de cette étude ont à nouveau démontré que la température maximale obtenue et l'arrivée à un état d'équilibre à un voltage donné dépendaient de la structure du tricot. Selon les analyses effectuées, il semblerait que des éléments chauffants à base de fils en acier peuvent générer une plus grande quantité de chaleur à très basse tension électrique et leur usage serait donc recommandé par rapport aux fils revêtus d'argent lorsqu'une chaleur élevée est requise. Cette étude préconise aussi une structure interlock pour la conception de tricot chauffant en raison d'une meilleure stabilité et d'une température plus élevée fournie, en comparaison avec un tricot plein pour une même tension électrique fournie (Hamdani, S. T. A., Fernando et Maqsood, 2016).

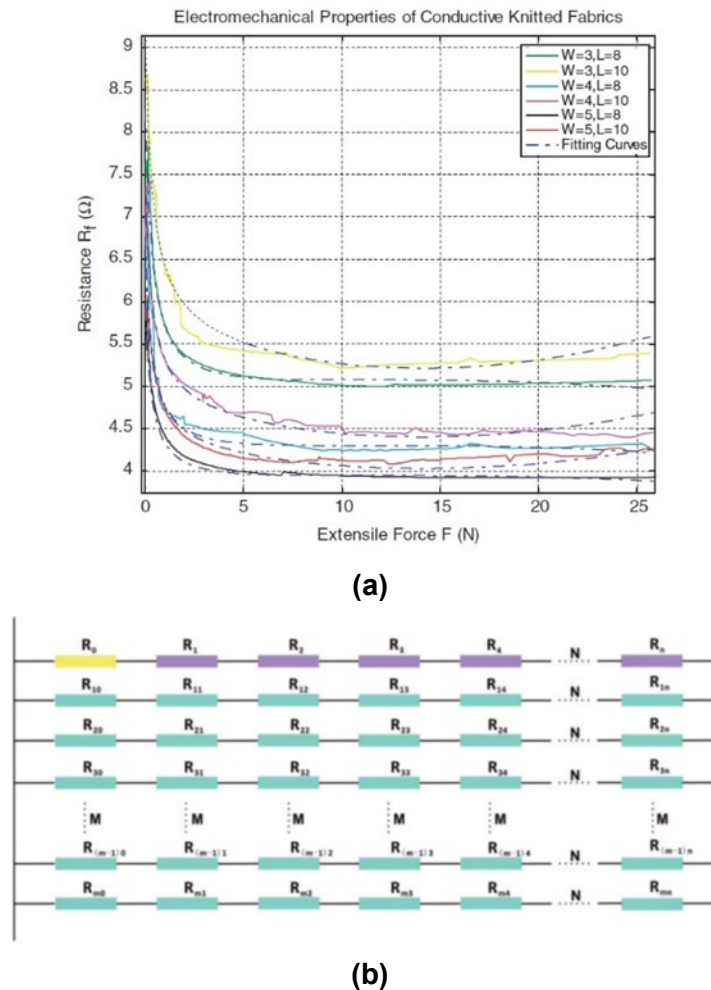
Un autre modèle théorique a été proposé pour contrôler la température des tricots conducteurs de divers rangs et fils de maille en se basant sur la relation quantitative entre la résistance électrique d'un tricot conducteur et la température fournie. Selon ce modèle, en connaissant la résistance initiale et la diffusivité⁹ thermique du tricot, ainsi que la tension électrique appliquée, il serait possible de prédire la température fournie par le tricot. La validation expérimentale du modèle avec des fils enduits d'argent dans la conception de cinq tricots de laine ayant la même densité de boucles, mais des

⁹ Diffusivité thermique : vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps, faisant intervenir la conductivité thermique et la capacité thermique d'un matériau (Tong, J.-h., Liu, Yang et Li, 2015).

arrangements de boucles différents, a mis en évidence la dépendance de la température maximale obtenue au type d'arrangement de boucles (Tong, J.-h. *et al.*, 2015). Un autre modèle prédisant les propriétés électrothermiques des tricot conducteurs fut proposé en prenant en considération la capacité thermique des fils conducteurs et non conducteurs, la résistance électrique, ainsi que la capacité thermique du tricot chauffant. La validation expérimentale du modèle, qui prenait aussi en compte le coefficient de conductivité thermique, la masse et la température initiale du tissu, a pu démontrer que les coefficients de conductivité thermique et les capacités thermiques des tissus électrothermiques dépendaient du type de fibre conventionnel et de la densité des boucles du tricot. L'analyse de l'intégration de fils enduits d'argent dans trois types de tricot en laine, en acrylique ou en coton, dont chaque type avait trois densités différentes, a prouvé que la température maximale et le temps nécessaire à l'atteinte d'une température stable de chauffage dépendaient des types de fibres textiles déployées et de la densité des boucles du tricot (Li, L., Au, Ding, Hua et Wong, 2014). Ces types de modèles ont aussi été proposés pour prédire le design des tissus chauffants en fonction des performances recherchées. Afin d'exprimer la relation entre divers paramètres d'un tissu chauffant, une équation fut proposée en se basant sur la résistance du tissu, la puissance de la chaleur dégagée, la tension du courant continu, le nombre de fils conducteurs en parallèle, la longueur du fil conducteur unique, la résistivité du fil conducteur et la superficie de la section transversale du fil conducteur. Les expériences de validation à l'aide de l'intégration de filaments d'argent et de fils enduits d'argent dans des tissus identiques en coton a permis de conclure que les fils ou filaments conducteurs doivent être répartis uniformément afin d'éviter une surchauffe sur certaines parties du tissu chauffant (Hao *et al.*, 2012). Selon les observations effectuées, les fils enduits d'argent ne conviendraient pas à la conception de tissu chauffant en raison de leur mauvaise stabilité thermique. De plus, les filaments en argent seraient un meilleur choix par rapport aux fils en acier dans de telles structures et procédés de fabrication afin d'éviter la rupture des fils conducteurs (Hao *et al.*, 2012).

Selon certains modèles évoqués, la connaissance de la résistance électrique d'un tissu conducteur peut grandement contribuer à prédire son comportement électrothermique (Hao *et al.*, 2012 ; Tong, J.-h. *et al.*, 2015). De ce fait, des modèles théoriques suggérés par certains experts pour la prédiction de la résistance globale d'un tricot conducteur peuvent être pris en compte. Des travaux comme la modélisation de la résistance de tricot conducteurs à partir de la résistance liée à la longueur et la résistance de point de contact associé à l'analyse du comportement électromécanique (figure 12 a). d'un tel tricot (Li, L. *et al.*, 2012), la modélisation du réseau résistif pour des points de maille de tricot conducteur (Li, L. *et al.*, 2010) et l'estimation de la résistance de tricot conducteurs d'une vue macroscopique en considérant la résistance surfacique des fils conducteurs (Li, L. *et al.*, 2011), peuvent être considérés dans une première démarche de design d'un tricot chauffant.

Figure 12. Étude du comportement des textiles conducteurs à utiliser dans la conception d'actuateur chauffant : (a) comportement électromécanique des tricots conducteurs pour différents nombres de colonnes et de longueurs de tricot (Li, L. *et al.*, 2012), (b) réseau résistif du modèle équivalent d'un tissu conducteur (Zhao, Y., Tong, Yang, Chan et Li, 2016).



Dans le même registre, un modèle de simulation dérivé a été élaboré pour calculer la résistance électrique d'un tissu conducteur en considérant sa structure, ainsi que la densité et la disposition des fils conducteurs intégrés (figure 12 b). Une fois le rayon du fil de chaîne et la résistance d'une unité de fil conducteur connus, la résistance électrique du tissu conducteur pouvait être calculée. En validant le modèle à l'aide de l'intégration d'un fil de nylon enduit d'argent dans trois structures tissées de densité de trame différente et de densité de chaîne constante, l'étude a démontré que pour la même taille de tissu, la résistance électrique peut être contrôlée par la maîtrise de la structure du tissu et la disposition de fils conducteurs (Zhao, Y. *et al.*, 2016).

Pour faciliter la conception d'un élément chauffant sur un textile avec un design versatile et s'affranchir des défis techniques relatifs à l'intégration d'un fil conducteur dans une structure textile, des techniques de revêtement ont été déployées afin de former des zones conductrices et chauffantes à la surface des substrats textiles. Le dépôt d'une encre conductrice à base de particule d'argent sur la surface d'un tissu polyester/coton a permis d'obtenir un élément chauffant qui fournissait une température maximale de 33 °C avec des puissances d'alimentation aussi faibles que 1,4 watt et un temps d'environ 10 s pour atteindre la température de chauffage à l'équilibre (Ahmed, Wei, Torah et Tudor, 2016). Dans un travail similaire, le dépôt d'une dispersion contenant des nano filaments d'argent sur un tissu en coton a permis de créer une zone chauffante qui pouvait fournir une chaleur de 50 °C sous une densité de puissance appliquée aussi basse que 0,05 W/cm². Malgré de telles performances, en raison d'une stabilité environnementale relativement faible des nano filaments d'argent, la performance des tissus chauffants développés a été grandement diminuée après deux mois d'entreposage dans des conditions ambiantes. Par ailleurs, la couche conductrice formée a été endommagée au lavage et sa performance thermique a considérablement diminué (Doganay, Coskun, Genlik et Unalan, 2016). Afin de profiter des avantages de l'utilisation de nano filaments d'argent dans la conception d'un élément chauffant, des techniques comme celle proposée pour la fabrication de membranes chauffantes à base de carbure de nanosilicium et de polyuréthane thermoplastique recouvrant les filaments d'argent (Hao *et al.*, 2015), sont à envisager. Bien que ces types de membranes puissent offrir une bonne stabilité thermique et de meilleures propriétés mécaniques, leur intégration aux structures textiles reste à explorer.

La formation de couches conductrices polymériques sur les substrats textiles a aussi été explorée pour concevoir des textiles chauffants électriques. La polymérisation *in situ* de poly (3,4-éthylène dioxythiophène) p-toluène sulfonique acide (PEDOT : PTSA) sur un voile en polyester par enduction a permis le développement d'un textile chauffant très flexible et léger, avec un potentiel de chauffage durable et élevé qui nécessitait tout de même de fortes tensions d'alimentation (Opwis, Knittel et Gutmann, 2012). Le dépôt d'un revêtement de polypyrrole sur un tricot à base de nylon a aussi été utilisé pour créer un élément chauffant textile. Cependant, des tensions électriques aussi élevées que 18 volts ont été nécessaires pour générer des températures supérieures à 45 °C. Par ailleurs, la température fournie semble être altérée lors de l'élongation du tissu (Hamdani, S. T. A., Fernando, Hussain, *et al.*, 2016). La polymérisation en phase vapeur de poly (3,4-éthylène dioxythiophène) sur un tissu en coton a permis de mettre au point un élément chauffant pouvant atteindre respectivement 28 et 45 °C avec des tensions de 4,5 et 6 volts. À l'aide d'un post-traitement en phase vapeur pour le dépôt d'une couche protectrice contre l'humidité, une meilleure protection de l'élément chauffant polymérique contre l'abrasion et les déformations mécaniques a pu être obtenue. Les analyses ont pu aussi démontrer que la découpe, la couture et le tissage partiel ne semblaient pas altérer la conductivité électrique et les réponses électrothermiques de la couche chauffante (Zhang, L., Baima et Andrew, 2017). Bien que ces derniers résultats soient intéressants, en raison des défis techniques et du coût élevé de la mise à l'échelle des techniques de

revêtement en phase vapeur pour satisfaire la demande à volume élevé de l'industrie textile, il est difficile d'envisager dans un futur proche des procédés de dépôt en phase vapeur pour créer des composants électroniques à base de textile (Andrew *et al.*, 2018).

En raison d'un bon rendement thermique et la capacité de génération rapide d'une chaleur uniforme, les fibres de carbone sont des candidats très intéressants dans la conception des textiles chauffants électriques. Permettant un taux de conversion de l'électricité très élevé, les fibres de carbone peuvent favoriser la conception d'éléments chauffants avec des températures de surfaces versatiles, selon le design désiré, tout en assurant une durée de vie moyenne pouvant aller jusqu'à 100 000 h (Wang, F., Gao, Kuklane, *et al.*, 2010). Le développement d'un élément chauffant sous forme de couche composite à base de fibre de carbone recyclé dans une résine de polyuréthane produisant des chaleurs allant de 26 à 96 °C (Pang, Pickering, Chan et Wong, 2013), la mise au point d'un dispositif intégré d'antigivrage/dégivrage avec l'intégration d'un stratifié composite de fibre de carbone dans une structure multicouche nécessitant des courants électriques de 2 à 4 ampères pour fournir les densités de puissance électrique souhaitées (Falzon, Robinson, Frenz et Gilbert, 2015) et l'évaluation d'une couverture chauffante électrique à base de fibre de carbone pour réchauffer les patients lors de chirurgies abdominales, démontrant des performances équivalentes à celles des technologies chauffantes à air chaud pulsé et supérieures à celle des matelas à circulation d'eau chaude lors des tests effectués dans le milieu hospitalier (Hasegawa, Negishi, Nakagawa et Ozaki, 2012), sont des exemples de travaux dans ce cadre.

L'analyse de différentes méthodes de l'application de fibre de carbone dans la conception d'un vêtement chauffant électrique a pu montrer que l'utilisation de fibres de carbone peut mener à une augmentation rapide de la température, ainsi qu'à une vitesse de récupération élevée lors de la déconnexion de l'alimentation, de sorte qu'un tel élément chauffant présente les caractéristiques nécessaires pour la mise en place d'un contrôle précis de la température. En outre, la prise en considération des principes de dissipation thermique du corps humain et de celle de la surface de l'habit dans le design du vêtement, ainsi qu'une conception de l'élément chauffant de type sandwich pour favoriser un meilleur apport thermique, ont été préconisées à partir des résultats obtenus (Yang, H., 2017). Malgré les avantages d'un élément chauffant à base de fibre de carbone, son intégration dans les vêtements demande encore des travaux d'optimisation en matière de résistance au lavage (Yang, H., 2017) et de consommation énergétique (Falzon *et al.*, 2015 ; Pang *et al.*, 2013 ; Wang, F. et Lee, 2009 ; Yang, H., 2017).

Quelques études ont aussi été consacrées à l'évaluation de la performance des vêtements chauffants électriques intégrant des éléments chauffants à base de fibre de carbone. L'évaluation d'un gilet chauffant électrique comprenant un élément chauffant à base de fibre de carbone sur un mannequin thermique dans une chambre climatique froide a démontré que l'application de températures trop élevées peut mener à une réduction de l'efficacité de chauffage en raison d'une perte importante de chaleur vers l'environnement, démontrant ainsi que la puissance de chauffage est à ajuster selon la

température externe (Wang, F. et Lee, 2009). L'influence de la vitesse de l'air ambiant et l'influence de la combinaison des vêtements portés sur l'efficacité de chauffage ont aussi été étudiées en testant un gilet chauffant électrique, doté de six éléments chauffants à base de fibre de carbone, sur un mannequin thermique. L'association de la veste avec un sous-vêtement en tricot et un uniforme militaire en différents ordres a démontré que l'ordre de la combinaison des vêtements peut considérablement influencer l'efficacité de chauffage. En effet, la meilleure efficacité de chauffage a été obtenue lorsque le gilet chauffant était porté comme couche centrale au milieu des autres vêtements. Il a aussi été constaté que l'efficacité de chauffage du gilet chauffant diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air froid (Wang, F., Gao et Holmér, 2010). L'efficacité d'un vêtement chauffant électrique comprenant sept coussins chauffants à base de fils de carbone et celle d'un vêtement chauffant contenant 14 pochettes de PCM ont été comparées dans des conditions identiques en utilisant un mannequin thermique fonctionnant en mode de contrôle du modèle thermorégulateur. Selon les analyses effectuées, le vêtement chauffant électrique peut montrer une puissance de chauffage plus efficace, ainsi qu'une isolation thermique totale significativement plus élevée par rapport au PCM dans de faibles vitesses de circulation de l'air, alors qu'aucune différence significative n'a été observée à une vitesse élevée de circulation de l'air (Song *et al.*, 2015).

En parallèle des nombreuses études dédiées à l'élaboration d'éléments chauffants électriques en textile, quelques travaux ont également été consacrés à l'évaluation de l'efficacité des vêtements chauffants électriques. L'évaluation d'un sac de couchage chauffant incorporant des tissus chauffants dans la région des pieds sur un mannequin thermique et, par la suite, sur 8 sujets humains dans les conditions contrôlées d'une chambre climatique, a pu mettre en évidence la capacité d'un tel concept à garder au chaud les pieds et les orteils tout au long de la période des essais (Zhang, C., Lai, Lu, Wang et Kuklane, 2015). Les conditions d'opérations optimales d'un gant chauffant possédant des éléments chauffants fixés à l'arrière de la couche adjacente aux doigts ont été déterminées en effectuant des tests dans des conditions contrôlées de laboratoire. Pour cela, l'étude a tenté d'identifier la puissance de chauffage nécessaire afin de maintenir la température des doigts supérieure à 15,6 °C, qui est connue comme étant la norme minimale de conception ergonomique pour les combinaisons spatiales (Tian, Y., Li et Liu, 2014). Dans un travail similaire, l'évaluation des performances d'un gant chauffant électrique sur un modèle de main thermique a permis d'identifier la puissance électrique nécessaire pour maintenir en thermo neutralité la température cutanée de la main, lors de l'exposition au froid extrême. Selon les observations, 3 watts supplémentaires étaient nécessaires pour préserver le confort thermique d'une main dans un vent modéré par rapport à une circulation d'air calme à -10 °C. Cette étude a par ailleurs conclu que la dextérité des doigts pourrait aussi dépendre de la structure de l'élément chauffant et de sa flexibilité, de même que la configuration du gant et son design au bout des doigts (Jussila, Kirsi *et al.*, 2017). Une autre étude a évalué la contribution d'un gilet chauffant électrique à l'échauffement et à l'amélioration des performances des nageurs d'élite en sprint. L'imagerie thermique cutanée et les mesures de la température tympanique, de la FC, du confort thermique et de la sensation thermique des participants masculins portant

un gilet chauffant après une séance de natation ont prouvé un réel effet bénéfique d'échauffement par rapport à un groupe de participants ne portant pas de gilet chauffant. Par contre, aucun effet significatif n'a été observé chez les nageuses testées, suggérant une différence de perception de confort avec des liens possibles avec le ressenti de l'inconfort selon le sexe des athlètes (Wilkins et Havenith, 2017).

Afin d'offrir plus de confort et d'aisance dans l'exécution des tâches lors des activités dans le froid, des vêtements permettant le contrôle ou l'autorégulation de la température ont aussi été étudiés. Dans ce cadre, une veste ayant la capacité de contrôler la température a été mise au point en associant des panneaux chauffants à base de fils d'acier, de plusieurs configurations d'une à quatre couches, à un capteur de température digital et à un microcontrôleur. Ces composants, portés sur un support, furent par la suite attachés à l'aide de bandes Velcro sous un vêtement multicouche en coton/polyester/polyamide. Une interface d'utilisateur sur un appareil portable externe a également été utilisée pour contrôler et afficher la température. Dans un mode d'autorégulation de la température, le circuit de chauffage était activé par le microcontrôleur si la valeur mesurée par le capteur de température tombait en-dessous d'une valeur préétablie (Kayacan, Ozan, Bulgun et Sahin, 2009). L'évaluation de ce vêtement sur un mannequin thermique en cuivre dans une chambre climatique froide a pu démontrer que la température maximale de chauffage dépendait du nombre de plis des panneaux. Selon ces analyses, les éléments chauffants à une seule couche pouvaient fonctionner plus longtemps, tandis que la période d'alimentation devenait plus courte pour un nombre élevé de panneaux en raison du manque d'alimentation énergétique. En comparant divers types de batteries de capacité identique, les auteurs ont aussi conclu que les batteries nickel-hydrure métalliques seraient plus appropriées pour les environnements froids avec un effet de chauffage instantané, alors que pour des circonstances nécessitant une continuité, les batteries lithium-ion, assurant un chauffage stable, seraient plus avantageuses (Kayacan, Ozan *et al.*, 2009). L'efficacité d'un gant comprenant un élément chauffant électrique et un régulateur de température mesurant la T_s des doigts fut examinée en enregistrant la sensation thermique des sujets humains portant ce type de gants dans une chambre climatique. Les résultats ont démontré qu'un tel gant maintiendrait la température du dos de la main et des doigts dans une zone de confort. Les tests ont démontré qu'en plus d'une sensation thermique et un confort améliorés au niveau des doigts, la sensation thermique et le confort pour tout le corps augmentaient légèrement avec l'utilisation de gants chauffants électriques dans le froid (Lu, Yehu, Xu et Ma, 2017).

En appliquant une méthode de commutation d'alimentation basée sur l'auto surveillance de la température de l'élément chauffant, un textile chauffant avec la capacité d'atteindre rapidement divers niveaux de température, possédant une bande de distribution de température uniforme et assurant le maintien de la température définie, fut mis au point. Pour réaliser un tel concept, des filaments de polyuréthane revêtus de cuivre ont été brodés sur un tissu en coton afin de concevoir l'élément chauffant et un capteur de température de type RTD. Pour assurer l'autorégulation de la température, un système de contrôle marche-arrêt référençant la température en temps réel a été utilisé afin de

maintenir la température cible dans le circuit brodé, indépendamment du microclimat interne et des conditions climatiques externes, ainsi que du niveau de la tension de la batterie (Roh et Kim, 2016). En outre, une étude analytique a procédé à la caractérisation expérimentale des paramètres de conception d'un vêtement chauffant autorégulateur (Dupler *et al.*, 2019). Pour cela, un actuateur chauffant basé sur la couture en forme de serpent de filaments enduits d'argent a été intégré dans un vêtement à trois couches comprenant l'élément chauffant formée sur la couche de base en tricot, une couche de film d'aluminium au centre pour améliorer la rétention de chaleur et une couche de couverture textile à l'extérieur. Afin d'étudier le système de contrôle de la température, le vêtement fut élaboré selon trois versions : 1) aucun circuit de commande, 2) le vêtement autorégulateur avec la rétroaction de la T_s en boucle fermée utilisant des thermistances placées à divers endroits sur la peau et un système de contrôle basé sur un microcontrôleur, 3) le vêtement autorégulateur, mais contrôlable par l'utilisateur avec la maîtrise de la rétroaction des thermistances afin de maintenir la température interne du vêtement à un niveau voulu et l'utilisation d'un potentiomètre supplémentaire pour permettre à l'utilisateur de contrôler la valeur de consigne de chaque actuateur. Selon les analyses de cette étude, une autorégulation totale de la température pourrait être inadéquate dans des environnements thermiques complexes, indiquant ainsi la nécessité de la prise en considération des effets thermiques ambiants et corporels dans la gestion thermique du système autorégulateur de température. En mettant le contrôle du système entre les mains du porteur, le vêtement autorégulant pourrait surmonter une partie des défis liés aux environnements complexes, en se fiant à la sensation thermique du porteur (Dupler *et al.*, 2019).

Quelques études se sont également intéressées à l'association d'éléments chauffants électriques et de matériaux fonctionnels chauffants pour assurer une meilleure efficacité de consommation énergétique. Dans une de ces études, l'influence de l'utilisation de matériaux à changement de phase sur la consommation d'énergie des vêtements chauffants électriques a été étudiée (Wang, S., Li, Hu, Tokura et Song, 2006). Pour cela, plusieurs configurations du même vêtement furent élaborées en associant, ou pas, un élément chauffant électrique à une couche enduite de PCM. Les tests effectués sur les différentes versions du vêtement, en utilisant un modèle de peau bionique à 33 °C dans une chambre climatique à -15 °C, ont pu démontrer que l'association d'un élément chauffant électrique avec une couche contenant du PCM peut considérablement optimiser la distribution de la chaleur dans le vêtement et ainsi améliorer les performances de protection thermique de l'habit. De plus, l'enduit de PCM, ayant un point de fusion à 27 °C, a permis de mettre en place un mécanisme autorégulateur de température selon lequel, lorsque la température produite par cette couche tombait en dessous de 27 °C, le tissu conducteur était automatiquement mis sous tension et, inversement, quand la température dépassait les 29 °C, le tissu conducteur était éteint. Une telle configuration hybride a par ailleurs permis d'économiser environ 30 % d'énergie avec le processus de contrôle de la température (Wang, S. *et al.*, 2006).

En utilisant des fibres textiles, telles que le coton, le polyester ou l'acrylique, contenant des métaux ou des composés céramiques (ex., des dérivés du platine, de l'alumine ou de la silice), des tissus ayant la capacité d'absorber, de réfléchir et d'émettre des ondes d'infrarouges lointains ont été développés. En utilisant un tel potentiel, des éléments chauffants ont été proposés pour les vêtements protecteurs contre le froid durant les dernières années (Hu, J. et Murugesh babu, 2009). Des fabricants de certains produits commerciaux affirment que leur technologie peut capter les radiations thermiques émises par la chaleur corporelle, puis, en réagissant comme un miroir réactif, ces produits utilisent des rayons infrarouges lointains thermiques pour renvoyer de l'énergie vers le corps (McCann, 2013). Bien que l'analyse de l'intégration de panneaux chauffants réactifs aux ondes infrarouges lointaines ait montré un effet de chaleur local, sans être suffisant pour augmenter la température des doigts et des orteils lors des activités physiques dans le froid, leur association avec des éléments chauffants électriques pourrait tout de même contribuer à une optimisation de la consommation énergétique dans des vêtements chauffants électriques (Jussila, Kirsi, Rissanen, Rintamäki et Hyvärinen, 2013). En outre, une étude très récente a proposé une exploitation dynamique du rayonnement infrarouge dans les structures textiles afin de créer des effets thermiques adaptatifs à l'environnement. Ainsi, un textile avec des propriétés optiques dynamiquement adaptatives, permettant de réguler les rayonnements thermiques, a été conçu avec une structure composée de fibres bimorphes de forme elliptique de tri acétate et cellulose. Les fibres fusionnées côte à côte ont été tricotées et par la suite recouvertes avec des nanotubes de carbone multi parois. Le fait d'agencer le spectre électromagnétique et la propagation des ondes du rayonnement thermique à l'aide du contrôle des interactions électromagnétiques (dépendantes de la distance) entre les éléments conducteurs à des échelles inférieures ou égales à la longueur d'onde souhaitée a permis de procurer une ouverture adaptative du rayonnement IR dans le textile, en fonction de la réponse thermique du corps contre le froid, ou dans le chaud avec un effet physique inverse (Zhang, X. A. *et al.*, 2019). Selon les auteurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser l'effet de déclenchement observé et répondre aux préoccupations en matière de coût et de validation avec des sujets humains.

Il convient de noter que la maturité technologique des systèmes dans les études concernant les actuateurs chauffants à utiliser dans la gestion thermique intelligente se situe majoritairement à un niveau TRL de 3 (critique analytique, validation du concept) ou de 4 (validation de concept ou de modèle en laboratoire). Quelques-uns des travaux sur la conception d'actuateurs chauffants à l'aide des revêtements à base de particules d'argent ou à base de fils textiles métalliques peuvent même être placés à un niveau TRL situé entre 2 et 3. Seule une étude sur un dispositif basé sur une technologie à base de fibre de carbone atteint un niveau TRL de 7 (démonstration dans un environnement opérationnel).

4.3.2 Actuateur chauffant : produits commerciaux

L'étude des produits commerciaux pour les actuateurs chauffants s'est orientée essentiellement vers les produits chauffants électriques permettant d'assurer un chauffage soutenu. Par ailleurs, peu ou pas de produits ont été identifiés dans les trois autres catégories de vêtements chauffants, c.-à-d. ceux à base de flux de fluide, de matériau à changement de phase, ou les vêtements chauffants chimiques. Comme pour les produits commerciaux présentés jusqu'à présent, des tableaux détaillés contenant de l'information technique ont été réalisés et sont disponibles à l'IRSST sous forme de documents additionnels au présent rapport. À des fins de simplification, la présentation des produits commerciaux se concentrera sur les principes technologiques et les types de produits, et décrira les fonctionnalités générales offertes par les produits sur le marché. Les vêtements chauffants électriques disponibles dans le commerce utilisent différentes technologies. Cinq types de technologie ont été définis dans cette étude pour classer les entreprises et/ou les produits, sur la base de la revue de la littérature scientifique et des informations trouvées sur les sites Web de ces entreprises de produits chauffants. Les cinq types de technologies, dont certains exemples sont présentés à la figure 13, sont : éléments chauffants conducteurs, fils chauffants électriques, chauffage basé sur la fibre de carbone, chauffage basé sur une couche de graphène, et la technologie à base de couche conductrice avec un coefficient de température positif (PTC). Certains types de technologie comme les éléments chauffants conducteurs ont été définis volontairement comme étant assez génériques, car il est souvent très difficile de savoir en quoi consiste exactement la technologie de plusieurs produits dans le commerce, l'information disponible sur les sites Web étant souvent peu détaillée, parfois insuffisante ou portant à confusion. Une sixième technologie a été ajoutée, mais ne contient qu'un seul produit, distinct des autres. Il s'agit d'un masque facial qui réchauffe et humidifie l'air inhalé, développé d'abord pour les personnes asthmatiques ou ayant une maladie respiratoire (ColdAvenger). Le tableau 2 présente le nombre d'entreprises répertoriées pour les différentes technologies de chauffage et les types de produits qu'elles offrent.

Tableau 2. Nombre d'entreprises répertoriées concernant les actuateurs chauffants électriques à utiliser dans la gestion thermique intelligente

Type de produit	Vêtement chauffant (manteau, gilet, chandail, pantalons, gants, écharpe, tuque, chaussettes)			Semelles chauffantes (et chaussettes)	E-Textile	Masque	Total
Technologie	Manufacturier ⁽¹⁾	Marque vendue sur plateforme en ligne ⁽²⁾	Vêtement intelligent ⁽³⁾				
Éléments chauffants conducteurs	8	3	3	2	3		19
Fils chauffants électriques	8	1		1	3		13
Chauffage basé sur la fibre de carbone	20	9					29
Technologie du graphène	2	1					3
Technologie PTC			1		2		3
Chauffage de l'air inspiré						1	1
Total	38	14	4	3	8	1	68
	56						

Note 1 : entreprise manufacturière (ayant un site Web).

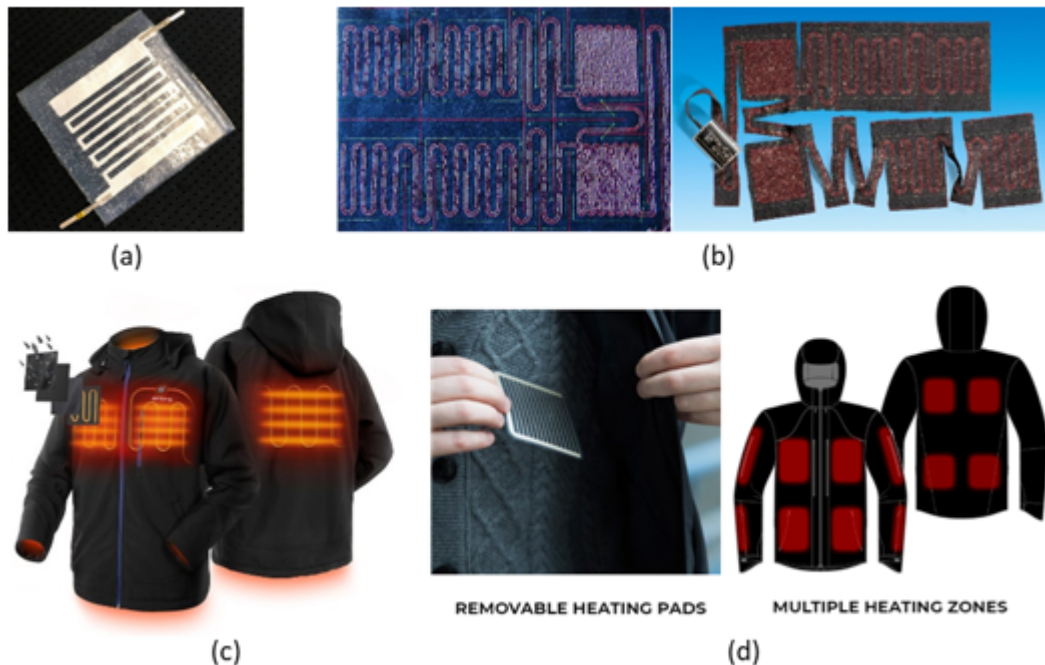
Note 2 : marque vendue exclusivement sur plateforme en ligne (ex., Amazon) et dont le manufacturier n'a pas de site Web.

Note 3 : vêtement chauffant intelligent offrant une autorégulation de la température.

Dix-neuf des entreprises identifiées ont été classées sous la catégorie générique d'éléments chauffants conducteurs, car elles fournissent très peu de détails sur la technologie chauffante utilisée dans leurs produits dans les sites Web ou les fiches techniques. Cependant, des images, des vidéos et des entrevues promotionnelles de ces sociétés laissent suggérer que, par exemple, les éléments chauffants utilisés par certaines entreprises sont basés sur des textiles conducteurs (Makita, Zanier, Soleno Textile), des élastomères conducteurs laminés sur du textile (New Textile Technologies – NTT (figure 13 a), Loomia), des éléments chauffants imprimés (Digitsole, offrant des semelles chauffantes, Conductive Transfers), ou des éléments chauffants tricotés à même le vêtement (Odlo, Myant & Helly Hansen). Parmi les 13 entreprises répertoriées qui utilisent des fils chauffants électriques, Interactive-wear produit des textiles chauffants (figure 13 b) fabriqués avec des fils de Litz brodés à une seule couche, répondant aux normes de qualité automobile afin de minimiser le risque de points chauds. L'entreprise *Volt Smart Yarns* fabrique des vêtements et des textiles chauffants en utilisant différents types de fils (acier inoxydable, cuivre, nickel, etc.). Les autres entreprises de cette catégorie produisent des vêtements chauffants, mais il est souvent difficile d'avoir le détail de la technologie de fils chauffants. Par exemple, *Gyde Wearable Technology* annonce que ses vêtements contiennent des zones de chauffage par microfils, mais sans plus de détail. L'entreprise Gerbing vend un manteau muni d'une puissance calorifique de 77 watts, ce qui en fait le produit le plus chaud que Gerbing a à offrir. Le manteau contient plus de 30 mètres de fil chauffant MicrowirePRO® dans sept zones de chauffage différentes (devant, dos, col, manches) pour un chauffage complet du corps. Il dispose également de trois prises pouvant alimenter des gants chauffants (à des températures différentes du reste du manteau), des pantalons et des chaussettes.

Vingt-neuf des entreprises répertoriées utilisent un système de chauffage basé sur les fibres de carbone pour offrir des vêtements chauffants, tels que des manteaux, des vestes et des gilets, mais aussi des bonnets, des chaussettes et des gants. Duran, une entreprise chinoise, prétend être la première société à avoir développé et commercialisé des fils chauffants en fibre de carbone, et la seule capable de contrôler avec précision, lors de la production, la résistance des fibres à $\pm 5\%$ (par mètre). Selon son site Web, Duran possède 14 brevets internationaux et 18 brevets nationaux pour les produits de chauffage électrique. De manière générale, un élément chauffant fabriqué à partir de fibres de carbone permet d'atteindre rapidement la température souhaitée, en quelques secondes seulement. Il peut même posséder une longue durée de vie, pouvant atteindre plus de 1000 heures de travail, comme pour le gilet chauffant de l'entreprise Arris, avec une température constante de 40 à 80 °C. Les informations fournies sur les sites Web des manufacturiers montrent, par exemple, que Verseo utilise des fibres de carbone extensibles et très minces, que Heated Gear et EGEVogue utilisent, en plus des éléments chauffants en fibres de carbone, une doublure thermique en polyester enduite d'argent pour réfléchir la chaleur et bénéficier d'un système hybride, que Colcham offre un système de chauffage sécuritaire en assurant une protection contre les courts-circuits, et que Octocool prétend utiliser plus de fibres de carbone (60 à 80 % de plus) dans leur manteau chauffant que les autres marques concurrentes. Vinmori, une entreprise chinoise, indique sur son site Web qu'elle utilise la fibre de carbone Toray du Japon pour améliorer la longueur d'onde d'émission du panneau chauffant, afin d'atteindre des valeurs de 3 à 14 μm , la plupart des longueurs d'onde de chauffage étant comprises entre 2 et 10 μm et pouvant provoquer une plus grande dissipation de la chaleur. Cette entreprise utilise également un système de contrôle de la température qui garantit que le panneau chauffant peut rapidement atteindre sa température la plus élevée de chauffage en 3 minutes. De plus, un capteur de température à thermistance de type NTC intégré peut détecter automatiquement la température du panneau toutes les 0,3 secondes. Ainsi, le panneau chauffant peut fonctionner à la température spécifiée, avec une précision de 0,3 °C peu importe la température ambiante externe, et éviter une température excessive pouvant exposer le corps à des risques de brûlures. Afin d'assurer un circuit plus ferme et plus sûr, l'utilisation de fibres de carbone enveloppées par un film de polyester a été envisagée. De plus, pour assurer les connexions électriques dans ses produits, l'entreprise a privilégié l'utilisation de fils conducteurs comportant un élastomère thermoplastique résistant aux basses températures, afin de maintenir la résistance mécanique du fil et éviter sa rupture même à -40 °C.

Figure 13. Exemples d'actuateurs chauffants disponibles dans le commerce :
 (a) éléments chauffants conducteurs SensElast® (par New Textile Technologies – NTT, Balingen, Allemagne), (b) fils chauffants électriques Flex-L (par Interactive-wear, Starnberg, Allemagne), (c) manteau chauffant « Classic heated jacket » basé sur les fibres de carbone (par ORORO, Las Vegas, NV, É.-U.), (d) manteau chauffant « Smart Heating Jacket » basé sur la technologie PTC à base de carbone conducteur (par Kinesix Sports, Montréal, QC, Canada).



Par ailleurs, trois des entreprises répertoriées utilisent une technologie chauffante à base de couches de graphène (Firefox Heated Coats, AGPTek, Vulpés). Selon les informations disponibles, cette technologie permet des produits qui sont légers, résistants (à la traction, à la flexion, au frottement, au froid, au lavage), durables et offrant un bon rendement thermique. Les éléments en graphène, en plus de permettre une répartition égale et efficace de la chaleur, peuvent être utilisés en toute sécurité dans diverses conditions de température, d'humidité, ou d'exposition à l'eau et sous des contraintes mécaniques élevées. Deux entreprises répertoriées, Nuova Heat et Nissha GSI Technologies, fabriquent des textiles électroniques basés sur la technologie PTC pour des applications dans le domaine médical ou industriel, tels que l'aérospatial, l'automobile, le militaire, les biens de consommation, etc. La technologie PTC thermorégulatrice se base sur une couche de résine dilatante à température élevée et chargée de particules conductrices (souvent le carbone). Un tel film est capable de contrôler la température elle-même en régulant la puissance de chauffage à l'aide de sa réponse en matière de résistance électrique à la température qui varie avec la dilatation de la résine provoquant la hausse de la distance entre les particules conductrices. À basse température, sa résistance est

plus faible, donc sa puissance de chauffage est plus grande, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température. Avec une hausse de la température, sa résistance augmente, ce qui entraîne une diminution de sa puissance de chauffage pour ainsi contrôler la température (Okutani, Yokota, Matsukawa et Someya, 2020). Une fois déposée sur une structure en textile, la couche PTC permet de chauffer uniformément sur toute la surface du textile et s'autorégule à une température spécifique, ce qui réduit la possibilité de surchauffe du vêtement. Selon les manufacturiers, les produits utilisant la technologie PTC ont le potentiel d'être plus sécuritaires et même plus efficaces comparativement à ceux utilisant les technologies plus traditionnelles de fil ou de fibre de carbone. Les éléments chauffants PTC de Nuova Heat, une entreprise des États-Unis, sont fabriqués en imprimant une encre conductrice sur un tissu de nylon contenant des traces d'argent comme électrodes et ces éléments peuvent atteindre 55 °C en quelques secondes avec le passage d'un courant continu de 9 V. Une seule entreprise répertoriée utilise une technologie basée sur une couche PTC à base de carbone conducteur. Il s'agit de Kinesix Sports dont le produit (figure 13 d), permettant une autorégulation de la température de chauffage, est décrit en détail plus loin. Cette entreprise utilise des coussins chauffants flexibles et légers fabriqués à partir d'encre de carbone de type PTC encapsulée entre deux couches extra fines de polyester.

De manière générale, une cinquantaine d'entreprises offrent des vêtements et des accessoires qui comprennent des technologies chauffantes, intégrées la plupart du temps dans des manteaux et des gilets (sans manches), mais aussi dans des pantalons, des combinaisons de corps, des gants, des chaussettes, des écharpes et des bonnets. Bien que 14 de ces entreprises n'ont été trouvées que sur des plateformes de vente en ligne comme Amazon, la plupart ont un site Web dans lequel ils présentent leurs produits et leur fonctionnalité et, parfois, expliquent la technologie utilisée. Pour les manteaux et les gilets spécifiquement, les deux tiers des produits répertoriés présentent trois zones de chauffage, dont deux situées à la poitrine et une dans le haut du dos. En plus de ces trois zones, plusieurs produits offrent également des zones de chauffage sur le col pour réchauffer le cou, sur les poches pour réchauffer les mains, sur le bas du dos et, pour quelques produits seulement, sur les côtés du corps ou sur les bras. La majorité des vêtements chauffants, comme les manteaux et les gilets, utilise une batterie au lithium-ion (4 V, 5 V, 7,4 V et 12 V) permettant aux éléments chauffants de fournir une chaleur plus élevée que la température du corps. De plus, plusieurs des manteaux et gilets offerts dans le commerce sont munis de port USB permettant d'utiliser la batterie pour recharger des appareils mobiles. Les deux tiers des manteaux et gilets permettent trois réglages de la température, pouvant être, par exemple, 25 °C/35 °C/45 °C pour certains produits, ou encore 45 °C/55 °C/65 °C pour d'autres. Ces niveaux de réglage fournissent de la chaleur en continu pour des périodes pouvant être, par exemple, autour de 15 h, 7 h, 5 h pour certains produits, ou encore 4,5 h, 3 h, 2 h pour d'autres produits, selon la température fournie et la puissance disponible. Habituellement, un interrupteur de commande à DEL est intégré dans la zone poitrine du vêtement pour permettre à l'utilisateur d'ajuster et d'interpréter les réglages de chaleur. Dans les systèmes autorisant un contrôle de température sans fil, souvent la technologie Bluetooth permet à l'utilisateur de modifier

l'intensité de la chaleur. Les manteaux peuvent coûter entre 80 et 500 USD environ. La majorité des produits disponibles dans le commerce peuvent être lavés selon les instructions du fabricant. Ils visent majoritairement les marchés du sport, des loisirs, ou génériques. Quelques vêtements et gilets sortent du lot par des fonctionnalités ou des performances particulières. Par exemple, des entreprises offrent des chandails, des manteaux ou des gilets chauffants munis de prise permettant d'utiliser la même source d'énergie pour brancher des gants chauffants (*Warm & Safe Heated Gear, California Heat, Gerbing*), des pantalons chauffants ou des chaussettes chauffantes (*California Heat, Gerbing*). D'autres entreprises offrent des zones de chauffage indépendantes, afin d'ajuster séparément la température de certaines zones, comme le devant, le dos et les mains (via les poches du vêtement) (*Arris*), le devant et le dos (*Vinmori*), ou encore le corps et les mains (*Ptahdus*). Certaines entreprises offrent des ajustements en continu de la température de chauffage, à l'aide d'un interrupteur variable (*Warm & Safe Heated Gear*), ou encore d'une application sur téléphone intelligent (*Odlo, Clim8, Vulpés*).

Par ailleurs, la présente étude a identifié trois entreprises ayant mis en place des systèmes permettant une autorégulation de la température de chauffage grâce à des capteurs thermiques intégrés qui mesurent la température à l'intérieur du vêtement ou celle de la peau. Clim8 propose un système thermique intelligent intégré dans un panneau textile, sous forme d'un chandail ajusté au corps. Ce chandail est muni de capteurs thermiques intégrés dans les fibres et contrôlés par une application sur téléphone intelligent. Une fois la température réglée par l'utilisateur, les capteurs mesurent en temps réel la température du microclimat ; le système s'active lorsque la température détectée par les capteurs est en deçà du seuil de référence et se désactive au-delà de cette température. L'application mobile de ce système permet tout de même le déclenchement et le contrôle manuel du chauffage du vêtement. L'entreprise annonce que les éléments chauffants sont positionnés sur les parties vitales du corps. Toutefois, les images et vidéos disponibles montrent que la technologie semble présente au moins sur le devant et sur le dos du chandail. D'autres entreprises comme Odlo et K2 utilisent aussi la technologie Clim8. L'entreprise Odlo a développé, avec Clim8 et Twinery, le système I-Thermic intégré dans un chandail tricoté, qui peut se porter seul ou sous un manteau. Bien que peu de détails soient fournis sur le site Web de l'entreprise Odlo, il semble que les éléments chauffants soient tricotés en forme de serpent. L'entreprise indique que, grâce à cette option de contrôle total du microenvironnement personnel, il n'est pas nécessaire de porter une couche supplémentaire sous le manteau pour pratiquer des sports d'hiver. Doté d'une batterie offrant 4 heures d'autonomie, le chandail I-Thermic d'Odlo semble sécuritaire, puisque les éléments chauffants et le logiciel sont réglés pour ne pas dépasser 37 °C et pour s'arrêter immédiatement en cas de températures plus élevées, évitant la surchauffe.

En association avec l'entreprise Helly Hansen, la compagnie ontarienne Myant a annoncé une ligne de vêtements de travail thermiques actifs qui fournissent une régulation thermique pour les environnements à basse température. Ces vêtements, qui comportent une couche de textile électronique, incluent un haut, des leggings, des chaussettes, une

cagoule et des gants. Muni d'éléments chauffants textiles et de capteurs de température intégrés, le système permet de détecter la température cutanée et celle du microclimat proche du corps pour déclencher une réaction en fournissant activement de la chaleur à travers le textile pour réguler la température. Étant conçus à partir d'une technologie de tricotage avancé, ces vêtements de travail ont un design ajusté pour mieux garder le contact des capteurs et des actuateurs avec le corps. À noter que l'entreprise Myant, selon les informations disponibles sur son site Web, semble avoir la volonté de contribuer à l'avenir du travail, grâce aux textiles intelligents, à l'intelligence artificielle et à l'internet des objets. En plus d'une plateforme permettant de mesurer les paramètres physiologiques des travailleurs avec les textiles intelligents (voir le produit Skiin dans le Tableau 6), ils souhaitent pouvoir mesurer les conditions environnementales (température, humidité, niveau de CO₂ et de méthane, niveau de bruit, etc.) d'un milieu de travail.

La compagnie montréalaise Kinesix Sports travaille pour sa part sur le développement d'un manteau chauffant intelligent (figure 13 d) muni de cinq capteurs thermiques capables de surveiller en temps réel la température à l'intérieur et à l'extérieur du manteau, et qui comprend 12 coussins chauffants fabriqués à partir d'encre de carbone de type PTC encapsulée entre deux couches de polyester. L'encre utilisée pour les coussins est spécialement conçue pour arrêter le chauffage lorsque la température maximale de 40 °C est atteinte, évitant ainsi la surchauffe. Le système basé sur une technologie appelé ThermoAdapt exploite l'intelligence artificielle, plus précisément l'apprentissage automatique de la machine, pour s'adapter et anticiper les variations de la température au fur et à mesure que le manteau est utilisé. Les coussins chauffants, alimentés par une batterie externe, sont situés dans quatre zones du manteau, indépendantes l'une de l'autre. Le système ajuste et régule constamment et indépendamment chaque zone en fonction de la température choisie par l'utilisateur. De plus, un capteur thermique situé à l'extérieur du manteau permet de capter les variations de température soudaines de l'environnement extérieur afin d'arrêter ou d'activer instantanément le système. Les quatre capteurs thermiques positionnés à l'intérieur du manteau, près de chaque zone de chauffage, aident le système à comprendre s'il est nécessaire de chauffer tout le corps ou seulement une partie spécifique du corps. Toutefois, le système permet aussi d'activer manuellement le système de chauffage, au besoin. Les coussins chauffants sont amovibles de manière à pouvoir être remplacés facilement en cas de problème.

En ce qui concerne une application en santé et en sécurité du travail, la présente étude a également identifié quelques entreprises qui offrent des produits ciblant les travailleurs de différentes industries, notamment la construction, l'industrie lourde, ou tous types de travail à l'extérieur au froid (la poste, les pistes d'aéroport, etc.). Certains proposent des vêtements pouvant se porter sous un uniforme ou sous un vêtement de travail (*Mobile Warming, Warm Fitness, Volt Smart Yarns, Technique*). D'autres offrent des manteaux, des gilets ou des chandails chauffants à haute visibilité (*Mobile Warming, Dewalt, Makita*). Finalement, cinq entreprises offrent des produits dédiés aux travailleurs : Milwaukee,

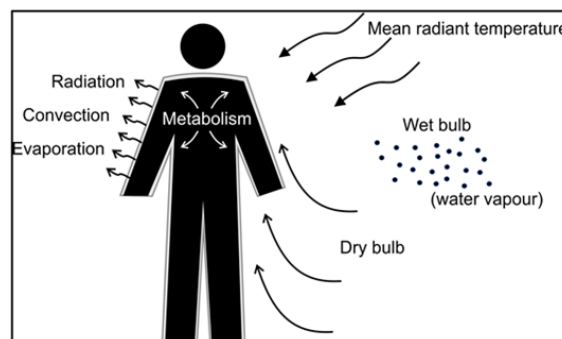
Dewalt, Bosch, Makita et Myant-Helly Hansen (dont un vêtement intelligent offrant une autorégulation de la température du corps qui a déjà été décrit plus haut). Parmi l'éventail de produits pour une utilisation dans le domaine du travail, le manteau de Makita permet un chauffage durant 28 heures, avec une batterie de 18 V.

4.4 Actuateur refroidissant

Pour que le corps humain puisse maintenir continuellement sa température interne à 37 °C, les mécanismes de production de chaleur corporelle, principalement la chaleur métabolique, doivent être égaux aux mécanismes de perte de chaleur du corps vers l'environnement qui sont réalisés par la radiation, la convection et l'évaporation (figure 14). Toutefois, l'efficacité de ces modes d'extraction de chaleur dépend fortement de la température au thermomètre à bulbe humide ou à bulbe sec, ainsi que de la température radiante moyenne de l'environnement. Dans les environnements chauds, la transpiration est le principal moyen pour le corps d'éliminer l'excès de chaleur, bien que ce mécanisme soit moins efficace lorsque l'humidité relative est très élevée. De ce fait, la ventilation, le refroidissement de l'air et l'extraction de l'humidité sont essentiels dans les habitats et les lieux de travail pour éliminer la chaleur et assurer une qualité d'air acceptable (Al Sayed *et al.*, 2016 ; Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Sarkar et Kothari, 2014).

Pourtant, les mécanismes de perte de chaleur du corps peuvent être grandement impactés par les conditions de travail. En effet, l'évaporation de la sueur étant le moyen le plus efficace pour le corps de se refroidir, elle n'est pratiquement pas possible lors du port d'équipements de protection entièrement fermés tels que les vêtements de protection contre les risques chimiques, biologiques, radiologiques ou nucléaires de type CBRN (Bach *et al.*, 2019). Par ailleurs, le poids, la rigidité et la conception multicouche de nombreux équipements de protection comme ceux des pompiers peuvent augmenter le coût énergétique associé à leur port pendant le travail (Teunissen *et al.*, 2014). La hausse de la production de chaleur métabolique et la dissipation amoindrie de la chaleur corporelle sous les couches protectrices de tels équipements peuvent mener à la diminution des performances physiques et à l'augmentation du risque de stress thermique (Yang, Yifan, 2016).

Figure 14. Représentation des mécanismes de perte de chaleur du corps (Al Sayed *et al.*, 2016).



Dans certains milieux de travail, il n'est économiquement pas viable ou pratiquement pas possible d'apporter des changements macroenvironnementaux afin de réduire la température ambiante. De tels cas incluent les environnements ouverts chauds et les grands lieux de travail tels que les déserts, les aciéries, les fonderies, les mines et les usines de métallurgie (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). En raison des exigences relatives à la conception des équipements de protection, de petites variations de propriétés thermiques apportées dans leur conception, ont peu ou pas d'effets sur l'échange thermique avec l'environnement (Sarkar et Kothari, 2014). De ce fait, des vêtements refroidissants personnels ont été proposés pour refroidir efficacement le corps sous les équipements de protection ou dans des environnements chauds (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). En se basant sur un refroidissement microclimatique axé sur la régulation de la température de la surface du corps, des vêtements refroidissants personnels ont été déployés pour favoriser l'échange thermique du corps avec l'environnement à travers le transfert de la chaleur par la conduction, la convection, le rayonnement et l'évaporation (Enescu et Virjoghe, 2014).

Les vêtements refroidissants personnels peuvent être répartis en deux grandes familles, selon leur système de refroidissement passif ou actif. Les vêtements refroidissants passifs comprennent des éléments refroidissants conducteurs, à changement de phase (PCM) et par évaporation. Les vêtements refroidissants actifs incluent des dispositifs de refroidissement thermoélectrique, par ventilation d'air et par circulation de fluide refroidissant (Al Sayed *et al.*, 2016 ; Donelan et Park, 2016). Alors que la performance des vêtements refroidissants passifs est susceptible d'être grandement affectée par les conditions environnementales, par l'activité de l'utilisateur et par la génération de chaleur corporelle qui en résulte, l'effet des vêtements refroidissants actifs est relativement stable et moins susceptible d'être affecté par les conditions environnementales (Donelan et Park, 2016). La présente étude s'est particulièrement intéressée à l'analyse des vêtements refroidissants actifs qui pourraient offrir un refroidissement soutenu, dépendamment de leurs sources d'alimentation. Pour les vêtements refroidissants passifs, l'analyse détaillée a été plutôt concentrée sur les éléments refroidissants conducteurs et par évaporation, simples et motorisés. L'intégration des éléments refroidissants à PCM dans les équipements de protection individuels ayant déjà fait l'objet d'études à l'IRSST (Marchand *et al.*, 2015), leur état de l'art largement documenté (Ramesh Babu et Arunraj, 2018 ; Salaün, 2019) démontre que leur application pour un refroidissement persistant demande d'importants efforts de recherche.

En effet, les vêtements refroidissants à PCM utilisent l'énergie de la chaleur latente pour maintenir la température du microclimat proche de la température de la peau.

Le mécanisme de refroidissement est basé sur la fusion d'une substance passant d'un état solide à un état liquide, qui permet d'absorber la chaleur corporelle transportée à la surface de la peau. Ce type de refroidissement est efficace lorsque les PCM passent de leur phase solide à liquide. Par conséquent, l'effet de refroidissement n'est efficace que dans une plage étroite de température du microclimat qui déclenche un changement de phase du matériau (Donelan et Park, 2016 ; Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014).

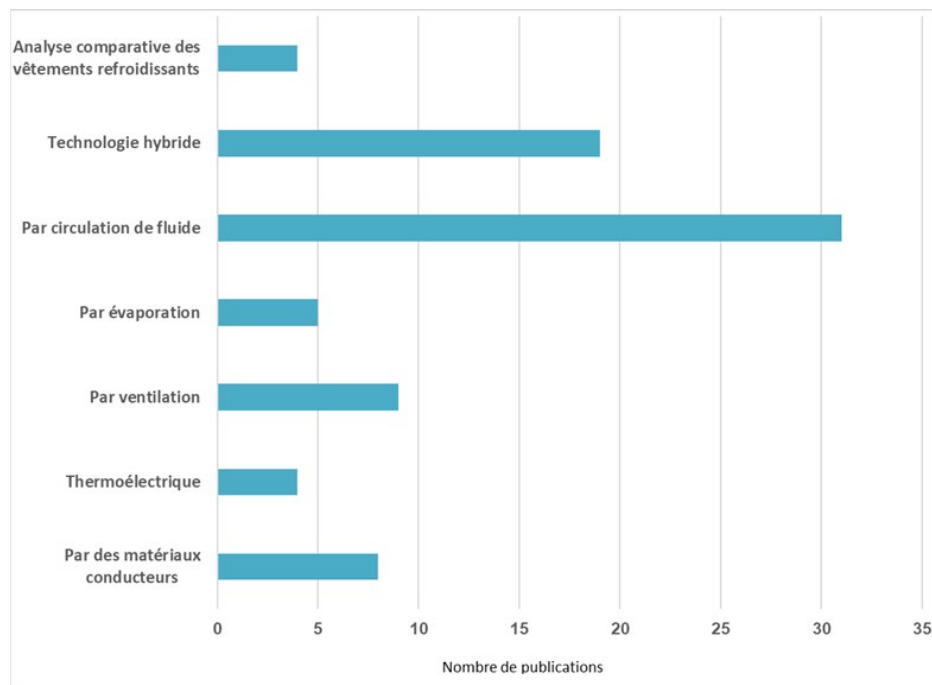
S'agissant d'un système assez simple à déployer, la couche contenant le PCM nécessite un contact direct avec la peau pour une efficacité supérieure (Donelan et Park, 2016). Comme l'efficacité des effets thermiques et leur durée dépendent principalement de la capacité de stockage de chaleur latente du PCM lui-même, la quantité de PCM utilisée est le principal facteur qui affecte l'efficacité thermique et la quantité d'énergie absorbée ou libérée au moment du changement de phase (Tyurin, Getmantseva et Andreeva, 2018). Afin d'obtenir une bonne productivité thermique, des éléments refroidissants sous forme de pochettes contenant du PCM ont été utilisés pour être intégrés dans la conception de vêtements refroidissants. Cependant, ces types de pochettes présentent certains inconvénients, comme l'obstruction à l'évacuation de la sueur ou la rigidité et le poids des pochettes, diminuant la mobilité de l'utilisateur (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). En effet, la durée conventionnelle de l'effet de refroidissement de PCM intégré dans le textile est de 15 minutes et peut monter à un maximum de 2 heures en fonction du nombre de couches, de la masse, ainsi que de la zone couverte par le matériau, mais au prix d'une augmentation significative du poids du vêtement, ce qui augmentera la dépense énergétique de l'individu (Tyurin *et al.*, 2018). Pour surmonter ces problèmes, l'application d'un PCM microencapsulé sur des fibres ou des tissus a été proposée. Cependant, avec la hausse de la quantité de microcapsules de PCM introduites dans les textiles pour assurer la productivité thermique, la perméabilité (à l'air, à la vapeur et à l'humidité) du tissu diminue. De plus, avec l'augmentation de la rigidité du textile, sa douceur et sa résistance à la flexion diminuent. Par ailleurs, malgré les efforts pour améliorer la résistance des microcapsules de PCM au lavage, à l'abrasion et à la température élevée, il a été rapporté que le matériau pouvait perdre près de 60 % de sa capacité d'accumulation de chaleur après quelques lavages (Tyurin *et al.*, 2018). Concernant leur intégration aux équipements de protection individuels, la structure inflammable de certains PCM ne conviendrait pas aux environnements de travail en contact direct avec le feu (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Tyurin *et al.*, 2018). De plus, la structure épaisse et parfois multicouche des équipements de protection individuels peut influencer négativement l'efficacité de l'élément à base de PCM en retardant le dégagement de la chaleur latente (Ramesh Babu et Arunraj, 2018). Bien que plusieurs groupes de recherche aient tenté de contrer certaines limitations des éléments refroidissants à base de PCM en employant des moyens chimiques, physiques et mécaniques tels que l'amélioration de la stabilité pendant le changement de phase, la capacité de refroidissement de cette technologie demeure relativement faible (Salaün, 2019).

4.4.1 Actuateur refroidissant : revue de la littérature

Les vêtements refroidissants personnels ont été initialement développés pour réduire l'effet des contraintes thermiques dans les environnements aérospatiaux et industriels hostiles. Bien que les premiers développements remontent à il y a 50 ans, la recherche sur l'optimisation et sur l'intégration efficace de ces dispositifs continue (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014).

La présente étude a retenu 80 articles afin d'effectuer l'état de l'art des technologies de refroidissement à utiliser dans les équipements de protections individuels. En effet, parmi les différents moyens de gestion thermique intelligente, les actuateurs refroidissants sont les solutions technologiques les plus consacrées à une application en santé et en sécurité du travail. Les analyses ont permis de les répartir en 6 catégories selon le principe technologique déployé, tout en prenant en compte quelques études visant la comparaison de l'efficacité des dispositifs refroidissants actifs dans le même contexte d'utilisation (figure 15).

Figure 15. Répartition des articles analysés concernant les actuateurs refroidissants à utiliser dans la gestion thermique intelligente.



Selon une première observation, près de 40 % de l'ensemble de ces travaux ont été dédiés aux vêtements refroidissants par circulation de fluide (connu comme FCG pour *Fluid Cooling Garment*). Ces vêtements emploient un système de refroidissement par conduction qui fait circuler un fluide refroidi à l'intérieur d'un vêtement en contact avec la peau. Le fluide refroidi peut être un liquide comme l'eau, ou de l'air comprimé ou ambiant. Un réseau de tuyaux attaché à la face interne du vêtement conduit le fluide froid dans le vêtement et le renvoi vers un dispositif de refroidissement après avoir échangé la chaleur par conduction avec le corps. Le système de refroidissement contient généralement une pompe, un réservoir et une soupape de commande (Tokizawa, Son, Oka et Yasuda, 2019). À ce jour, les principaux domaines d'application de ces vêtements ont été les combinaisons spatiales pendant les activités extravéhiculaires, les cockpits d'avions éclairés par le soleil, les opérations militaires, l'exploitation minière et les phases d'échauffement ou de refroidissement des athlètes de haut niveau. Ils pourraient être aussi avantageux pour les travailleurs œuvrant dans des véhicules, car il est pratique d'y

fixer l'unité de réfrigération ou le système d'air comprimé (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). S'agissant d'une technologie ayant été mise en œuvre depuis les années 1960, une partie importante des études des dix dernières années sur les FCG ont été dédiées à l'étude de la réponse physiologique du corps en conditions de refroidissement.

Comme d'autres vêtements refroidissants personnels, l'efficacité des FCG a pu être évaluée à l'aide de méthodes élaborées par les experts de ce domaine. Ces méthodes comprennent des tests sur des sujets humains dans une chambre climatique avec des phases introductives sur tapis roulant, suivi d'un protocole de simulation d'activité bien défini, incluant la mesure des paramètres tels que la T_s , la T_{rec} , la FC et le taux de sueur, ainsi que l'évaluation subjective du confort. Des essais peuvent aussi être effectués sur des mannequins thermiques permettant des mesures reproductibles de la puissance de refroidissement du vêtement ou bien sur des simulateurs thermophysiologiques (Sarkar et Kothari, 2014). L'évaluation dans une chambre climatique chaude de deux FCG à l'eau froide, couvrant respectivement la tête et le haut du corps ou seulement la tête et le front, a démontré que de tels vêtements portés sous un ensemble de pompiers peuvent considérablement réduire les contraintes physiologiques perçues, améliorer la récupération et prolonger le temps de l'exercice par rapport à une méthode de récupération passive. De plus, cet effet positif a été jugé plus accentué pour le vêtement couvrant à la fois la tête et le haut du corps. Selon les auteurs, ces résultats restent limités par le petit nombre de sujets testés et leur sexe unique, ainsi que la durée de l'exercice et la condition chaude et humide du test (30-35 °C, 50 % RH), qui ne correspond pas aux conditions réelles de la lutte contre l'incendie (Kim, J.-H., Coca, Williams et Roberge, 2011a, 2011 b). La comparaison d'un FCG à l'eau froide et d'un vêtement comprenant des coussins contenant une résine absorbante de la chaleur, portés par des sujets masculins sous un vêtement de pompiers, a montré que le refroidissement par la circulation de fluide améliore plus la sensation thermique en diminuant la T_s et le taux de sueur. Cependant, aucune différence majeure n'a été constatée concernant la T_{rec} , la FC, l'évaluation de l'effort perçu et la sensation d'humidité entre les deux vêtements dans le temps imparti aux tests (Teunissen *et al.*, 2014).

Dans d'autres études effectuées sur des sujets humains en laboratoire, le port d'un FCG à l'eau sous un équipement de pompiers (Bartkowiak, G., Dabrowska et Marszalek, 2014) et sous un vêtement de protection aluminisé (Bartkowiak, G., Dabrowska et Marszalek, 2017) a aussi prouvé une réduction considérable de la FC, de la T_s et de la température du microclimat proche de la peau. Des méthodes de tests identiques en laboratoire ont aussi démontré que les effets positifs du port d'un FCG à l'eau sont encore plus bénéfiques lorsqu'il est combiné à un refroidissement par ventilation du visage et à un refroidissement par immersion dans l'eau froide des mains et des pieds (Tokizawa, Son, Oka et Yasuda, 2017). Une autre étude en laboratoire effectuée sur des sujets humains qui portaient un FCG à l'eau a obtenu des résultats plus mitigés. En effet, l'étude suggère qu'en plus d'une faible augmentation des astreintes physiologiques avec le port du vêtement refroidissant, les résultats d'évaluation de la fatigue pendant l'exercice ne différaient pas entre les conditions de test avec et sans le FCG (Tokizawa *et al.*, 2019).

Des études réalisées sur des sujets humains en laboratoire comparant l'efficacité d'un FCG à l'eau avec des vêtements refroidissants passifs contenant des pochettes de glace ou des éléments refroidissants à PCM portés sous une combinaison de type CBRN, ont observé que, mis à part un refroidissement continu apporté par un FCG, tous les types de gilets testés performaient d'une manière assez similaire durant la première heure des exercices (Bach *et al.*, 2019 ; Maley, Minett, Bach, Zietek et Stewart, 2017).

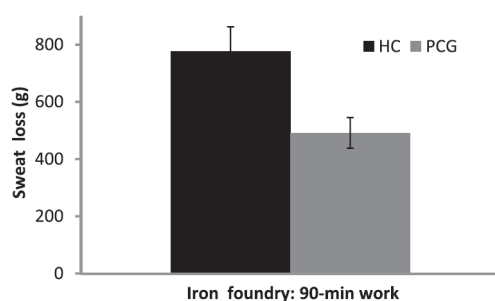
La comparaison de la simulation par un mannequin thermique et la réponse physiologique des sujets humains lors de l'utilisation des dispositifs de refroidissement de type FCG, à base de PCM ou de pochettes de glace sous des combinaisons de protection biologique, a révélé que la simulation par mannequin thermique pourrait fournir une estimation assez précise de la T_{c} , tandis qu'il pourrait surestimer la T_{s} et sous-estimer la perte de poids due à la transpiration (Quinn, Kim, Seo et Coca, 2018).

Alors que la méthode par éléments finis a aussi été utilisée pour simuler numériquement l'efficacité d'un FCG employant l'eau refroidie à 7, 10 et 13 °C chez un individu ayant une température corporelle élevée (Tian, M., Sukang et Ning, 2011), quelques études récentes ont également démontré un effet positif du port d'un FCG grâce à des tests effectués dans des environnements opérationnels (figure 16) sur des travailleurs de fonderie de fer (Shirish *et al.*, 2016) et dans des températures chaudes sur des travailleurs du secteur de la construction (Ashtekar, Mishra, Kapadia, Nag et Singh, 2019).

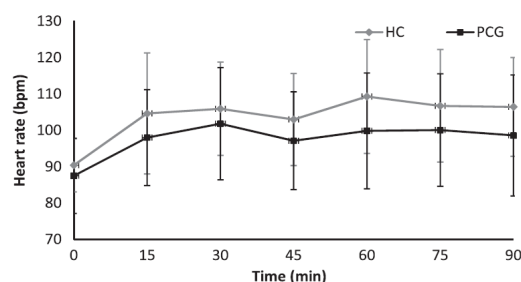
Figure 16. Étude de la performance d'un vêtement refroidissant FCG : (a) vêtement refroidissant avec un réservoir d'eau de petite taille, (b) perte de sueur pendant le travail dans une fonderie de fer, selon le vêtement porté, (c) évolution de la fréquence cardiaque au cours du travail de 90 minutes (HC = vêtements habituels ; PCG = vêtement refroidissant personnel) (Shirish *et al.*, 2016).



(a)



(b)



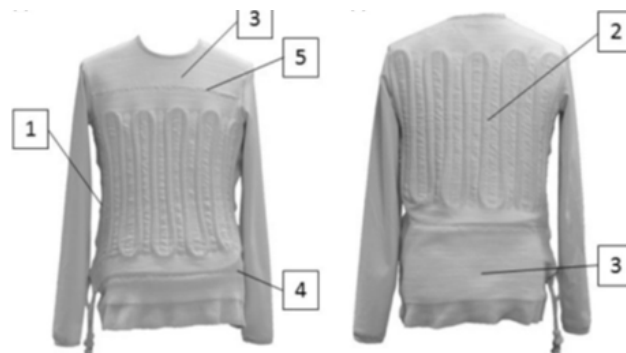
(c)

En utilisant des vêtements FCG à l'eau de poids inférieurs à 3 kg, les travailleurs testés ont pu exercer leur travail de routine avec confort et mobilité. Cependant, les pauses de quelques minutes nécessaires pour recharger le réservoir de glace de ces vêtements pourraient avoir un impact négatif sur la productivité. De plus, des investigations complémentaires sur l'utilisation de tels vêtements FCG pendant des journées de travail de 6 à 8 heures consécutives restent à réaliser (Ashtekar *et al.*, 2019).

Comme le mécanisme de conduction nécessite un contact direct et continu entre le réseau tubulaire d'un FCG et la peau, la pression de contact et l'uniformité de la distribution des tubes pourraient avoir un impact majeur sur l'échange thermique d'un FCG et le corps. Afin de favoriser cet échange thermique, la couche de textile intérieure d'un FCG à porter près de la peau devrait posséder une bonne conductivité thermique et apporter une bonne gestion de l'humidité, tout en assurant un bon ajustement au corps et en ayant de bonnes propriétés tactiles. Par ailleurs, la matière des tubes, leur conductivité

thermique, leur longueur totale, leur diamètre interne, l'épaisseur de leurs parois, ainsi que le débit d'écoulement et la température du fluide circulé sont d'autres paramètres qui influencent l'efficacité d'un FCG. De plus, la distribution des tubes est un autre facteur important ayant un impact sur l'efficacité d'un FCG dans le refroidissement de différentes zones du corps ou dans le refroidissement intermittent et régional. Par ailleurs, les vêtements refroidissants par circulation de liquide ou d'air sont limités par leur puissance d'alimentation requise et par la taille totale du système (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Tokizawa *et al.*, 2019). De ce fait, plusieurs études ont été consacrées à l'optimisation du design des FCG durant les dernières années. Dans ce cadre, la comparaison de deux FCG à l'eau de réseaux tubulaires identiques, mais de structures textiles différentes sur un mannequin thermique a permis de constater que le type de tricot employé pour contenir les tubes affecte grandement le transfert de la chaleur dans le vêtement. Par exemple, les tricots jersey double, de structures naturellement incurvées accueillant mieux le tube, procurent un meilleur effet de refroidissement que les tricots jersey simple qui nécessitent un matériau supplémentaire, comme un entoilage en mousse pour accueillir le tube, conduisant à un coefficient de transfert de chaleur plus faible (Kayacan, Oezlem et Kurbak, 2010). Puisqu'une interruption du débit de liquide peut se produire avec la compression des tubes intégrés dans le vêtement FCG, une optimisation de l'intégration des tubes dans le textile fut proposée en les insérant directement dans la structure modifiée d'un tricot spécifique qui comprenait une pièce d'espacement contenant des canaux produits au cours du procédé de tricotage (figure 17). Ce développement, qui visait un meilleur apport ergonomique, restait à valider sur des sujets humains ou sur des mannequins thermiques (Bartkowiak, G. y., Dabrowska et Włodarczyk, 2015). En se basant sur une série de tests séquentiels évaluant les sensations physiologiques et psychologiques de l'individu, la disposition et la fixation des tubes, les matériaux textiles et le montage de la pièce ont été progressivement améliorés afin de proposer un processus de design et de conception d'une cagoule de vêtement FCG. Malgré la méthodologie proposée, l'étude demeure limitée en raison des tests effectués sur seulement un sujet masculin (Kim, D.-E. et LaBat, 2010).

Figure 17. Prototype d'un vêtement refroidissant FCG à l'eau avec un réseau tubulaire de distribution de fluide (Bartkowiak, G. y. *et al.*, 2015).



Lors du développement d'un FCG pour une combinaison spatiale et afin de déterminer si la capacité de la pompe mécanique était appropriée pour ce système, la capacité d'évacuation de la chaleur du système fut déterminée en appliquant un modèle thermodynamique d'échange de chaleur qui a, par la suite, été validé en comparant les valeurs théoriques avec les valeurs obtenues par des thermocouples enregistrant la température d'entrée et de sortie du vêtement FCG (Van Broock et de León, 2012). Dans une autre étude théorique, un modèle prenant en compte la chaleur métabolique, le flux de chaleur convectif et le flux thermique de rayonnement de l'environnement a été mis en place pour analyser les effets de différents facteurs sur les performances d'un FCG dans un environnement chaud et pour identifier les principales limitations empêchant les performances optimales. Des essais de validation du modèle sur un mannequin thermique et l'analyse de la résistance thermique ont permis de constater que le débit de la circulation du liquide avait un effet plus important sur la résistance thermique entre l'eau et l'environnement que celle entre l'eau et la peau. Selon les mêmes analyses, le débit du liquide refroidissant et la température ambiante affecteraient grandement la durée d'action du vêtement FCG (Guo, Shang, Duan et Luo, 2015).

Certains experts ont proposé la présence d'un système de contrôle du refroidissement dans les vêtements FCG, afin d'ajuster la température et le débit de la circulation du fluide refroidissant en fonction des changements de température microclimatique proche de la peau. Ainsi, avec la diminution de l'activité métabolique, le porteur du vêtement ne ressentirait pas une perte de chaleur corporelle indésirable ni un inconfort thermique en raison d'un refroidissement excessif (Al Sayed *et al.*, 2016). En effet, quelques travaux ont focalisés sur l'élaboration de dispositifs de contrôle du débit de circulation du fluide, car des études plus anciennes réalisées sur des sujets humains avaient démontré qu'un refroidissement par intermittence pouvait réduire l'effet des contraintes thermiques d'une manière équivalente à un refroidissement continu par un FCG, tout en permettant le maintien d'une vasodilatation cutanée périphérique modérée par rapport à la vasoconstriction cutanée d'une peau trop refroidie (Cadarette *et al.*, 2006). De telles méthodes de refroidissement par intermittence, comprenant un cycle de 2 minutes d'opération et 2 minutes d'arrêt, ont également été comparées aux modes de refroidissement continu ou de refroidissement alterné basé sur un changement du sens d'écoulement toutes les 2 minutes dans un FCG à l'eau grâce aux tests réalisés sur un mannequin thermique (Deming et Casey, 2009). Selon les résultats de cette étude, le risque d'un refroidissement excessif est plus faible avec un refroidissement alterné, ce qui permettrait aussi d'augmenter de plus de 50 % l'efficacité du système, par rapport à un refroidissement continu. Le refroidissement par intermittence n'a pas été jugé très avantageux, car certains gains d'efficacité possibles par ce mode pourraient être gâchés en raison de pertes hors cycle de fonctionnement (Deming et Casey, 2009). Le mode de refroidissement contrôlé d'un FCG fonctionnant à l'eau, activé à une T_s de 34,5 °C et désactivé à une T_s de 33,5 °C, prouvant une gestion de stress thermique sur de plus longues périodes, en comparaison avec des modes de refroidissement continu et par intermittence (Vernieuw, Stephenson et Kolka, 2007), a été repris dans une étude analytique examinant la rétroaction de la T_s pour activer un FCG lorsque la T_s se situait

dans une plage de 33 à 35 °C (Cheuvront, Montain, Stephenson et Sawka, 2009). Il a ainsi été démontré qu'en plus d'une réduction des besoins en énergie, le contrôle d'un FCG par la T_s de l'individu réduit la contrainte thermique de la même manière qu'un refroidissement constant (Cheuvront *et al.*, 2009).

Puisque dans des environnements humides, la circulation de l'eau dans l'espace entre la peau et les couches denses d'un équipement de protection individuelle peut engendrer l'apparition de vapeur et provoquer des brûlures cutanées, des chercheurs ont proposé des vêtements FCG à l'eau avec une capacité d'autotranspiration induite par l'eau suintante à partir de 20 pores dans le réseau tubulaire pour un refroidissement avec perte de la chaleur par évaporation (Tanaka, Kunihiro, Nakamura et Katafuchi, 2014). Le vêtement FCG autotranspirant, conçu avec un tube attaché sur la surface extérieure du vêtement pour améliorer l'absorption d'humidité, fut par la suite testé par quelques sujets masculins pour démontrer qu'un tel vêtement pourrait efficacement abaisser la T_s sans augmenter l'humidité du vêtement. Cependant, l'effet de refroidissement était retardé jusqu'à ce qu'une dose suffisante d'eau se dégage et s'évapore (Tanaka, Kunihiro *et al.*, 2014). Le même concept a été repris dans une deuxième étude qui proposait la présence de seulement 10 pores dans le réseau tubulaire pour un refroidissement par évaporation associée à un contrôle de la vaporisation de l'eau par l'individu en tant que fonction additionnelle de refroidissement par évaporation. Les tests effectués dans une chambre climatique chez des sujets masculins contrôlant le processus d'évaporation dans le vêtement avec un bouton de contrôle, ont démontré la capacité d'un FCG de transpiration contrôlable dans la réduction de la T_s sans engendrer l'augmentation de l'humidité du vêtement, et ce, dès le début du refroidissement (Tanaka, K., Nagao, Okada et Nakamura, 2017). Force est de constater que, malgré le potentiel important des systèmes de contrôle de fonctionnement des vêtements FCG, tous les travaux de recherche analysés ont été limités à des tests de validation dans un environnement de laboratoire.

Afin de contourner certaines limitations liées à l'utilisation de l'eau froide dans un vêtement FCG, notamment le poids du réservoir de refroidissement ou l'influence de la chaleur ambiante sur la température de l'eau, quelques travaux de recherche ont proposé l'utilisation d'autres liquides à faire circuler dans le réseau tubulaire d'un FCG. L'évaluation de l'usage de suspensions à base de PCM microencapsulées comme liquide refroidissant dans un FCG porté sur un mannequin thermique a montré que la température d'entrée, le débit de circulation et la concentration des microcapsules étaient les paramètres les plus influents sur la dissipation thermique par un tel système. À condition d'assurer un ajustement approprié de ces paramètres, une dissipation thermique nettement meilleure pourrait être obtenue avec l'application d'une suspension de PCM, au lieu de l'eau. De plus, l'usage d'une suspension de PCM pourrait améliorer les performances du vêtement refroidissant sans une augmentation apparente de la puissance de la pompe (Wang, T. *et al.*, 2015). L'étude à l'échelle du laboratoire d'un vêtement refroidissant au dioxyde de carbone liquide porté par des sujets masculins a pu montrer que ces types de FCG atténueraient efficacement les contraintes thermiques en diminuant les valeurs de T_s et de T_{rec} des individus, pour ainsi favoriser la productivité des

travailleurs dans un environnement chaud et humide grâce à un système de refroidissement portable relativement plus léger par rapport aux FCG de même catégorie fonctionnant avec l'eau froide (Zhang, Y., Bishop, Green, Richardson et Schumacker, 2010). Les vêtements FCG utilisant la circulation de l'air dans un réseau tubulaire intégré ont également été le sujet d'études récentes. L'examen du port d'un vêtement FCG à l'air, doté d'un compresseur stationnaire générant de l'air déshumidifié, insufflé dans un réseau tubulaire couvrant certaines régions du corps, sous un vêtement de protection contre les risques chimiques, a permis de constater qu'un tel dispositif permettrait de réduire considérablement l'effet des contraintes thermiques. Les tests réalisés sur des sujets humains ont par ailleurs permis de constater qu'à l'aide de ce type de vêtement, le temps de travail pourrait être considérablement prolongé (Glitz *et al.*, 2015).

Le vêtement refroidissant par expansion de gaz est une autre catégorie de vêtements refroidissants personnels basés sur la distribution d'un réseau de tubes intégrés. Son principe de fonctionnement étant la vaporisation endothermique du dioxyde de carbone (CO₂) liquéfié, est basé sur la distribution du CO₂ à haute pression par l'entremise d'une soupape de détente dans laquelle la pression du gaz chute à la valeur de la pression ambiante. Au cours de cette évolution thermodynamique, le CO₂ liquide se transforme en vapeur et absorbe une énergie égale à la chaleur de vaporisation du gaz, permettant ainsi de refroidir son environnement immédiat (Al Sayed *et al.*, 2016). Malgré un poids total relativement plus faible par rapport aux vêtements FCG à l'eau ou à l'air et sa capacité de refroidissement élevé, le vêtement refroidissant par expansion de gaz possède une durée de fonctionnement assez faible. Par ailleurs, l'échappement du CO₂ rejeté dans un environnement fermé peut mener à des concentrations dangereuses de gaz dans le cas de l'utilisation simultanée du dispositif par plusieurs travailleurs à proximité (Al Sayed *et al.*, 2016). Afin de remédier à certaines limitations de ce type de vêtement refroidissant, un système portable utilisant la décharge atmosphérique du CO₂ à haute pression fut proposé pour améliorer les conditions de travail dans des environnements chauds et humides (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2019). Ainsi, un prototype a été mis au point. Il comprenait une structure textile de trois couches, un système de traitement de l'air utilisant une décharge atmosphérique de CO₂ liquide hautement pressurisé pour refroidir et pour déshumidifier le flux d'air prélevé dans l'environnement, deux cylindres identiques de CO₂ diphasique saturé connectés à une chambre de mélange située à l'intérieur d'une boîte de mélange équipée d'un dissipateur de chaleur, et des canaux de distribution en tube de PVC placés entre les couches de mailles absorbantes d'humidité du vêtement, répartis à l'arrière et l'avant du corps. Dans cette approche, l'air traité fut acheminé sur le corps pour créer un microclimat frais sous le vêtement, qui permettait de refroidir le corps par un transfert de chaleur par convection et aider l'évaporation de la sueur condensée (Al Sayed, Vinches et Hallé, 2019). L'évaluation des performances de ce prototype à travers les tests réalisés sur des sujets masculins dans une chambre climatique chaude et humide a démontré la capacité d'un tel concept à améliorer le confort thermique des personnes en réduisant les astreintes thermiques telles que la T_{cl}, la FC et la sensation d'humidité. Cependant, les conclusions de cette étude restent à confirmer dans des conditions d'exploitation réelles et avec d'autres populations concernant le sexe des

participants, la moyenne d'âge et le poids corporel. Certaines modifications sont aussi à considérer dans la conception de ce prototype pour une utilisation sous des équipements de protection individuels (Al Sayed, Vinches, Dupuy, *et al.*, 2019).

Le refroidissement par projection d'air est un autre principe exploité. Ces types de vêtements soufflent l'air sur le corps et en extraient la chaleur en améliorant l'évaporation de la sueur sécrétée à la surface de la peau, tout en favorisant l'échange de la chaleur par convection à l'aide de la vitesse du passage de l'air à la surface du corps (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). La majorité de ces vêtements se composent de deux couches, une couche extérieure de tissu imperméable empêchant la fuite de l'air vers l'environnement, et une couche intérieure de matériau perméable à l'air qui est dirigé entre deux couches vers la surface de la peau (Zhao, Mengmeng *et al.*, 2013). Comme les mouvements importants de l'air favorisent l'évaporation de la sueur, dans certains cas, l'utilisation d'un compresseur fixé au vêtement a été envisagée afin de projeter de l'air forcé. De plus, l'usage d'un dispositif de refroidissement par air projeté pourrait entraîner une différence plus importante entre la température de la peau et celle de son environnement pour ainsi favoriser la perte de chaleur par convection (Sarkar et Kothari, 2014). Cependant, la présente revue de la littérature a permis de constater que dans une perspective de portabilité, la grande majorité des études des dix dernières années avaient plutôt privilégié le refroidissement par ventilation. Ces types de vêtements contiennent des ventilateurs intégrés pour souffler de l'air ambiant sur la surface de la peau et ainsi faciliter l'évaporation de la sueur. Avec l'utilisation des miniventilateurs intégrés de quelques centimètres de diamètre, le vêtement refroidissant peut demeurer léger (Zhao, M., Kuklane, Lundgren, Gao et Wang, 2015). Bien que leur performance de refroidissement puisse être impactée par la température ou l'humidité de l'air ambiant, leur grand avantage est de reposer sur le mécanisme de thermorégulation du corps humain pour dissiper la chaleur et ainsi éliminer le risque de refroidissement excessif (Al Sayed *et al.*, 2016 ; Yang, Yifan, 2016). Des essais réalisés sur des sujets masculins dans une chambre climatique ont d'ailleurs démontré l'efficacité d'un vêtement refroidissant par ventilation à augmenter la perte de la chaleur, tout en maintenant la valeur de la T_{sk} constante lors d'exercices réalisés dans un environnement chaud et sec (Barwood, Martin J, Newton et Tipton, 2009). Le calcul de l'indice PSI avec des données collectées lors des tests réalisés dans une chambre climatique sur des sujets masculins portant un vêtement refroidissant sous une combinaison militaire a permis de constater que la projection de l'air sur le torse des individus était plus efficace dans un environnement chaud et sec par rapport à un environnement chaud et humide. Pourtant, les résultats montraient une réduction identique du taux de transpiration dans les deux conditions climatiques (Hadid *et al.*, 2009).

Quelques groupes de recherche ont également établi des comparaisons de performances avec des vêtements refroidissants passifs. La comparaison d'un gilet équipé de deux ventilateurs sur les deux côtés de l'abdomen et d'une veste comportant 21 pochettes de PCM, refroidissant dans des conditions identiques, n'a démontré aucune différence significative dans la performance des deux vêtements en ce qui concerne la T_{sk} du torse et

la FC des sujets féminins testés. Cependant, le vêtement à PCM a permis une baisse plus importante de la température microclimatique proche de la peau et une meilleure sensation thermique, alors que le vêtement à ventilateur a diminué plus l'humidité du microclimat (Zhao, Mengmeng, Gao, Li et Wang, 2015). La comparaison d'un gilet refroidissant à base de pochettes givrées et d'un vêtement refroidissant par ventilation a permis d'étudier les perceptions subjectives des travailleurs des secteurs de l'horticulture et du nettoyage lors de l'utilisation de tels équipements dans leur journée de travail. Les données collectées ont permis de constater que le choix des travailleurs masculins était davantage influencé par le confort thermique, tandis que les travailleuses accordaient plus d'attention au confort tactile et au toucher du tissu. Ce qui suggère que les différences entre les sexes doivent être prises en compte dans la conception de ce type de vêtements refroidissants (Chan, APC, Yang, Wong, Lam et Li, 2013). Les résultats d'une telle étude démontrent bien qu'outre la notion purement physiologique des variations de T_c , de T_s ou de FC, la notion de confort et de ressenti est essentielle dans l'interprétation des analyses de performance des vêtements refroidissants.

Des études ont aussi visé l'optimisation du design d'un vêtement à ventilateur. L'intégration de deux ventilateurs selon cinq emplacements différents soit en haut du dos, en bas du dos, au milieu du dos, en haut à l'avant et en bas à l'avant d'un gilet refroidissant, a été examinée sur un mannequin thermique transpirant (figure 18). Aucune différence significative dans le refroidissement total du torse ou dans la résistance à l'évaporation dynamique totale des vêtements n'a été observée. Toutefois, la zone locale correspondant à chaque ventilateur était mieux refroidie (Zhao, Mengmeng *et al.*, 2013). L'efficacité d'un vêtement à ventilateur, pour offrir un meilleur confort aux travailleurs œuvrant dans des bureaux où l'environnement est chaud, a été examinée par le port d'un chandail à manches courtes contenant deux ventilateurs sur l'abdomen accompagnés de deux ouvertures latérales sur la poitrine et d'une troisième dans le haut du dos. Les tests effectués sur des sujets féminins avec une faible activité physique en environnement chaud de laboratoire ont montré que la ventilation permet de réduire la T_s au niveau de l'emplacement des ventilateurs, ainsi que la T_s moyenne du torse. Cependant, une variation dans la T_s moyenne du corps entier ainsi que dans la T_{rec} n'a pas été observée (Zhao, M. *et al.*, 2015).

Figure 18. Prototypes d'un vêtement refroidissant à ventilateur avec deux petits ventilateurs et des ouvertures situées à différents endroits du torse (de gauche à droite) : le haut du dos, le bas du dos, le milieu du dos, la poitrine et le ventre (Zhao, Mengmeng *et al.*, 2013).



À l'aide de la simulation numérique d'une série de modèles bidimensionnels de transfert de chaleur par convection et par évaporation à la surface de la peau, l'efficacité d'un vêtement refroidissant par ventilateur a été examinée en prenant en compte différentes configurations en termes du nombre et du diamètre des ventilateurs, ainsi que différentes vitesses de flux d'air. D'après les simulations effectuées, le transfert de chaleur par convection et par évaporation pourrait être amélioré par la formation de courants tourbillonnaires produits lorsque les flux d'air d'entrée sont élevés ou lorsque l'espace entre la peau et le vêtement textile est suffisamment large (Sun et Jasper, 2015). La comparaison d'un mode de refroidissement continu avec un refroidissement par intermittence selon un cycle de 2 minutes d'opération et 2 minutes d'arrêt dans un vêtement refroidissant par ventilation a montré qu'une ventilation constante réduirait davantage le stress thermique et, dans une plus grande mesure, pendant les phases de récupération. Toutefois, les tests effectués sur des sujets portant le vêtement refroidissant sous un gilet pare-balle ont révélé de meilleurs avantages perceptuels avec une ventilation par intermittence pendant le travail, et de meilleurs avantages perceptuels avec la ventilation constante au repos (House, White, Harwood et Cook, 2017). L'utilisation de ventilateurs a aussi été étendue à la conception de masques intégraux de protection respiratoire. L'examen comparatif d'un masque conventionnel avec un masque modifié fournissant de l'air sous le masque près du front et un deuxième masque modifié fournissant de l'air du front aux yeux et dans la zone de respiration a permis de constater que la projection de l'air par ventilation intégrée permet de réduire la T_{s} du visage et de minimiser la hausse de la T_{re} , tout en améliorant l'évaluation subjective du confort et de la sensation thermique chez les sujets testés (Caretto et Barker, 2014).

Les dispositifs utilisant le refroidissement thermoélectrique basé sur l'effet Peltier¹⁰ ont également été utilisés dans la conception de vêtements refroidissants personnels. Un gant à température contrôlée fut élaboré en associant des modules thermoélectriques avec des dissipateurs de chaleurs sous forme de miniventilateurs et avec une thermistance placée proche de la peau. À l'aide d'un microcontrôleur de rétroaction de la thermistance intégrée, la tension appliquée pouvait permettre de refroidir ou de chauffer les modules. Malgré la validation du démonstrateur développé avec des sujets humains au laboratoire, l'optimisation de la taille du gant et la zone de la thermorégulation restent à examiner (Carek et Inan, 2016). Un casque refroidissant basé sur la réfrigération thermoélectrique a été proposé en mettant en œuvre deux modules de réfrigération par air refroidi et par eau refroidie qui comprenaient chacun des éléments thermoélectriques. Les tests effectués sur un mannequin thermique ont révélé que le débit de la circulation de l'eau avait un impact plus important sur la puissance frigorifique du casque et sur le coefficient de performance du système (Linlin *et al.*, 2017). Un vêtement thermorégulateur

¹⁰ Effet Peltier : il s'agit d'un phénomène thermoélectrique qui consiste en un déplacement de chaleur en présence d'un courant électrique passant à travers des matériaux conducteurs de natures différentes (Linlin, Jitian, Lian et Chong, 2017).

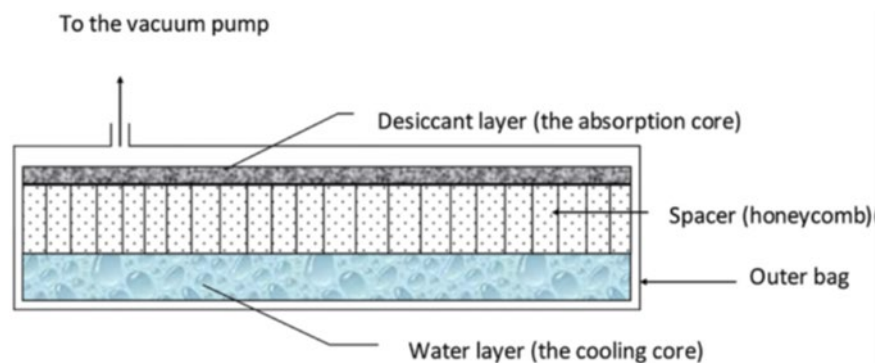
a aussi été proposé à l'aide de la connexion d'un module thermoélectrique portable à un réseau de tubes de distribution d'air tricoté dans le vêtement. En changeant la direction du courant électrique qui alimentait le module thermoélectrique, les modes de fonctionnement pouvaient être commutés entre refroidissement et chauffage. En examinant la relation entre les poids et les résistances thermiques des dissipateurs de chaleur disponibles dans le commerce, l'étude a permis de proposer une méthode afin de trouver le poids minimal des dissipateurs de chaleur pour un système thermoélectrique portable (Zhao, D. *et al.*, 2018). Un système thermoélectrique flexible a également été élaboré en utilisant des couches d'élastomère, prenant en sandwich des modules thermoélectriques rigides entre deux feuillets extensibles séparés par un espace d'air pour obtenir une faible conductance thermique du module et une meilleure flexibilité. Un gilet de démonstration a par la suite été mis en place en couvrant le dos, la poitrine et l'abdomen par plus de 140 modules thermoélectriques flexibles (Hong, S. *et al.*, 2019). Malgré les dimensions réduites des modules thermoélectriques permettant de tendre vers des solutions portables, il s'avère que ces systèmes ont une consommation d'énergie électrique relativement élevée et nécessitent l'utilisation de batteries de taille appropriée (Al Sayed *et al.*, 2016).

L'optimisation de l'évaporation, étant considérée comme le moyen physiologique le plus efficace pour la dissipation thermique, a aussi fait l'objet d'études sur le développement des vêtements refroidissants (Yang, Yifan, 2016). Les vêtements refroidissants par évaporation tirent parti de la grande chaleur latente de l'évaporation de l'eau et procurent un effet de refroidissement en facilitant l'évaporation à travers une structure de tissu hautement absorbant. L'effet de refroidissement dure alors jusqu'à ce que toute l'humidité du vêtement refroidissant s'évapore. Dans ce mécanisme, l'évaporation de l'eau à partir d'un média ou d'une surface humide est généralement utilisée pour refroidir la peau (Donelan et Park, 2016). Toutefois, un vêtement refroidissant par évaporation présente l'inconvénient de ne pas être fonctionnel lorsqu'il est porté sous des vêtements de protection denses. De plus, son efficacité est fortement réduite avec une humidité ambiante élevée (Yang, Yifan, 2016). Une des approches proposées pour améliorer la performance d'un vêtement refroidissant par évaporation dans un milieu humide a été l'ajout d'un mécanisme de ventilation, permettant d'évacuer l'humidité d'une manière plus efficace (Wang, F. et Song, 2017). Afin de contourner une partie des problèmes liés aux vêtements refroidissants par évaporation, des systèmes portables et motorisés de ce type ont également été explorés. Dans ce contexte, un dispositif motorisé de compression de vapeur assemblé dans une configuration de sac à dos a été proposé pour être associé à un vêtement refroidissant contenant des conduites réfrigérantes (Ernst et Garimella, 2009, 2013). Malgré des taux de refroidissement très satisfaisants grâce à une approche de motorisation, le concept demeure très encombrant et peu pratique (Ernst et Garimella, 2013).

Les vêtements multicouches constituent un autre axe d'amélioration des performances de vêtements refroidissants par évaporation. Comme illustrée dans la figure 19, cette approche implique l'intégration de matériaux hygroscopiques, de type desséchant ou

super absorbant pour favoriser l'absorption de la vapeur produite par la transpiration ou par le liquide inclus dans un réservoir interne (Yang, Yifan *et al.*, 2012). En se basant sur des études ayant démontré une hausse du taux d'évaporation de l'eau grâce à l'ajout de matériaux déshydratants, la méthode de refroidissement par dessiccateur a été combinée à la technique de refroidissement sous vide pour obtenir de meilleures performances. Par ailleurs, pour favoriser l'intégration des éléments déshydratants dans la structure des vêtements, des technologies membranaires ont été proposées pour séparer l'eau contenue dans le noyau de refroidissement du matériau dessiccant présent dans le noyau d'absorption. Des membranes polymériques de type polyuréthane ou polyester étanches, mais perméables à la vapeur d'eau, ont été choisies pour laisser passer celle-ci, tout en retenant l'eau condensée. Une fois le vide créé par une pompe, le fonctionnement de ces types de vêtements repose sur l'absorption de la vapeur ou son adsorption par le dessiccateur afin de maintenir la force motrice nécessaire à l'évaporation de l'eau (Yang, Yifan, 2016).

Figure 19. Le schéma de la vue en coupe d'un coussin refroidissant à dessiccateur sous vide (Yang, Yifan, Stapleton, Diagne, Kenny et Lan, 2012).



Malgré la capacité de refroidissement élevée des vêtements refroidissants à dessiccateur sous vide, très peu d'études leur ont été consacrées (Al Sayed *et al.*, 2016). L'intégration des coussins à dessiccateur sous vide dans un vêtement (Yang, Yifan *et al.*, 2012), l'évaluation d'un vêtement refroidissant par évaporation permettant d'absorber la chaleur et la vapeur d'eau sous une combinaison d'astronaute à associer avec un radiateur absorbant à base de chlorure de lithium pour rejeter la chaleur dans l'espace (Izenson, Weibo et Bue, 2013), et le développement d'une fibre déshydratante à membrane pour le refroidissement par déshydratation sous vide dans la perspective du développement d'un vêtement refroidissant à dessiccateur sous vide (Yang, Yifan, 2016), sont des exemples de travaux récents dans ce domaine. Il est à noter qu'en étant basée sur un refroidissement par évaporation, la performance des systèmes à base de dessiccateur est bien meilleure dans les climats secs que dans les climats humides (Donelan et Park, 2016 ; Yang, Yifan *et al.*, 2012).

Au vu de la multitude de méthodes disponibles pour la conception de vêtements refroidissants personnels, certaines études se sont intéressées à établir des comparaisons entre les différentes techniques afin de proposer les meilleures stratégies de refroidissement pour différentes conditions. La comparaison d'un vêtement refroidissant contenant deux pochettes de PCM avec un gilet contenant deux ventilateurs sur le devant et l'arrière et un FCG à l'eau froide, chez des sujets humains dans des conditions identiques de laboratoire, a permis de constater que, pour les périodes courtes de refroidissement, les techniques de refroidissement actif permettent des réductions initiales assez rapides de la T_{c} , alors qu'un dispositif à base de PCM était plus influant sur la T_{s} (Barwood, Martin James, Davey, House et Tipton, 2009). L'évaluation de cinq conditions de refroidissement des personnes portant des combinaisons de pompiers dans un environnement chaud et humide a démontré que la T_{c} maximale pouvait diminuer encore plus lorsqu'un vêtement FCG à l'eau était associé à une ventilation d'air à partir des conduits de l'équipement de protection (Coca, Aitor, Roberge, Powell, Kim et Williams, 2009). Une étude comparant les performances d'un vêtement refroidissant par ventilation avec deux vêtements à PCM refroidissant et un FCG à l'eau pour l'usage dans le domaine militaire, effectuée sur un mannequin thermique ainsi que sur des sujets humains, a révélé que le vêtement à ventilateurs a également amélioré les réponses physiologiques des sujets, mais dans une moindre mesure par rapport aux trois autres méthodes (Elson, J. C., McCullough et Eckels, 2013).

La capacité de refroidissement, l'aptitude à garder la peau sèche, la durée d'opération et la portabilité sont des caractéristiques qui permettent de faciliter le choix de la technique de refroidissement, selon les conditions environnementales et l'activité. À cette fin, des tableaux comparatifs ont été proposés par des experts (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Yang, Yifan, 2016). Des données collectées à partir de diverses études dans la littérature montrent que les vêtements FCG et par dessiccateur sous vide fournissent les plus grandes capacités de refroidissement. Toutefois, de telles comparaisons restent très subjectives, car en fonction du climat, du nombre d'éléments refroidissants et des zones recouvertes, certaines caractéristiques présentées dans le tableau 3 peuvent varier.

Tableau 3. Comparaisons des caractéristiques de divers types de vêtements refroidissants (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014 ; Yang, Yifan, 2016)

Vêtement refroidissant personnel	Capacité de refroidissement (watt)	Poids moyen (kg)	Durée moyenne d'opération
Par circulation de liquide	50-600	3-5	3 à 6 heures
Par circulation d'air	270-320	4-5	2 à 6 heures
Par ventilation	75-350	0,5-1	2 à 8 heures
Par évaporation	50-70	1-3	1 à 2 heures
Par dessiccateur sous vide	320-370	3-4	2 à 3 heures
À matériaux PCM	50-140	4-5	20 à 40 minutes

Dans une perspective de l'utilisation des vêtements refroidissants personnels dans les milieux de travail, des méthodes universelles ont été proposées pour faciliter l'évaluation et la sélection du système le plus approprié, selon le climat et la nature de l'activité. Dans ce cadre, une échelle de performance de vêtement refroidissant fut proposée afin de présenter l'éventualité du succès d'un système intégré à apporter un confort thermique dans différentes conditions environnementales. Pour cela, un facteur sous forme d'un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1 a été proposé, selon lequel la valeur la plus petite correspond à la capacité moindre du système à atteindre le confort thermique (Yazdi et Sheikhzadeh, 2013). Dans une étude connexe, une méthode pour le calcul de l'efficacité d'un vêtement refroidissant personnel pour répondre aux exigences des différents types de tâches au travail a été suggérée. Cette méthode prend en compte la capacité de refroidissement ainsi que le poids et la durée d'opération du système de refroidissement intégré d'une part, et la cadence de travail, le type de terrains, de pentes ou de chantiers à parcourir par le travailleur d'autre part (Elson, J. et Eckels, 2015). Cependant, pour prédire avec précision le temps nécessaire à l'exécution d'une tâche, des méthodes complémentaires incluant des informations additionnelles sur la perte de la chaleur corporelle avec ou sans un vêtement refroidissant et l'effet du refroidissement sur le corps et sa physiologie sont nécessaires (Elson, J. et Eckels, 2015).

En raison des lacunes des méthodes de refroidissement utilisées dans la conception des vêtements refroidissants personnels et de la complexité de la sélection de la meilleure stratégie en fonction d'activités et d'environnements différents, certains experts ont opté pour la mise en œuvre de technologies de refroidissement hybrides (Kang, Wan et Wang, 2018). Bien qu'ils semblent plus efficaces que ceux utilisant une seule technologie, les vêtements refroidissants hybrides peuvent devenir plus encombrants que les systèmes dotés d'une seule technologie (Al Sayed *et al.*, 2016). Une des méthodes explorées pour la conception des systèmes hybrides a été d'associer le refroidissement par circulation de liquide à celui par ventilation d'air. Pour offrir un meilleur confort thermique aux astronautes dans des missions extravéhiculaires, l'efficacité d'un FCG à l'eau fut comparée à celle d'un vêtement refroidissant hybride associant la circulation de liquide et la ventilation d'air. Les deux configurations ayant la même longueur de tube de nature identique présentaient des performances d'élimination de chaleur similaires, malgré des commentaires des testeurs en faveur du vêtement refroidissant hybride (Rhodes, Bue, Meginnis, Hakam et Radford, 2013).

Dans une autre étude, un module de refroidissement contrôlé fut proposé pour un casque de luminothérapie à DEL qui associait le refroidissement par circulation de liquide au refroidissement par ventilation d'air pour favoriser l'évacuation de l'humidité (Pengbo, Jiajing, Qian et Ting, 2017). L'association des coussins congelés avec des ventilateurs intégrés a été une autre approche explorée. En effet, un vêtement contenant trois pochettes de gel congelé et deux ventilateurs montés sur le bas du dos a été testé dans une chambre climatique chaude et humide. Le résultat des tests effectués sur des sujets masculins a confirmé l'efficacité d'un tel vêtement refroidissant hybride dans la diminution des contraintes physiologiques lors des phases d'exercice. Cependant, le concept reste à

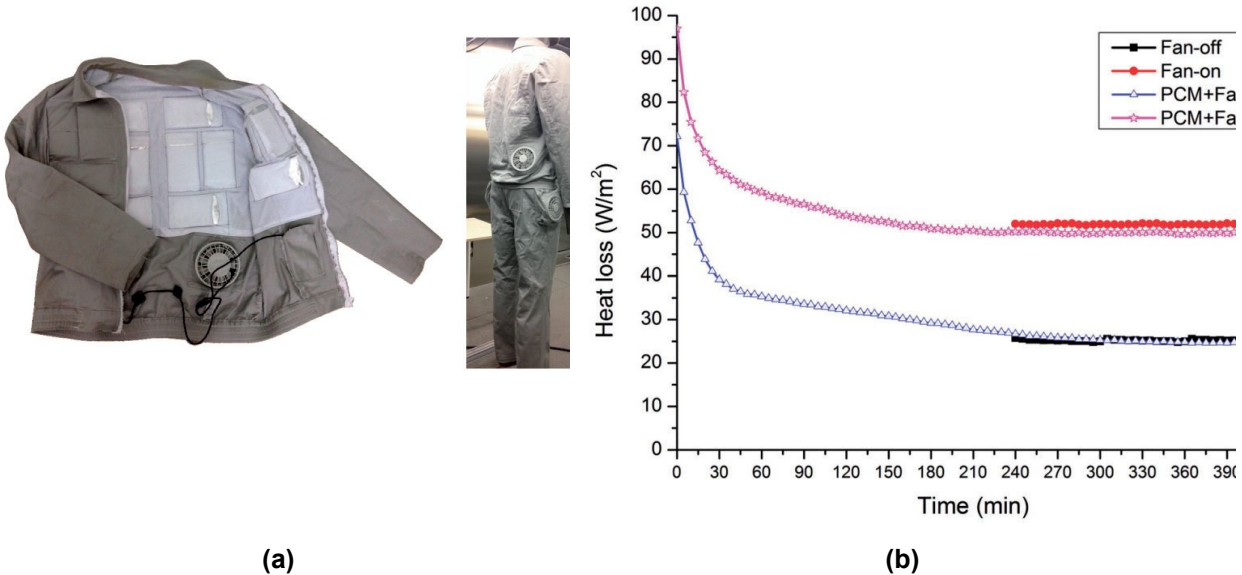
valider pour d'autres types d'activités, et ce, avec des sujets présentant caractéristiques de formes physiques différentes (Chan, A *et al.*, 2019). L'efficacité de vêtements équipés de coussins congelés et de ventilateurs intégrés a également été validée dans une étude réalisée chez 130 travailleurs hongkongais des secteurs de la construction, de l'horticulture et du nettoyage extérieur, de la restauration et des aires de stationnement d'aéroport. Ces travailleurs ont généralement exprimé de meilleurs niveaux de confort lorsqu'ils portaient le vêtement refroidissant (Chan, AP, Wong, Li, Wong et Guo, 2015). Un concept associant les pochettes PCM à la circulation de l'eau froide a également été étudié. Pour cela, des pochettes de PCM intégrées dans une veste pour refroidir le torse furent associées à une conduite d'eau dissimulée à travers les coussins de PCM pour faire circuler l'eau froide d'un microrefroidisseur permettant de regeler le PCM et ainsi prolonger sa durée d'action. Des travaux de simulations ont permis d'optimiser les paramètres liés au type de PCM et à la circulation du liquide refroidissant, et d'ajuster l'étanchéité de la veste. Par la suite, les tests effectués sur des sujets humains, avec un prototype élaboré à partir des optimisations simulées, ont démontré un refroidissement hybride demeurant efficace pendant au moins deux heures de travail à l'intérieur, sans sacrifier le confort thermique (Hou, Yang, Xu et Huang, 2019).

Au cours des cinq dernières années, plusieurs études ont été dédiées à l'exploration de vêtements refroidissants hybrides, associant des éléments refroidissants à PCM et des ventilateurs intégrés (PCM/ventilateurs), pour assurer de meilleures performances dans des climats chauds et humides. Pour évaluer la performance de vêtements refroidissants hybrides de type PCM/ventilateurs, un prototype contenant 4 ventilateurs et 24 pochettes de PCM (Lu, Yehu, Wei, Lai, Shi, Wang et Gao, 2015) et un vêtement ayant 2 ventilateurs et 24 pochettes de PCM (Lu, Yehu, Wei, Lai, Shi, Wang, Gao, *et al.*, 2015) ont été testés sur des mannequins thermiques. En effet, la présence de ventilateurs a permis de grandement améliorer la perte de chaleur par évaporation par rapport à la situation où les ventilateurs étaient éteints. Bien que des actuateurs à PCM offrent une durée limitée de refroidissement, un vêtement hybride permettrait de fournir un certain niveau de refroidissement pendant toute la durée des tests grâce à la présence des ventilateurs tant dans les environnements chauds et secs que dans les environnements chauds et humides (Lu, Yehu, Wei, Lai, Shi, Wang et Gao, 2015 ; Lu, Yehu, Wei, Lai, Shi, Wang, Gao, *et al.*, 2015).

Par ailleurs, l'étude d'une veste dotée de 8 pochettes de PCM et de 2 ventilateurs au bas du dos par un mannequin thermique transpirant dans un climat chaud et humide a aussi montré qu'une puissance de refroidissement plus élevée était obtenue par un refroidissement hybride par rapport aux configurations de refroidissement à PCM uniquement ou n'utilisant que les ventilateurs (Yi, Zhao et Chan, 2017). Une combinaison contenant 24 pochettes de PCM et 4 ventilateurs répartis dans le bas du dos de la veste et dans la zone latérale du pantalon, a également été testée sur un mannequin thermique dans des climats chauds/secs et chauds/humides. Les résultats ont révélé que, dans des conditions sèches, la vitesse de refroidissement dans les phases initiales était plus élevée avec l'utilisation de PCM, sans allumer les ventilateurs. Au contraire, dans les conditions

humides, la vitesse de refroidissement était plus faible sans les ventilateurs. De plus, un refroidissement hybride a permis de fournir un effet important de refroidissement continu pendant la durée des tests. Selon des tests de simulation d'activités effectués sur le mannequin thermique (figure 20), bien que le PCM seul ou le ventilateur seul puisse offrir un certain degré de refroidissement pour les travaux légers, c'est effectivement le refroidissement hybride qui offre une performance optimisée pour des conditions de travail intensif (Lai, Wei, Lu et Wang, 2017).

Figure 20. Étude des performances d'un vêtement refroidissant hybride : (a) prototype d'un vêtement refroidissant hybride à PCM/ventilateur, (b) perte de chaleur totale (W/m^2) observée dans quatre scénarios d'essai sur un mannequin thermique (Lai et al., 2017).



Une étude effectuée sur des sujets humains a conclu que les vêtements refroidissants à PCM/ventilateurs pourraient réduire efficacement le stress thermique lors de l'exercice dans un environnement chaud et modérément humide. En effet, l'utilisation d'une combinaison contenant 18 pochettes de PCM dans le haut du corps et 6 pochettes à la hauteur des cuisses, en association avec 2 ventilateurs placés sur le bas du dos de la veste et 2 ventilateurs placés sur la portion latérale du bassin du pantalon, a permis de réduire la T_{c} , la T_{s} moyenne, la FC et l'indice PSI des sujets, tout en améliorant les perceptions subjectives pendant les phases d'exercice et de récupération (Song et Wang, 2016). Une combinaison similaire comprenant 24 pochettes à PCM et 4 ventilateurs a également été validée pour un environnement intérieur chaud, simulé par une chambre climatique, en démontrant une réduction de la T_{s} moyenne et de la production totale de sueur des sujets testés ; ceux-ci ont également exprimé de bonnes sensations thermiques, d'humidité de la peau et de confort par rapport aux tests sans refroidissement (Song, Wang et Wei, 2016). L'efficacité d'une veste refroidissante équipée de 2 ventilateurs sur la région du bas du dos et de 8 pochettes PCM réparties sur le devant et l'arrière du corps a aussi été évaluée à travers une série de 14 études de terrain

menées pendant l'été auprès de 140 ouvriers hongkongais du secteur de la construction. Le port de cette veste pendant les phases de repos a conduit à une réduction significative de la sensation thermique, de l'échelle RPE, de la FC et de l'indice de PeSI chez les sujets testés en comparaison avec des pauses sans refroidissement. La veste à PCM/ventilateurs a aussi montré une bonne capacité à atténuer l'indice de la contrainte de chaleur perceptive des travailleurs lors des pauses d'une durée limitée, mais avec beaucoup moins d'effet pour une durée de pause prolongée. Or, une étude approfondie des durées optimales de travail-repos avec un refroidissement par un vêtement refroidissant hybride reste à réaliser (Chan, A. P., Zhang, Wang, Wong et Chan, 2017).

Quelques études ont aussi été consacrées à l'optimisation de la conception des vêtements à PCM/ventilateurs pour assurer une meilleure gestion de l'énergie de refroidissement à l'aide d'une couche d'isolation supplémentaire dans la structure du vêtement (Udayraj *et al.*, 2019 ; Zhao, Y., Yi, Chan, Wong et Yam, 2017). Un gilet, formé de deux couches de textile ferme et équipé d'une paire de ventilateurs installée sur le bas du dos et de 8 pochettes de PCM uniformément réparties sur le devant et l'arrière du corps, fut testé lors des phases de repos de sujets masculins en activité dans une chambre climatique chaude et humide. Les résultats de ces tests ont mis en évidence la capacité de la veste hybride à diminuer la T_{c} et la FC de participants et à améliorer leurs perceptions subjectives (Zhao, Y. *et al.*, 2017). Pour l'optimisation d'une combinaison dotée de 2 ventilateurs dans la région du bas du dos de la veste, de 2 ventilateurs dans la région latérale du bassin du pantalon, de 18 pochettes de PCM placées sur le devant et l'arrière de la veste et de 6 pochettes dans la région de la cuisse du pantalon, un feuillet isolant en polyéthylène a été inséré entre les pochettes de PCM et la couche extérieure du vêtement. Les résultats des essais effectués chez des sujets humains en activité dans une chambre climatique chaude et humide ont démontré qu'un tel design pourrait fournir un microclimat relativement frais autour du corps du porteur en minimisant la hausse de la T_{s} moyenne. L'étude suggère l'utilisation d'une telle conception pour des activités physiques modérées dans un environnement chaud grâce à une durée prolongée du refroidissement du PCM assurée avec la présence d'une couche d'isolation supplémentaire (Udayraj *et al.*, 2019). Une étude similaire, considérant la même disposition de 24 pochettes de PCM et de 4 ventilateurs placés dans la veste et dans le pantalon d'une combinaison, a proposé l'intégration d'une couche isolante composée de mousse de polyéthylène sur la surface extérieure des pochettes de PCM pour réduire l'absorption de chaleur de l'environnement chaud et ainsi prolonger la durée d'opération du PCM utilisé. Par la suite, le modèle de thermorégulation de Tanabe, couplé à un modèle de transfert de chaleur et d'humidité à travers le vêtement, a été utilisé pour étudier numériquement les performances de ce nouveau vêtement refroidissant hybride. Selon les analyses numériques paramétriques, la chaleur de l'environnement absorbée par le PCM peut diminuer, grâce à la hausse de la résistance thermique apportée par une couche isolante additionnelle. La validation du modèle par des essais effectués sur des sujets masculins dans une chambre climatique chaude et humide a aussi démontré que la présence d'une couche isolante dans la structure d'un vêtement à PCM/ventilateurs pourrait considérablement réduire la chaleur environnementale absorbée par le PCM.

Ainsi, la durée totale de la fusion du PCM et la durée effective de refroidissement pourraient augmenter (Kang, Wan et Wang, 2018). Il est à noter que la grande majorité des travaux récents portant sur la conception et sur l'évaluation des vêtements refroidissants à PCM/ventilateurs ont utilisé des pochettes de PCM contenant un mélange de sulfate de sodium et d'eau ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), connu sous le nom de sel de Glauber.

Quelques travaux ont également été consacrés à l'analyse numérique des performances des vêtements à PCM/ventilateurs sous différentes conditions. Dans une de ces études, un modèle mathématique a été proposé pour calculer le transfert transitoire de la chaleur et de l'humidité à travers des couches de vêtements incorporant des pochettes de PCM et des ventilateurs. Une fois validé par des expériences réalisées par un prototype placé sur une plaque chauffante, le modèle a été intégré à un modèle de biochauffage, afin de simuler un individu travaillant dans des conditions chaudes et sèches à différents taux métaboliques. Les résultats des simulations numériques ont montré que le fonctionnement des ventilateurs pendant la période transitoire de l'absorption de la sueur par des couches de tissu intérieur peut provoquer des effets de chauffage indésirables et augmenter la fraction fondue du PCM intégré. Toutefois, ces effets indésirables ont été éliminés en faisant fonctionner les ventilateurs après la fin de cette période transitoire pour ainsi atteindre des pertes de chaleur accrues dans la région du torse et, par conséquent, des niveaux de confort et de sensation améliorés aux taux métaboliques testés (Bachnak, Itani, Ghaddar et Ghali, 2018).

Un autre modèle numérique a été proposé (Wan et Wang, 2018) pour analyser le transfert de chaleur et d'humidité à travers une combinaison à PCM/ventilateurs ayant 24 pochettes de PCM et 4 ventilateurs, avec la même disposition décrite dans les travaux de Song et ses collègues (Song et Wang, 2016 ; Song *et al.*, 2016). Pour cela, un modèle de transfert de chaleur et d'humidité des vêtements, couplé à un modèle de thermorégulation humaine multimode, a été élaboré pour déterminer les réponses thermophysiques dans des conditions environnementales dynamiques. Dans ce modèle, les parties couvertes et non couvertes par les pochettes en PCM ont été prises en compte et une méthode de calcul de la capacité thermique apparente fut utilisée pour traiter le comportement du PCM. L'effet barrière contre l'humidité des pochettes de PCM, l'évaporation et la condensation à la surface de ces pochettes ont également été pris en compte dans le modèle. La validation du modèle sur les données issues de l'étude de Song et Wang (Song et Wang, 2016), sur une combinaison à PCM/ventilateurs, a permis de constater que l'absorption de la chaleur de l'environnement externe par les PCM et la condensation de l'humidité sur les surfaces des pochettes de PCM s'avèrent être les deux problèmes majeurs dans les vêtements refroidissants hybrides. Toutefois, une ventilation appropriée pourrait jouer un rôle important dans l'évacuation d'une grande quantité d'humidité et de chaleur latente de ce système vestimentaire (Wan et Wang, 2018). L'évaluation des performances d'une combinaison équipée de 24 pochettes de PCM et de 4 ventilateurs répartis dans la veste et dans le pantalon a également été le sujet d'analyses numériques comprenant la simulation de différents types d'environnements chauds. Selon des analyses numériques sur les valeurs de T_c et T_{sk} , une température

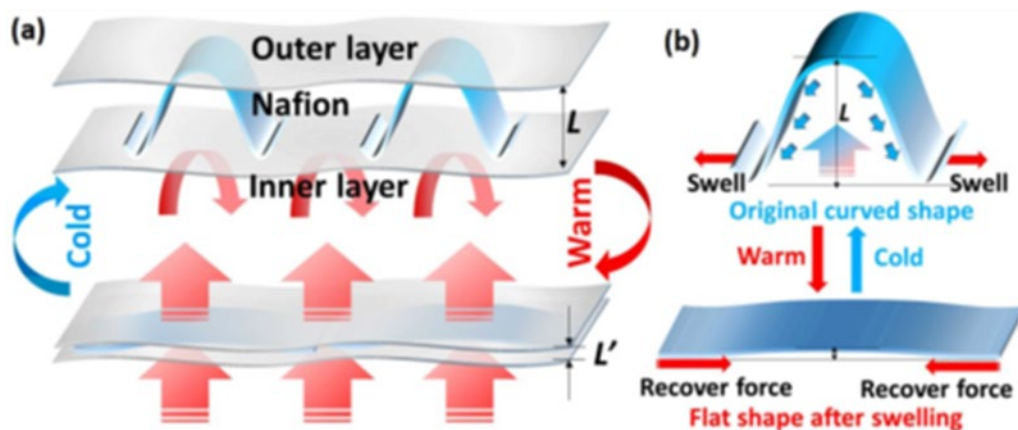
ambiante élevée et une humidité relative élevée ($RH\% \geq 70\%$) affaibliraient les performances d'une telle combinaison. Or, pour une meilleure efficacité de refroidissement dans des conditions de température environnementale ou de $RH\%$ très élevées, les propriétés du PCM utilisé et son degré d'isolation sont à optimiser (Kang, Wan, Wang, Raj et Yang, 2018).

Avec le développement des matériaux avancés et les progrès réalisés dans l'élaboration des textiles conducteurs, ce type de concepts a également été exploité pour la mise en place de stratégies de refroidissement passives dans les structures textiles, par exemple : i) la création du cuir artificiel, ayant une conductivité thermique très élevée, à l'aide d'un mélange de fils de nylon enduits d'argent et de fils de polyester dans une structure laminée utilisant une résine en polyuréthane et en méthyle cellulose (Yang, C., Wang et Li, 2017), ii) la conception de tissu thermiquement conducteur avec des fils conducteurs hybrides faits de fils de polyester combinés à des filaments de cuivre, selon 2 alignements différents (Asghar, Ahmad, Yahya, Hassan et Kashif, 2018), iii) le développement d'un textile thermorégulant à base de fibres composites thermiquement conductrices de 'nitrure de bore'/'poly alcool vinylique', hautement alignées et ayant été synthétisées par impression 3D pour tirer parti des performances thermiques dans le plan du nitrure de bore (Gao *et al.*, 2017), et iv) la simulation numérique par la méthode des éléments finis d'un concept de transfert de chaleur à travers une couche de nanotubes de carbone alignés, intégrable entre deux couches de textile, pour assurer la redirection partielle de la chaleur vers un réservoir froid, dans la conception d'un vêtement de lutte contre l'incendie (Sullivan *et al.*, 2015).

Il a également été rapporté que le mélange de matériaux à changement de phase avec des composants de refroidissement actifs, comme des métaux ou des céramiques hautement conductrices et des alcools solubles encapsulés tels que le xylitol qui refroidissent au contact de la vapeur d'eau, pourrait permettre à un PCM des pertes de chaleur répétées et de ainsi créer un effet semblable à un rechargement de l'effet de refroidissement du PCM pendant l'exposition à la chaleur. Une étude a démontré que le dépôt d'un mélange de PCM/métaux hautement conducteurs sur la surface d'un chandail pourrait permettre l'élaboration d'une couche textile créant un effet de refroidissement à plusieurs étapes (McFarlin, Henning, Venable, Williams et Best Sampson, 2016). Le Nafion® est un copolymère de fluoropolymère à base de tétra fluoro éthylène sulfoné, sélectivement et hautement perméable à l'eau, et il a été le sujet de travaux récents pour l'élaboration d'un vêtement réversiblement sensible à l'humidité pour supporter la thermorégulation personnelle dans les environnements chauds. Pour cela, des structures de textiles intelligents à base de Nafion®, activées par le changement d'humidité, ont été mises au point (figure 21). De telles structures possèdent une capacité de changer rapidement et de manière réversible leur porosité ou leur degré d'isolation thermique en réponse au taux de transpiration de l'individu (Zhong *et al.*, 2017). En effet, une structure imitant les pores de transpiration comprenant un réseau de volets sur un feuillet de Nafion® pouvait répondre à un gradient d'humidité en s'ouvrant ou en se refermant automatiquement pour réguler le flux d'air à travers les pores, permettant ainsi un contrôle

de l'humidité et de la température. Des rubans de Nafion®, insérés entre deux couches à épaisseur variable, ont également démontré une capacité à ajuster l'espace d'air et à modifier l'isolation thermique entre deux couches de tissu (Zhong *et al.*, 2017).

Figure 21. Conception de structure thermiquement adaptable à l'aide des matériaux avancés : (a) Schéma d'une structure intelligente, réversible en épaisseur, utilisant le Nafion comme couche intermédiaire thermiquement adaptable, (b) mécanisme de fonctionnement, en haut : un ruban Nafion arqué s'aplatit et réduit l'épaisseur de la couche d'insertion lorsqu'il est gonflé d'humidité ; en bas : le ruban Nafion fléchit et retrouve son état d'arche d'origine pour offrir une bonne isolation avec une couche d'insertion plus épaisse (Zhong *et al.*, 2017).



Les polymères à mémoire de forme ont également démontré beaucoup de potentiel dans l'élaboration de textiles thermorégulateurs. Ces matériaux sensibles aux stimuli externes possèdent la capacité de mémoriser une forme macroscopique permanente, d'être manipulés et d'être fixés à une forme temporaire dans des conditions spécifiques de sollicitations, puis revenir plus tard à l'état d'origine en n'étant plus soumis à une contrainte thermique, électrique ou environnementale (Hu, Jinlian *et al.*, 2012). Concernant les polymères à mémoire de forme sensibles à la température, de grands changements dans les propriétés thermomécaniques se produisent à travers la température de transition vitreuse de la température du point de fusion des cristaux de leur segment mou. En plus de ces changements, il a également été démontré que ce type de matériaux pouvait présenter des changements de perméabilité à l'humidité au-dessus et en dessous de ce point (Hu, J. et Murugesh babu, 2009). Pour les structures textiles, ce comportement peut être très utile, car ils peuvent fournir une isolation thermique à des températures froides et une perméabilité à une température ambiante élevée (Hu, Jinlian *et al.*, 2012). Ces matériaux sont particulièrement intéressants pour créer des effets de refroidissement. En effet, lorsqu'un textile contenant un polymère à mémoire de forme atteint la température de transition vitreuse, il se transforme en un tissu perméable à la vapeur d'eau et à la chaleur, permettant de dégager la chaleur corporelle après une

activité intense ou une hausse de la température environnementale. Le matériau peut retourner à une structure moins perméable lorsque la température baisse (Jahid, Hu et Zhuo, 2019). Malgré ce potentiel, sa capacité de refroidissement n'est en aucun cas comparable avec celle de techniques présentées dans le tableau 3 (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). L'utilisation récente de textiles contenant des polymères à mémoire de forme dans les produits commerciaux (Jahid *et al.*, 2019) pouvait laisser envisager leur association avec les techniques employées dans la conception de vêtements refroidissants personnels (tableau 3), mais la présente revue de la littérature n'a pu identifier de telles études ; elles doivent donc être rares.

Il convient de souligner que la maturité technologique des systèmes dans les études sur les actuateurs refroidissants à utiliser dans la gestion thermique intelligente se situe majoritairement au niveau 3 (critique analytique, validation du concept) ou 4 (validation de concept ou de modèle en laboratoire). Seule une étude sur les vêtements refroidissants par ventilation atteint un niveau TRL de 6 (essais dans un milieu très représentatif en laboratoire ou en milieu opérationnel simulé). Deux études sur les actuateurs refroidissants par circulation de fluide et deux autres études sur les systèmes refroidissants hybrides s'élèvent à un niveau TRL de 7 (démonstration dans un environnement opérationnel).

4.4.2 Actuateur refroidissant : produits commerciaux

Les vêtements refroidissants disponibles dans le commerce utilisent différentes technologies. Le tableau 4 présente le nombre d'entreprises répertoriées pour chacun des sept types de technologie de refroidissement repérés dans le commerce, dont certains exemples sont aussi illustrés à la figure 22 : les systèmes refroidissants actifs tels que les dispositifs par circulation de fluide refroidissant (liquide et air), les dispositifs par expansion de gaz, les dispositifs par ventilation d'air, les dispositifs thermoélectriques, puis les systèmes refroidissants passifs tels que les matériaux à changement de phase (PCM) et par évaporation, ainsi que des systèmes hybrides utilisant deux technologies. Des tableaux détaillés contenant de l'information technique ont été réalisés et sont disponibles à l'IRSST, sous forme de documents additionnels à ce rapport, comme pour les autres produits commerciaux présentés jusqu'à présent.

Tableau 4. Nombre d'entreprises répertoriées concernant les actuateurs refroidissants utilisés dans la gestion thermique

Type de produit Technologie	Gilet ⁽¹⁾	Veste	Jambières (chaps)	Vêtements divers ⁽²⁾	Gilet balistique	Gants	Casque	Total
Par circulation de liquide	3			2				5
Par circulation d'air	1		1			1		3
Par ventilation d'air	2	1		1			1	5
Par expansion de gaz	1							1
Thermoélectrique				1				1
Par PCM ⁽³⁾	11		1					12
Par évaporation	2			1				3
Système hybride	2				1			3
Total	22	1	2	5	1	1	1	33

Note 1 : Certains produits (3/20) sont vendus exclusivement par des distributeurs.

Note 2 : Les vêtements peuvent être des gilets, shirts, pantalons courts ou longs, leggings, vestes à manches courtes ou longues.

Note 3 : Matériau à changement de phase.

Cinq entreprises ayant développé des systèmes refroidissants actifs par circulation de liquide ont été répertoriées. Le gilet de l'entreprise Compcooler intègre, à même le gilet, une unité de circulation d'eau offrant ainsi une bonne portabilité pour l'utilisateur. Le gilet comprend un réservoir à deux chambres congelable et détachable de 2,5 litres, une mini pompe, une batterie rechargeable et un canal de refroidissement liquide intégré à la doublure en filet du gilet. La batterie rechargeable (7,4 V, 2200 mAh) offre jusqu'à 10 heures de fonctionnement. La température de refroidissement peut être de 2 à 20 °C. Le gilet est muni de sangles sur les côtés pour un meilleur ajustement près du corps. L'entreprise offre différents modèles, notamment un T-shirt accompagné d'une unité de refroidissement pouvant être actionnée par une alimentation de véhicule de 12 V, destiné aux coureurs automobiles. La veste de Med-Eng (figure 22 a), une entreprise canadienne, fonctionne avec une unité de refroidissement qui s'installe facilement dans tous les véhicules offrant une alimentation de 28 V, pour une application militaire. L'unité fournit jusqu'à 1200 W de refroidissement. Le gilet, fabriqué avec un tissu ignifuge, pèse moins de 1 kg lorsqu'il est rempli de liquide. Des déconnexions rapides et sèches à l'unité de refroidissement permettent aux troupes de se déconnecter et de quitter le véhicule rapidement. L'entreprise CoolShirt Systems offre différents systèmes de refroidissement (portables ou non) combinés à des gilets, chandails ou leggings. Le COOLSHIRT® contient un tube capillaire d'environ 50 pieds, de qualité médicale et cousu sur le devant et le dos du chandail, couvrant jusqu'à 40 % du corps. Il est connecté à une unité de refroidissement compacte à l'aide d'un tuyau isolé avec des déconnexions rapides et sèches. L'unité de refroidissement, alimentée par une batterie (7,4 V) contient de la glace, de l'eau et une pompe interne. L'entreprise offre également un système qui peut refroidir jusqu'à six utilisateurs (destiné aux pompiers) à partir d'une seule unité de refroidissement ayant une capacité de 300 watts, 1023 BTU/h. L'entreprise Techniche a développé le

KewlFlow™, un gilet par refroidissement liquide à alimentation électrique pouvant fonctionner avec différentes sources d'énergie (batterie de 12 V ou 110 V de courant alternatif), en version stationnaire ou portable. L'entreprise Polar Products offre la veste Cool Flow® munie de tubulures intégrées dans le gilet, dans lesquelles l'eau est pompée d'un réservoir de refroidissement de 9 litres fonctionnant avec un courant continu de 12 V.

ClimaTech Safety est la seule entreprise répertoriée qui offre des systèmes refroidissants actifs par circulation d'air. Trois produits sont offerts : AirVest™ (gilet, figure 22 b), AirChaps™ (jambières recouvrant les cuisses) et AirGloves™ (gants). Ces systèmes brevetés se connectent à toute source d'air comprimé existante, dans un atelier mécanique par exemple, pour refroidir l'utilisateur. L'air, qui est aspiré et réchauffé par un compresseur (~32 °C), se refroidit dans le réservoir de stockage et est déshumidifié. L'air, maintenant sec et à température ambiante (~21 °C), s'écoule vers le gilet qui est muni d'orifices réglés de manière à expulser l'air à l'intérieur du gilet en faisant chuter la pression et la température de l'air ambiant de 6 °C. Les jambières se connectent directement au gilet. Les gants sont minces, faits pour être portés sous des gants adaptés aux hautes températures et refroidissent directement les mains avec l'air comprimé standard de l'atelier. Le tube souple et flexible des gants fournit l'air tandis qu'un régulateur, fixé à la ceinture, contrôle le flux d'air. Ignifuges et durables pour protéger de l'abrasion, ces produits sont destinés, par exemple, aux peintres, sableurs ou soudeurs.

Quelques produits utilisant la ventilation comme moyen de refroidissement actif ont été répertoriés. L'entreprise Tajima Seiryō a développé un ventilateur puissant à trois vitesses, alimenté par une batterie lithium-ion et qui se présente sous la forme de deux produits : le premier est un système se fixant à l'arrière de la ceinture et se portant sous un vêtement, alors que le deuxième est un système muni de sangles et s'installant autour d'un casque de sécurité, à la base du crâne. Le premier système, soit le ventilateur combiné à un entonnoir en silicone robuste et flexible pouvant se glisser sous un manteau, un chandail ou une veste, permet de faire circuler l'air à l'intérieur du vêtement. Il est muni d'une charnière qui permet au système de suivre les mouvements du corps, pour plus de confort. La batterie (5 500 mAh, AC 9 V/1,4 A) lui permet de fonctionner pendant six heures à vitesse maximale ou 8,5 heures à faible puissance. Le système pour le manteau pèse 1,2 kg. Le deuxième système, pour casque de sécurité et pesant 921 g, permet d'envoyer un flux d'air sous le casque et dans le cou. La batterie lui permet de fonctionner pendant huit heures à vitesse maximale ou 18 heures à faible puissance. D'autres produits se présentent plutôt sous la forme d'une veste ou d'un gilet muni de ventilateurs placés au bas du vêtement sur les côtés. Par exemple, l'entreprise Octocool a développé une veste (figure 22 c) munie de quatre ventilateurs de 97 mm de diamètre, ayant quatre vitesses de ventilation et qui permettent à l'air de circuler dans toute la veste. Ils sont alimentés par une batterie rechargeable, qui peut durer plus de 18 heures sur le réglage le plus bas ou 4,5 heures sur le réglage le plus élevé. La veste d'Octocool est offerte avec manches courtes ou manches longues, et l'entreprise offre également un pantalon muni de deux ventilateurs sur le côté des cuisses. Le gilet *AlphaCool Battery Powered Cooling Vest*, vendu par les distributeurs The Warming Store et My Cooling

Store, est muni de deux ventilateurs de 3 pouces de diamètre ayant une seule vitesse de ventilation. Une batterie (5 V, 2,4 A, 7800 mAh), disposant de deux ports USB, permet d'alimenter le gilet et de charger un autre appareil, comme un téléphone par exemple. Les gilets offerts par l'entreprise Venture Heat sont munis d'un seul ventilateur placé au dos du gilet, en bas, et ayant une ou trois vitesses de ventilation, selon les modèles. Les gilets sont construits en tissu polyester léger et respirant, avec une membrane de style nid d'abeille permettant au flux d'air de se déplacer à travers celle-ci et d'évacuer la transpiration. La batterie (3,7 V, 5000 mAh) permet un refroidissement de 6,5 à 10 h. Contrairement aux autres vêtements/systèmes, plutôt fermés, qui se gonflent sous le flux d'air (Tajima Seiryo, Octocool, AlphaCool), les gilets de Venture Heat sont complètement ouverts sur les côtés, un peu comme un dossard, avec des sangles réglables pour permettre un ajustement autour du tronc. Ils restent donc minces lorsque le ventilateur est allumé.

L'entreprise Porticos, en collaboration avec la NCSU (North Carolina State University), a commencé à développer en 2015 un gilet refroidissant par expansion de gaz, Porticool Cooling Vest v2.0, destiné en premier lieu aux pompiers. Le gilet se compose d'un tube perforé qui dissipe le CO₂ à l'intérieur du gilet, refroidissant l'utilisateur. Peu d'information existe sur internet concernant ce gilet, mais il semble que l'un des défis pour l'équipe de recherche a été de réguler le débit de gaz CO₂ de manière à augmenter la durée du refroidissement.

Figure 22. Exemples d'actuateurs refroidissants disponibles dans le commerce : (a) gilet « Liquid Circulating Garment » basé sur la technologie par circulation de fluide (par Med-Eng Holdings, ULC, Ottawa, ON, Canada), (b) gilet AirVest™ basé sur la technologie par circulation d'air (par ClimaTech Safety, White Stone, VA, É.-U.), (c) manteau « Quad Air Conditioned Light Jacket » muni de 4 ventilateurs (par Octocool, Chiayi City, Taiwan), (d) dispositif thermoélectrique Reon Pocket (par Sony Group Corporation, Tokyo, Japon), (e) gilet haute-visibilité « Series Cooling Kit - Hi-Vis YELLOW (Class 1, Type O) Vest » muni de 96 glaçons d'eau pure agissant comme PCM (par FlexiFreeze, Mequon, WI, É.-U.), (f) gilet Chill-Its® 6687 basé sur un système refroidissant par évaporation (par Ergodyne, Saint Paul, MN, É.-U.).



Le seul dispositif thermoélectrique répertorié utilisant la technologie thermoélectrique basé sur l'effet Peltier est le Reon Pocket de l'entreprise Sony (figure 22 d). Il peut procurer une source de fraîcheur ($\sim 23\text{ }^{\circ}\text{C}$) ou de chaleur ($\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$), selon les besoins. Se glissant dans la poche arrière, à la base du cou, d'un T-shirt spécialement conçu pour le recevoir, le dispositif (54 mm x 116 mm x 20 mm) est relié en Bluetooth au téléphone intelligent et se contrôle par l'intermédiaire d'une application. Rechargé grâce à une batterie lithium-ion, il offre 90 minutes d'autonomie.

Bien que la présente étude se concentre surtout sur les systèmes refroidissants actifs, il reste que plusieurs produits répertoriés dans le commerce emploient des PCM, un système passif, comme technologie de refroidissement (12 produits). La majorité des produits sont des gilets sans manches, offerts le plus souvent en une seule taille (ou sinon deux tailles), et munis de sangles d'ajustement autour du torse pour assurer autant de contact direct que possible avec le corps. Les gilets sont munis des pochettes de PCM à l'avant et au dos. La plupart des entreprises ne donnent pas de détails sur les matériaux à changement de phase utilisés, alléguant que leur matériau est plus léger que l'eau ou les gels congelés, qu'il est plus sécuritaire que l'eau glacée pour la peau qui peut provoquer des engelures, ou qu'il est plus performant. Toutefois, l'entreprise FlexiFreeze utilise l'eau gelée comme principe de refroidissement, mais avec des emballages spécifiques, alléguant que, à poids égal, l'eau est un moyen de refroidissement plus efficace que les gels congelés. Cette entreprise offre un gilet (figure 22 e) doté de 96 glaçons répartis sur le devant et le dos de celui-ci, pesant 1,4 kg. Le produit FlexiFreeze, tout comme le gilet AlphaCool Ice Vest vendu par The Warming Store et utilisant un produit à base d'eau, ont des emballages permettant de ralentir la fusion de la glace. L'entreprise Technique utilise des pochettes contenant un liquide à base de carbone non toxique, non inflammable et non combustible. Globalement, la majorité des gilets répertoriés semblent avoir des propriétés similaires : une température autour de 15 °C, une période de refroidissement de 2 à 3 heures, un temps de réactivation de la capacité refroidissante de 35 à 45 minutes, et un poids variant entre 1,0 et 2,3 kg. Il y a quelques exceptions. Par exemple, les PCM des gilets de AllTuff USA sont disponibles en trois températures de recharge, 5, 15 ou 25 °C. Le gilet d'Ergodyne permet un temps de réactivation de 5 à 15 minutes. Le gilet CM2000 de ClimaTech Safety peut fournir une prolongation de la période de refroidissement, passant de 2 heures (standard) à 4 heures, avec l'ajout d'une autre couche de refroidissement fixée par velcro par-dessus la première couche.

Parmi les produits du commerce utilisant un système refroidissant passif par évaporation de l'eau, trois sont présentés ici. Le premier produit est une combinaison mince, légère et souple, formée d'un chandail sans manche et d'un short, qui a été développée par UNICO Swiss Tex GmbH. Cette combinaison près du corps se porte sous des vêtements. Elle est faite d'un stratifié de trois couches comprenant deux membranes en polyester imperméables, mais respirantes, qui recouvrent un tissu hydrophile (Meyer-Heim *et al.*, 2007). Ce tissu agit comme conteneur pouvant être rempli de 30 à 60 ml d'eau au moyen d'une seringue. Ce système abaisse la température de la peau de 4 °C et l'effet refroidissant peut durer 40 min selon l'activité. Le deuxième produit est le gilet HyperKewl™ PLUS de Technique. Ce gilet est fait de tissu et de fibres spécialisés qui permet une absorption rapide, un stockage stable de l'eau et une bonne évaporation. Il s'active en le trempant dans l'eau, puis en retirant l'excédent. Ce tissu est lavable à la machine et peut fonctionner durant 150 cycles humide/sec. Le troisième produit est le gilet Chill-Its 6687 d'Ergodyne (figure 22 f) à base de nylon, qui agit comme un réservoir pouvant se remplir de 400 à 450 ml d'eau. Avec une technologie brevetée, le gilet libère progressivement l'eau par évaporation de l'intérieur vers l'extérieur, gardant l'utilisateur au frais et au sec.

Comme système refroidissant hybride, l'un des plus intéressants est celui de l'entreprise SurgeCool, qui a développé un gilet utilisant deux technologies : un système refroidissant par circulation de liquide (actif) jumelé à un système refroidissant par gel congelé (passif). Au lieu d'être équipé d'un gros réservoir de glace (stationnaire ou portable) et d'une pompe d'injection, comme la majorité des systèmes refroidissants par circulation de liquide, SurgeCool a remplacé ces éléments par une pochette de polymère gélifiant. Le liquide qui circule dans les tubes du gilet est refroidi à une température entre 18 et 22 °C, par le réchauffement graduel de la pochette réfrigérante, perdant son effet de refroidissement au bout de 2 heures. Cet assemblage des deux technologies permet un effet refroidissant plus global du corps, répartissant d'une certaine façon le froid de la pochette réfrigérante sur l'ensemble du gilet, et de plus longue durée. Le gilet, comportant une seule pochette réfrigérante, peut être porté avec la pochette sur le devant ou sur le dos selon les préférences de travail de l'utilisateur. Le gilet a un poids de moins de 1 kg.

L'entreprise UNICO Swiss Tex GmbH a développé, avec l'Institut de recherche Empa (Suisse), un gilet balistique refroidissant qui utilise aussi deux technologies : un système passif par évaporation et un système actif avec des ventilateurs. Un panneau, Coolpad, est rempli d'eau s'évaporant à travers une membrane, refroidissant ainsi le panneau. Selon l'entreprise, les Coolpads existants n'étaient pas satisfaisants ; étant soumis à de fortes sollicitations mécaniques dans le gilet, ils présentaient souvent des fuites. Une nouvelle technique de soudage par diodes laser a permis de fabriquer des panneaux fins, souples et fiables, évitant les fuites, malgré les sollicitations mécaniques auxquelles ils sont soumis. Deux ventilateurs soufflent de l'air à travers un tricot espaceur placé derrière le Coolpad et assurent une réfrigération supplémentaire. Le tricot espaceur, à la fois stable à la compression et flexible, présentant une faible résistance à l'écoulement d'air, a été développé avec l'entreprise Eschler. Un remplissage d'eau est requis pour environ trois heures d'utilisation. Les deux ventilateurs, rechargeables par une prise ou par l'allume-cigare d'une voiture, peuvent opérer durant trois à quatre heures. Ce gilet balistique a été testé auprès des policiers de la police municipale de Zurich, qui l'ont apprécié. Finalement, l'entreprise Techniche offre également un produit refroidissant hybride, combinant simplement deux systèmes passifs dans un même gilet, soit leur technologie avec PCM, CoolPax™, avec leur technologie par évaporation d'eau, HyperKewl™ PLUS.

De manière générale, la majorité des produits trouvés (85 %) sont destinés aux milieux de travail (travail en extérieur à la chaleur, corps policier, service incendie, ateliers mécaniques, etc.). Les autres produits trouvent leur application dans le domaine médical pour des thérapies par le froid (22 %) ou dans la pratique d'activités de loisirs ou de sport (31 %). Dans cette répartition, certains produits sont destinés à plusieurs domaines d'utilisation. Plusieurs produits sont offerts en matériaux haute visibilité (FlexiFreeze, Techniche, Venture Heat, SurgeCool) ou faits de matériaux ignifuges (PIP - Protective Industrial Products, Glacier Tek, OccuNomix, Techniche, Ergodyne, Compcooler, Med-Eng, CoolShirt Systems, Octocool, ClimaTech Safety, Polar Products). Les produits refroidissants par circulation de liquide coûtent entre 250 et 800 USD. Certains produits

offrant des unités refroidissantes destinées à plusieurs travailleurs à la fois peuvent coûter entre 1300 et 1700 USD. Les prix des produits refroidissant par circulation d'air ou par ventilation se situent entre 100 et 250 USD. Les prix des dispositifs passifs (PCM, évaporation) vont de 40 à 300 USD.

4.5 Analyses de brevets dédiés à la gestion thermique intelligente

En plus des recherches effectuées sur les produits disponibles, la présente étude s'est également intéressée à l'analyse du nombre de demandes de brevets déposées au cours des dix dernières années afin de mieux connaître l'ampleur des développements effectués pour les différents moyens de gestion thermique intelligente. Parmi les différentes bases de données consultées, le bureau européen de brevets permettait l'accès à plus de 120 millions de titres de propriété intellectuelle, tout en offrant un moteur de recherche avancé et détaillé qui comprenait aussi les dépôts de demandes de brevets auprès d'autres bureaux. De ce fait, les données présentées dans cette section ont principalement été extraites par le moteur de recherche de bureau européen de brevets (<https://worldwide.espacenet.com/patent/>), qui représente des titres de propriété intellectuelle déposés à travers le monde, y compris au Canada. Pour mener l'analyse sur le nombre de demandes déposées, les mêmes mots-clés que ceux utilisés pour la recherche bibliographique (voir le tableau 1) ont été pris en compte. Dans un premier temps, une recherche a été réalisée avec chacun des mots-clés principaux en lien avec la gestion thermique intelligente. Par la suite, le même mot-clé principal représentant le moyen technologique à mettre en œuvre fut associé avec différents mots-clés en lien avec les équipements de protection individuels pour ainsi connaître l'abondance des inventions de ce domaine liées aux problématiques en santé et en sécurité du travail. Afin de réaliser une reconstitution plus complète du portrait des demandes déposées, les recherches par des mots-clés ont été menées une fois à travers tous les champs du texte et une deuxième fois dans le paragraphe des revendications des titres d'inventions. Ainsi, les données collectées auront permis de révéler la proportion de brevets pouvant être associée de près ou de loin à la gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels.

Des recherches séparées ont été menées pour chacun des mots-clés utilisés. Toutefois, pour simplifier la présentation des données, les résultats ont été rassemblés par catégorie des moyens technologiques de la gestion thermique intelligente (tableau 5). Selon les données collectées, le plus grand nombre de demandes de brevets au cours des dix dernières années concernent les actuateurs chauffants et refroidissants. Parmi toutes les catégories, les actuateurs chauffants constituent le plus grand nombre d'innovations, avec près de 55 % de l'ensemble des revendications des inventions dans la gestion thermique intelligente et plus de 71 % de l'ensemble des revendications des brevets concernant la thermorégulation intelligente dans les équipements de protection individuels. Selon les données collectées, parmi les divers types d'actuateurs thermiques développés en lien avec les équipements de protection individuels, un nombre important d'actuateurs chauffants et refroidissants semblait être dédié aux gants et aux casques de protection.

Toutefois, malgré le nombre d'actuateurs thermiques développés en lien avec les équipements de protection individuels, seulement 10 % de l'ensemble des revendications des brevets sur la gestion thermique intelligente sont liés à des équipements de protection individuels. Cela s'explique par le fait qu'un ratio très faible des inventions réalisées pour divers types de capteurs flexibles, portables ou intégrés était lié à une application dans les équipements de protection. Par ailleurs, un nombre très limité de titres de propriété intellectuelle était lié à la détection de stress thermique et des revendications d'invention associées à ces titres étaient rares. L'ensemble de ces observations sur les brevets concordent parfaitement avec les recherches réalisées sur les produits commerciaux pour chacune des catégories de moyens technologiques.

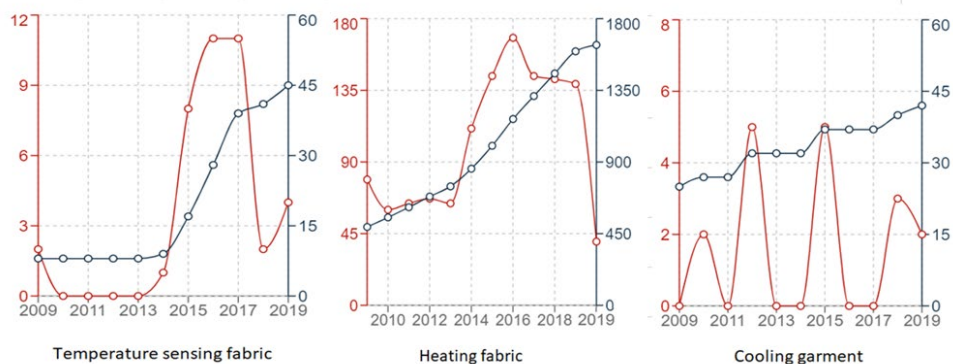
Tableau 5. Analyses du nombre de brevets déposés en lien avec les différents moyens technologiques à mettre en œuvre dans la gestion thermique intelligente

Moyens à mettre en œuvre	Méthode de recherche dans le texte	Nombre de brevets déposés	
		Mots-clés en lien avec la gestion thermique intelligente	Mots-clés principaux combinés aux mots-clés en lien avec les équipements de protection individuels
Détection de stress thermique	TLC ¹ REV²	26 6	8 0
Capteur de température	TLC REV	3084 1021	27 2
Actuateur chauffant	TLC REV	6898 1996	843 264
Actuateur refroidissant	TLC REV	1754 578	581 102

Note 1 : recherche effectuée à travers tous les champs du texte (TLC)

Note 2 : recherche effectuée à travers les revendications des brevets (REV)

Figure 23. Exemples du nombre de brevets en lien avec la gestion thermique intelligente : nombre mondial de brevets annuels (courbe rouge) ou cumulatifs (courbe noire) déposés au cours des dix dernières années pour les mots-clés « Temperature sensing fabric », « Heating fabric » et « Cooling fabric », à partir de la recherche effectuée dans tous les champs du texte (source : bureau européen de brevets).



5. DISCUSSION

Afin d'établir une meilleure connaissance des systèmes de gestion thermique intelligents pouvant être intégrés dans les équipements de protection individuels, la présente étude a examiné de près les systèmes actuellement disponibles dans le commerce aussi bien que les travaux de recherche effectués au cours des dix dernières années et rapportés dans la littérature scientifique. Au vu de l'état actuel des connaissances, les dispositifs portables pouvant être utilisés en combinaison avec des équipements de protection individuels ont également été analysés. À travers cette analyse, les avantages et les limites de ces développements ont été présentés. Afin de clarifier l'écart nécessaire à combler pour faciliter l'adaptation et l'intégration de ces systèmes à des équipements de protection individuels, leurs lacunes technologiques sont synthétisées dans la présente section, en mettant l'accent sur leurs utilisations potentielles en santé et en sécurité du travail. À l'aide d'une analyse qualitative, quelques perspectives de travaux futurs sont également présentées.

5.1 Détection de stress thermiques

D'après la revue de la littérature réalisée dans le cadre de la présente étude, très peu de travaux ont été dédiés à la mise en œuvre des dispositifs permettant la détection du stress thermique en temps réel. Plusieurs méthodes de calcul empiriques du stress thermique ont été mises au point au cours des dernières décennies. Certains modèles comme l'indice de stress thermique (HSI) prenant en compte des variables environnementales et l'activité corporelle se sont avérés limités dans certaines situations, et leurs calculs compliqués en raison de l'implication de nombreuses variables. Des modèles de calcul plus récents comme l'indice cumulatif de contrainte thermique (CHSI) et l'indice de contrainte physiologique (PSI) prenant en compte des paramètres physiologiques tels que la T_{rec} et la FC, présentent un meilleur potentiel pour faciliter la détection de la survenue d'une situation de stress thermique à l'aide de dispositifs portables et connectés. Toutefois, l'utilisation d'un thermomètre rectal, nécessaire pour alimenter ces modèles, est loin d'être pratique en situation de travail. Par ailleurs, la pilule télémétrique avalable permettant de mesurer en temps réel la température de l'appareil digestif pour remplacer la valeur de la T_{rec} , reste une méthode intrusive. Une telle technologie reste limitée à des séances d'entraînement de certains corps de métier comme les pompiers ou leur suivi lors d'opérations périlleuses.

Certaines modifications apportées au modèle de confort thermophysique de Berkeley (BTCM), prenant en compte la valeur de T_s pour évaluer le stress thermique, ou les versions modifiées de l'indice PSI considérant la T_s au lieu de la T_{rec} , reposent sur un paramètre difficile à mesurer avec des thermomètres de grades médicaux à plusieurs endroits du corps au cours d'un travail actif. Des capteurs de température portables, mesurant la T_s , peuvent être utiles pour servir le calcul de tels indices, toutefois ce type d'approche n'a pas encore été évalué dans la littérature et reste à explorer. Par ailleurs, la

mesure en temps réel de la T_s requiert la maîtrise de plusieurs paramètres qui seront discutés plus loin dans la section portant sur les capteurs thermiques. L'estimation de la température centrale du corps (T_c), à partir de la FC, pourrait aussi constituer une approche très intéressante pour remplacer la mesure de la T_{rec} nécessaire au calcul empirique du stress thermique. À ce jour, l'utilisation de la T_c , extraite de la FC pour le calcul de l'indice PSI, n'a été validée que pour des phases spécifiques comme le repos. Les défis inhérents au calcul de la T_c en utilisant la FC seront aussi détaillés dans une section ultérieure concernant les capteurs thermiques. D'un point de vue général, la majorité des travaux sur la validation de modèles ou d'indices de détection du stress thermique ont été effectués sur un groupe d'âge particulier, un sexe donné, dans des conditions contrôlées ou spécifiques à une activité. Par ailleurs, dans leur état actuel, ces indices sont plutôt capables de détecter l'occurrence d'une situation de stress thermique et aucun d'entre eux ne permet une prédiction à partir de signes avant-coureurs du stress thermique. En plus des études sur les indices, certaines études ont analysé les paramètres physiologiques dans des situations menant à un stress thermique à l'aide de mesures en temps réel. Pourtant, aucune de ces études analytiques n'a mené à l'élaboration de modèles universels.

En outre, la majorité des études de ce domaine, utilisant des technologies portables dotées de capteurs physiologiques, s'est concentrée sur l'évaluation des dispositifs dans la surveillance de l'état des individus dans des conditions climatiques difficiles. Bien que la validation des produits disponibles dans le commerce ou des prototypes élaborés pour le suivi de l'état physiologique sous des contraintes thermiques soit importante, ces travaux n'ont pourtant pas été poussés jusqu'à l'élaboration d'outils préventifs. En effet, très peu d'études ont été consacrées à l'élaboration de systèmes permettant la prévention du stress thermique en temps réel ou, du moins, à la signalisation de son occurrence à l'aide des technologies portables. Dans leur grande majorité, ces développements sont basés sur un réseau de capteurs intégrés dans des vêtements intelligents, permettant de collecter un ensemble de données multiparamétriques qui sont, par la suite, traitées par un algorithme pour déclencher des alertes aux individus lorsqu'un certain seuil de contrainte thermique est atteint. Malgré les avancées réalisées dans ces études, les systèmes proposés montrent quelques limites en matière d'efficacité dans certaines gammes de température et en matière de durabilité à l'usage et à l'entretien causée par une conception basée sur un réseau d'électronique rigide intégré. En plus des travaux nécessaires à leur optimisation, ces dispositifs et les algorithmes associés doivent encore être évalués dans d'autres conditions de tests et dans des environnements opérationnels.

L'étude s'est aussi concentrée sur les produits commerciaux permettant la détection du stress thermique et ceux mesurant en temps réel des paramètres physiologiques pouvant alimenter le calcul des indices et les modèles mathématiques connexes. Une attention particulière a été portée aux dispositifs électroniques portables permettant de suivre en temps réel l'activité cardiovasculaire comme astreinte thermique. Malgré l'abondance des accessoires portables permettant la mesure de l'activité du cœur par la méthode PPG, ces types de systèmes ont été écartés des analyses. Ce choix se justifie par diverses

sources d'erreurs de mesure inhérentes à la technologie PPG, et plus particulièrement des erreurs manifestes dans certaines conditions physiques comme l'hypovolémie, qui survient avec l'hypertension, la déshydratation ou la brûlure. Ces erreurs rendent les systèmes PPG encore moins fiables pour mesurer l'activité cardiaque lors de l'exposition à une contrainte thermique. Dès lors, la présente étude a principalement retenu les dispositifs portables équipés d'électrodes cutanées de type ECG. En permettant une mesure directe de l'activité électrique du cœur, l'ECG est considéré comme le standard médical pour obtenir la forme d'onde d'activité cardiaque. Par ailleurs, les informations détaillées qui sont fournies par l'ECG peuvent être très avantageuses dans la prévention des conséquences de l'exposition à une situation de stress thermique.

Or, la présente revue a pu mettre en évidence trois configurations principales de dispositifs portables ayant des capteurs ECG, soit les sangles pectorales connectées, les vêtements intelligents et les patchs électroniques connectés. Ces dispositifs permettent d'enregistrer les signaux biométriques et de les communiquer pour l'interprétation et par la suite la présentation de données par des appareils de lectures. Parmi l'éventail de produits commerciaux disponibles, l'étude a identifié un seul produit destiné à la détection de stress thermique en temps réel, le dispositif Kenzen. S'agissant d'un patch intelligent, ce produit prend en compte la FC, le taux de sudation, l'intensité de l'activité et une valeur de T_c calculé à partir de la FC pour établir un seuil de stress thermique à ne pas dépasser. Annoncé comme étant disponible depuis 2019, ce produit requiert cependant des tests de validation par des experts en santé et en sécurité du travail pour approuver sa fiabilité. Certains dispositifs portables de détection de signaux biométriques (sangles, chandails ou patchs) permettent de mesurer simultanément plusieurs paramètres utiles à la détection du stress thermique. De tels systèmes peuvent constituer la base de futurs développements pour étendre leur application à la détection du stress thermique. Toutefois, la fiabilité de ces capteurs reste à valider, d'autant plus que peu de produits ont obtenu des certifications de conformité à un usage médical à ce jour. Afin de préserver l'ossature actuelle du dispositif portable pour la détection du stress thermique, il faudrait que des plateformes accessibles pour l'exploitation des données brutes soient mises à la disposition des experts souhaitant développer des outils de détection ou de prévention de stress thermique. Des produits offrant actuellement une interface de programmation publique (API) pour une plus grande liberté de l'utilisateur dans l'exploitation des données collectées sont bien avantageux dans ce contexte.

Pour minimiser les bruits du mouvement du corps dans les signaux, les chandails biométriques et les sangles pectorales utilisent des designs ajustés ou des points anti-glissement. Ces designs peuvent devenir inconfortables lors d'utilisation continue prolongée au travail. Afin d'assurer une meilleure détection de signaux, certains manufacturiers de sangles pectorales ou de chandails biométriques proposent de mouiller les électrodes avant leur utilisation pour garantir une meilleure adhérence à la peau. Cette approche est loin d'être pratique pour une utilisation quotidienne et peut devenir très vite un fardeau pour un travailleur. Des travaux d'optimisation sur le design de ces vêtements et accessoires biométriques seraient nécessaires de manière à introduire des pressions

ajustées et localisées. Autrement, les résultats des travaux de recherche récents dans la conception de nouveaux types d'électrodes sèches (Acar *et al.*, 2019) peuvent être envisagés pour améliorer le contact entre les électrodes et la peau. L'utilisation des patches connectés, capables de mesurer les paramètres physiologiques, peut constituer une solution accessible et plus simple à déployer pour un meilleur confort des travailleurs. Toutefois, les patches intelligents exigent une préparation bien précise de la peau avant leur utilisation et une rigueur élevée dans leur positionnement sur la peau pour assurer une bonne lecture. Leur implémentation dans un contexte de travail nécessiterait alors la mise en place de certaines pratiques bien précises. Parmi les divers dispositifs portables recensés, les appareils intra-auriculaires dotés de plusieurs capteurs présentent un très grand potentiel de par la simplicité de leur usage et la multitude de paramètres qu'ils peuvent détecter. Étant basés sur une technologie relativement récente, ces appareils intra-auriculaires ont toutefois montré certaines lacunes en termes d'erreurs de mesure induites par des mouvements du corps. Des travaux d'optimisation sont donc nécessaires en matière de design ou d'algorithmes d'interprétation de données.

5.2 Capteur de température

L'étude s'est principalement intéressée aux travaux de recherche et aux produits commerciaux permettant de mesurer la T_s et la T_c , et les capteurs intégrables dans les équipements de protection pour mesurer le microclimat sous le vêtement ou la température environnementale afin d'émettre des avertissements en cas de contrainte thermique très élevée. Bien que la thermométrie rectale soit la méthode la plus précise pour mesurer la température corporelle, et que sa valeur soit également reconnue comme étant la plus représentative de la T_c , cette méthode est très intrusive et son utilisation est loin d'être pratique pour le suivi des personnes en activités. Afin de mesurer la température corporelle, divers types de capteurs électriques analogiques ou numériques, dont les systèmes portables, ont été déployés durant les dernières années. Pour mesurer la T_s , des capteurs commerciaux ont été utilisés afin de mettre en place des systèmes connectés permettant de communiquer les lectures à l'aide de différents protocoles de communication sans fil. Certains capteurs mesurant la T_s ont été associés à des capteurs de la FC ou de RH%. Il s'avère qu'à une exception près, tous les travaux sur l'élaboration de capteurs de température portables étaient limités à des tests de validation de concept en laboratoire et sur très peu de sujets humains. Des études complémentaires sont nécessaires, d'autant plus que la mesure directe de la T_s est influencée par de nombreux paramètres parfois difficiles à maîtriser. En effet, l'état de la peau, la température ambiante, les conditions environnementales, les dimensions du capteur, son mauvais positionnement et les contraintes mécaniques, etc. peuvent entraîner des conclusions erronées. Il est donc nécessaire de valider la mesure des capteurs T_s sous différentes conditions, en particulier lorsque le gradient de température de la peau à l'environnement devient important et des changements relativement rapides de T_s sont attendus (MacRae *et al.*, 2018).

Parmi les dispositifs portables connectés, les appareils intra-auriculaires présentent une nouvelle tendance technologique qui semble apporter une solution peu intrusive et simple à déployer pour mesurer la température corporelle. Toutefois, des travaux de recherche ont mis en évidence les lacunes de ces systèmes, même au niveau des produits commercialisés. En plus des fluctuations des mesures constatées lors des périodes de non-équilibre thermique, les paramètres environnementaux semblent grandement influencer les mesures de T_s , de T_c et de la température environnementale. Des appareils commerciaux testés n'ont pas été jugés adéquats pour les activités intenses, car les mesures semblaient être grandement influencées par les mouvements du corps ou par un mauvais placement du capteur sur l'oreille. Comme pour les appareils intra-auriculaires mesurant les signaux biométriques, d'importants efforts d'optimisation sont encore nécessaires. En outre, les travaux mettant en place des dispositifs non intrusifs à double capteur pour faire une estimation de la T_c , ou les études exploratoires développant des capteurs à micro-ondes, n'assurent pas une transmission sans fils des données. Ces méthodes semblent plutôt destinées au domaine médical et nécessitent aussi des efforts de miniaturisation pour une éventuelle adaptation aux appareils portables. La pilule télémetrique avalable, capable de mesurer et de communiquer la température de l'appareil digestif en temps réel, reste une méthode intrusive et peu pratique à mettre en place pour une activité quotidienne au travail, d'autant plus que ses mesures semblent affectées par l'ingestion de breuvages chauds ou froids.

Or, pour pallier les problèmes liés aux méthodes d'obtention de la T_c , certaines études ont mis en place des algorithmes et des modèles mathématiques basés sur des paramètres mesurables en temps réel comme la FC ou la T_s pour tenter de faire une estimation indirecte de la T_c . D'une part, certains modèles mettant en corrélation la T_s et la T_c ont montré de grandes divergences entre la valeur calculée de T_c et les valeurs mesurées dans l'appareil digestif. D'autre part, d'autres modèles procurant de meilleurs résultats nécessitaient l'enregistrement de la T_s à plus de dix endroits sur le corps, ce qui est difficilement applicable pour un suivi en temps réel dans un environnement de travail. Plusieurs modèles et algorithmes avec des versions optimisées ont été proposés dans des travaux qui ont tenté de calculer la T_c à partir de la FC mesurable en temps réel par des dispositifs portables. Une partie de ces modèles n'ont été validés que dans une gamme de température ou dans des phases spécifiques (ex. le repos après une activité). Les modèles ayant démontré un assez bon accord entre les données calculées par le modèle et les températures prélevées, nécessitent encore des travaux de validation sur des groupes élargis de personnes de différents âges, de différents sexes et de formes physiques différentes. En somme, les calculs basés sur la FC et la T_s restent encore un défi technologique. Cela est principalement dû aux facteurs externes qui peuvent affecter les signes physiologiques, ce qui rend difficile l'obtention d'une corrélation directe entre ces variables qui ne dépendent que des mécanismes de thermorégulation physiologiques humains (Dias et Cunha, 2018). En outre, des phénomènes comme l'évaporation de la sueur peuvent dégrader la relation théorique établie entre la T_c et la T_s (Khan *et al.*, 2016). S'agissant d'une méthode assez simple à implémenter dans les milieux de travail, des efforts sont nécessaires pour optimiser ces méthodes de calcul indirectes de la T_c .

La présente étude s'est aussi intéressée aux capteurs de température intégrables dans les textiles. Alors que de nombreux travaux sont dédiés à la conception de capteurs de température à base de textiles intelligents et d'électroniques flexibles, un nombre très limité d'études sur les capteurs intégrés aux vêtements a été identifié. Une approche hybride a notamment été proposée pour intégrer des thermistances rigides dans une matrice flexible dans la structure du textile. Malgré plusieurs travaux en lien avec les thermistances intégrées, une partie des prototypes manquent de solidité mécanique, tandis que d'autres nécessitent des optimisations concernant la précision de détection. Une autre méthode a été de concevoir des capteurs fibreux de type RTD ou thermocouples. Selon les études analysées, les thermocouples fibreux nécessitent d'importants travaux d'optimisation, car en plus d'une faible sensibilité et d'une précision de mesure basse, ils se sont montrés sensibles à l'humidité de l'environnement. Bien que les RTD textiles développés dans les travaux examinés assuraient une meilleure précision, une plus grande sensibilité et un temps de réponse plus court par rapport aux thermocouples textiles, ces capteurs n'étaient pas en mesure de fournir des mesures de température localisées. Dès lors, l'utilisation des RTD textiles pour mesurer des températures de micro ou macro environnements reste à valider. L'intégration de fibres optiques de type réflecteur de Bragg pour mesurer la température corporelle ayant permis de hautes précisions est loin d'être applicable à un dispositif portable, car de tels concepts nécessitent une connexion à des systèmes optiques fixes. Le même constat est valide pour les concepts qui ont intégré des capteurs de flux de chaleur dans des structures textiles. Étant destinés à être intégrés à terme dans des vêtements, les capteurs de température textiles ont besoin d'être validés d'un point de vue de résistance mécanique ou de résistance au lavage dans le cadre des travaux futurs.

Les experts de l'électronique flexible se sont largement intéressés à l'élaboration de capteurs de température sur des substrats flexibles de type polymériques. Des couches de graphène déposées sur des substrats flexibles ont démontré des propriétés RTD de très haute sensibilité à la température. Cependant, dans une configuration extensible, les couches de graphène RTD ont illustré des propriétés thermiques sensibles à des déformations mécaniques. Des couches ayant des propriétés RTD ont également été élaborées sur des substrats flexibles en déposant différents types de dispersion (à base de carbone, d'oxyde de nickel, de complexe d'argent et de mélange de PEDOT-PSS avec des nanotubes de carbone) à l'aide de techniques d'impression. Ces couches imprimées thermosensibles ont pu assurer une haute sensibilité à la température, tout en démontrant de faibles hystérésis dans les cycles de chauffage-refroidissement. La formation de couches composites sur des substrats flexibles a également permis de fabriquer des capteurs de température flexibles. Parmi les divers développements, des couches composites à base de nanotubes de carbone ont permis d'obtenir des sensibilités thermiques comparables à celles des métaux. Toutefois, dans de nombreuses études sur les couches composites, des électrodes à base de métaux précieux comme l'or ont été utilisées. Malgré les avantages de certains concepts concernant les capteurs de température flexibles, d'importants efforts sont nécessaires pour les intégrer dans des vêtements. D'un point de vue général, les travaux sur les capteurs de température

intégrés dans les textiles, les capteurs textiles et les capteurs de température flexibles semblent demeurer au niveau de la preuve de concept avec très peu de démonstrateurs de dispositif connecté et encore moins de prototypes de vêtements équipés de capteurs de température. En outre, l'influence de divers paramètres environnementaux sur la performance de ces types de capteurs reste inconnue.

Parmi les quelques études portant sur la conception de vêtements avec des capteurs de température intégrés, certaines ont proposé des solutions pour les équipements de protection dotés de capteurs. Toutefois, l'ensemble de ces travaux étaient limités aux études de laboratoires, avec des tests effectués sur très peu de sujets. L'utilisation des fils électriques conventionnels pour établir les connexions dans certains prototypes est à remplacer par du textile conducteur pour assurer une meilleure résistance mécanique à l'usage. Des travaux d'optimisation sont également nécessaires pour les vêtements qui intègrent des thermistances rigides incorporées dans des fibres textiles afin de réduire l'impact des contraintes mécaniques sur les lectures du capteur. Des modèles théoriques proposant une architecture de réseau de capteurs à intégrer dans un équipement de protection en fonction des tâches à accomplir peuvent être étendus à divers secteurs de travail. La littérature mentionne également l'influence de la structure fibreuse entourant le capteur sur la lecture effectuée (Lugoda, Pasindu, Hughes-Riley, Morris, *et al.*, 2018). Non seulement peu d'études ont été effectuées dans ce registre, mais une connaissance approfondie de l'influence des structures multicouches de divers types d'équipements de protection sur les performances des capteurs intégrés reste à développer.

Concernant les produits commerciaux permettant de mesurer la température en temps réel, les capteurs de température flexibles offrent de grandes précisions de mesure, des temps de réponses très rapides et ne requièrent que de faibles puissances d'alimentation. Toutefois, ils sont plutôt destinés aux domaines du transport et de la logistique, et leur utilisation dans une structure textile de type équipement de protection exige encore des travaux de recherche. Comme dans la revue de la littérature, un nombre limité de produits basés sur les capteurs de température intégrés dans les vêtements a pu être identifié. Une grande partie de ces développements sont dédiés aux équipements de protection de pompier incorporant des capteurs de température avec la capacité de signalement des seuils de température à l'intérieur ou à l'extérieur de la combinaison à ne pas dépasser. Chaque combinaison semble proposer sa propre gamme de température critique qui dépend de la structure et des performances coupe-feu du vêtement de protection. Toutefois, ces gammes de température sont fixes et ne prennent pas en compte la situation personnelle du pompier. Certains produits, ayant des structures textiles incluant des capteurs de température, sont destinés au domaine de la santé et ils doivent encore être validés dans un contexte de santé et de sécurité du travail. Divers capteurs de température portables et connectés permettant de mesurer principalement la T_s ont également été identifiés dans la présente étude. Ces dispositifs sous forme de sangles pectorales, de patches ou de bracelets connectés, qui utilisent différentes technologies de détection, doivent encore être validés pour leur utilisation dans les milieux de travail. Il est aussi à noter que la majorité des dispositifs portables sont à placer sur le torse ou autour

du poignet, alors qu'aucun produit permettant de mesurer la température des extrémités a pu être recensé. La valeur de la T_s peut fournir une bonne indication de l'état de la personne. Cependant, les dispositifs portables possédant plusieurs capteurs pour la collecte d'un ensemble de données multiparamétriques seraient à privilégier pour mettre en place des outils de prévention de stress thermique.

La quantité importante de données générées au cours des prochaines années, grâce à l'abondance de divers capteurs portables et connectés et à l'exploitation de ces données, devra certainement permettre d'optimiser les moyens de mesure, de mieux fournir les algorithmes de systèmes proposant l'estimation indirecte de la T_c et de mettre davantage en pratique les techniques d'apprentissage automatique pour l'obtention de valeurs plus précises. Puisqu'il s'agit de collectes de données physiologiques, une attention particulière doit également être portée à la préservation de la confidentialité et à la non-divulgaration de données personnelles des travailleurs. Dans cette optique, les données collectées pourraient être cryptées et recevoir des codes d'identification afin de ne pas divulguer l'identité des personnes.

5.3 Actuateur chauffant

Parmi les différentes catégories de vêtements chauffants qui ont pour vocation d'offrir un meilleur confort lors d'activités dans le froid extrême, la présente étude s'est particulièrement intéressée aux vêtements chauffants électriques fournissant une chaleur continue dans la limite de leurs sources d'énergie, tout en offrant la possibilité de mettre au point des structures peu encombrantes avec une épaisseur réduite. Les vêtements chauffants à base de flux de fluides n'ont pas été pris en compte dans la présente étude, car ils sont très encombrants et plutôt destinés aux chirurgies médicales. De même, les vêtements chauffants à PCM ont également été écartés des analyses détaillées de cette étude. Ce choix s'explique par l'effet de chauffage temporaire d'éléments chauffants à base de PCM, l'effet thermique faible et les problèmes de durabilité des PCM microencapsulés enduits sur le textile, ainsi que le poids élevé et la réduction de l'évacuation de la sueur dans des vêtements à base de pochettes de PCM. Par conséquent, d'importants travaux sont encore nécessaires pour obtenir un effet de chaleur soutenu par les vêtements à PCM.

Afin de contourner les inconvénients de l'utilisation conventionnelle de fils électriques chauffants, des éléments chauffants à base de fibres textiles conductrices ont été élaborés durant les dernières années. Dans ce cadre, plusieurs méthodes ont été proposées pour concevoir des éléments chauffants à partir de fils textiles métalliques (fibres enduites par une composition contenant des particules métalliques) ou à base de compositions métalliques (c.-à-d. à base de fibre de cuivre, d'acier, d'argent, etc.). Cependant, l'analyse des travaux de recherche a permis de constater que l'obtention de tels éléments chauffants textiles nécessite la maîtrise de nombreux paramètres. Concernant les éléments chauffants conçus avec la broderie des fils (textiles) métalliques, le nombre de passages de fil, l'espacement entre les fils et la composition du tissu de

base impactent la température de chauffage et le niveau de puissance électrique nécessaire. Malgré les avantages des éléments chauffants brodés avec des fils métalliques en matière de consommations énergétiques, des travaux de recherche sont encore nécessaires pour mieux maîtriser l'influence de la teneur en fibres du substrat de base, et l'élargissement de la taille de ces éléments chauffants. Malgré les avantages d'une structure flexible et étirable des éléments chauffants tricotés, leur conception constitue également un défi technologique. Il s'est avéré que l'effet thermique obtenu dans des tricotés chauffants dépend du type de fil conducteur, de ses propriétés mécaniques, de la structure du tricot, de la méthode de tricotage, de la composition de fibres textiles entourant le fil conducteur dans le tricot et du nombre de pli dans une éventuelle structure multicouche. Il a également été démontré qu'avec un design adéquat et des fils conducteurs de résistance électrique appropriés, des éléments chauffants tricotés exigeant une alimentation de faible puissance électrique pouvaient être développés. Dans une éventuelle démarche d'intégration d'éléments chauffants tricotés dans un équipement de protection, une attention particulière doit être portée sur de tels paramètres, notamment la structure et la composition des couches constituant le vêtement de travail.

Afin de faciliter la conception d'éléments chauffants électriques à base de fils textiles métalliques, certains modèles mathématiques ont été développés pour prédire le comportement thermoélectrique des tissus ou tricotés chauffants. Avec ces modèles, la température maximale de chauffage à l'équilibre et le temps nécessaire pour l'atteindre peuvent être calculés à partir des propriétés thermiques et structurales du tissu et les caractéristiques électriques des fils conducteurs. Toutefois, ces modèles ayant été appliqués à des types spécifiques de fils conducteurs ou de tissus, leur applicabilité dans la conception des équipements de protection avec des compositions et structures particulières reste à valider. D'un point de vue général, très peu de travaux ont abordé la durabilité et la caractérisation du comportement électromécanique des éléments chauffants électriques à base de fils textiles métalliques. Pourtant, de telles informations techniques sont nécessaires aux démarches d'intégration de ces éléments chauffants dans les équipements de protection.

Des éléments chauffants avec des designs versatiles peuvent être formés à la surface des substrats flexibles à l'aide de techniques de revêtement. Les couches déposées à base de particules d'argent permettent d'assurer une faible consommation énergétique et des temps très courts pour atteindre la température maximale à l'équilibre. Pourtant, leur faible durabilité au lavage peut constituer une lacune très importante. De plus, les couches à base de nanofilaments d'argent présentent une faible stabilité à l'air ambiant. Des techniques d'encapsulation seraient donc nécessaires à leur protection dans une éventuelle démarche d'intégration dans les équipements de protection. Malgré la flexibilité et la légèreté offertes par les couches déposées à base de polymères conducteurs et leur capacité à fournir une chaleur stable à des températures élevées, elles demandent une consommation énergétique assez importante et présentent certaines défaillances d'un point de vue de la résistance mécanique. Par ailleurs, les fibres de carbone ont été le

sujet d'intérêt de travaux de recherche ainsi que de nombreux développements industriels au cours des dernières années. En effet, en raison d'un bon rendement thermique, d'une atteinte rapide d'une chaleur uniforme, d'une récupération rapide de la température initiale lorsque l'alimentation électrique est coupée et d'un taux de conversion de l'électricité très élevé, les éléments chauffants à base de fibres de carbone sont des candidats idéaux dans la mise en place d'un contrôle précis de la température. Toutefois, d'autres recherches sont nécessaires afin d'optimiser la résistance au lavage et la consommation énergétique des éléments chauffants à base de fibres de carbone.

Malgré le nombre important d'études dédiées à l'élaboration de nouveaux types d'éléments chauffants, les travaux sur la conception ou sur l'efficacité des vêtements chauffants sont peu nombreux. Par ailleurs, rares sont les études consacrées à l'utilisation des vêtements chauffants dans un contexte de travail ou à l'élaboration d'équipements de protection dotés d'éléments chauffants. En effet, la grande majorité des études ont été effectuées en laboratoire avec peu de sujets humains. Comme certaines études ont souligné une différence de sensation de confort exprimée entre les sujets homme et femme lors de l'utilisation de vêtement chauffant, plus de recherches sont également nécessaires afin de définir les conditions optimales de chauffage. En se basant sur les résultats des études antérieures, l'impact des facteurs tels que la combinaison du vêtement chauffant avec d'autres habits ou les conditions environnementales sur la performance du vêtement chauffant dans un milieu de travail sont à étudier afin d'obtenir le meilleur rendement thermique possible. En étendant les travaux de recherche sur les gants chauffants (électriques) conventionnels, l'influence de la structure de l'élément chauffant ainsi que le design d'un gant de protection doté d'éléments chauffants sur la dextérité des doigts, reste à étudier.

Afin de répondre aux limites des vêtements chauffants (électriques) conventionnels et d'offrir plus de confort dans l'exécution des tâches lors des activités dans le froid, le concept des vêtements autorégulateurs de la température a également été le sujet de certaines études. Un des concepts proposés a été d'ajuster la température de l'élément chauffant à l'aide d'un microcontrôleur permettant de réactiver le système lorsque la température de chauffage descendait en dessous d'un seuil prédéfini. Un autre concept fut l'élaboration d'un système autorégulateur de température de l'élément chauffant basé sur la rétroaction de la valeur de la T_s , pour offrir une réponse plus appropriée à la situation personnelle de l'individu. Cependant, des études analytiques suggèrent que l'autorégulation de la température des éléments chauffants à partir des valeurs de la température cutanée ou de la température microenvironnementale sous le vêtement ne suffit pas pour répondre aux exigences d'une exposition à des températures complexes, où les effets thermiques ambiants ou les conditions corporelles jouent aussi un rôle important. Dans l'état actuel des connaissances, l'association d'un système autorégulateur de température à un système de contrôle laissé entre les mains de l'utilisateur a été préconisée. En effet, l'évaluation de l'efficacité des vêtements chauffants autorégulateurs de température pour une application dans les milieux de travail requiert d'importants efforts de recherche. En outre, l'association des éléments chauffants

électriques avec des panneaux chauffants réactifs aux ondes d'infrarouges lointains ou d'éléments chauffants à base de PCM pour assurer une meilleure efficacité de consommation énergétique proposée dans la littérature est un des concepts qui restent à explorer dans la structure d'un équipement de protection, dans un contexte de travail actif. L'association des matériaux à mémoire de forme, sensibles à la température, avec des éléments chauffants électriques permettant la mise en place de textiles ayant des propriétés d'isolation variable avec le niveau de chauffage, utilisé comme moyen pour contrôler le degré d'isolation globale du tissu, est un autre concept qui pourrait être appliqué aux équipements de protection pour offrir une meilleure protection au travailleur.

Comme pour la revue de la littérature, la recherche sur les produits contenant des actuateurs chauffants s'est principalement concentrée sur les vêtements chauffants électriques. S'agissant d'un courant technologique dominant et d'une forte concurrence industrielle entre les divers joueurs de ce secteur, un certain nombre d'entreprises n'apporte aucune information concernant la technologie utilisée dans la conception des éléments chauffants électriques de leurs produits. Malgré toutes les limites connues chez les éléments chauffants à base de fils électriques, cette technologie semble toujours attirer l'attention d'un nombre important de manufacturiers en raison de la simplicité de sa mise en œuvre. Toutefois, en raison des avantages de l'utilisation des fibres de carbone dans la conception des éléments chauffants, cette catégorie technologique semble constituer la nouvelle tendance auprès des manufacturiers. Les éléments chauffants à caractéristiques PTC constituent aussi une catégorie technologique qui connaît un essor en raison de sa capacité à autoréguler la température de chauffage à un niveau spécifique. En raison de nombreux avantages comme une réponse rapide aux commandes de changements de température, un bon rendement thermique et une capacité de chauffage uniforme, etc., les éléments chauffants à base de fibres de carbone ou de couches à caractéristiques PTC peuvent composer la base de futurs travaux concernant l'intégration d'éléments chauffants dans les équipements de protection individuels.

L'analyse des produits commerciaux a, par ailleurs, permis de constater que de plus en plus de vêtements chauffants permettent de chauffer plusieurs zones du corps, tout en autorisant la variation de la température à l'aide d'un interrupteur de commande intégré ou d'un contrôle de température sans fil. Bien qu'un certain nombre de ce type de vêtements chauffants électriques soient aussi destinés aux travailleurs de différentes industries, les zones de chauffages sont fixes et les réglages de température sont souvent limités à trois niveaux, avec des plages de température restreintes. Non seulement ces produits sont incapables d'apporter une solution personnalisée, de telles structures peuvent, en plus, présenter de sérieux problèmes de surchauffe en cas d'utilisation lors des activités intenses de travail. Donc, les quelques produits offrant des zones de chauffage indépendantes et permettant d'interrompre ou d'ajuster séparément la température de chaque zone, ainsi que les vêtements offrant des ajustements de température à l'aide d'un interrupteur variable peuvent être d'intérêts pour une adaptation à un usage dans les milieux de travail. Dans le cadre des travaux à venir, il sera peut-être

important d'étudier l'impact du contrôle indépendant de la température de chauffage de différentes parties du corps, en fonction de la perte de chaleur de différentes parties du corps qui peuvent varier considérablement selon les activités physiques et le type d'équipements (casque, harnais, etc.). Grâce aux avancées réalisées dans le domaine des technologies portables, un nombre limité de produits permettant une autorégulation de la température de chauffage à l'aide de capteurs thermiques intégrés mesurant la température microclimatique à l'intérieur du vêtement ou celle de la peau, ont été mis sur le marché au cours des deux dernières années. S'agissant d'une technologie très récente, l'efficacité de tels systèmes, ainsi que leur impact sur les aspects physiologiques des personnes exécutant des tâches de travail dans le froid, reste à étudier. Par ailleurs, l'intégration des actuateurs autorégulateurs de température aux structures d'équipements de protection individuels nécessite d'importants efforts de recherche.

5.4 Actuateur refroidissant

Les actuateurs refroidissants sont les solutions technologiques les plus étudiées dans un contexte de santé et de sécurité du travail parmi les différents moyens de gestion thermique intelligente. La présente étude s'est principalement focalisée sur l'analyse des avancées technologiques concernant les vêtements refroidissants actifs, permettant un effet continu dans la mesure du possible, selon leur source d'énergie. Une partie importante des travaux de recherche sur les vêtements refroidissants personnels a été consacrée aux systèmes refroidissants par circulation de fluide. Bien que leur efficacité ait été approuvée par plusieurs études, ces vêtements sont lourds et encombrants et ne semblent pratiques que pour les métiers dans lesquels les travailleurs ne se déplacent pas fréquemment, par exemple des travailleurs œuvrant dans des véhicules où l'unité de réfrigération ou le système d'air comprimé est immobilisé. En outre, des unités refroidissantes composées d'un réservoir à glaçon, proposées pour une meilleure portabilité du système, demeurent limitées en raison du temps nécessaire au rechargement fréquent du réservoir. Par ailleurs, les études récentes sur l'optimisation des paramètres associés à la conception d'un vêtement refroidissant par circulation de fluide, tels la couche textile, le réseau tubulaire, le montage, la capacité de la pompe d'injection de fluide et son débit de circulation, etc. sont limitées à des tests de validation en laboratoire et sur très peu de sujets humains.

Les vêtements refroidissants par circulation de fluide, avec des systèmes de contrôle intégré de la température (activée par rétroaction de la T_s) et du débit de circulation du fluide (circulation par intermittence ou en mode alternée), permettraient de diminuer la consommation énergétique du système et le risque de refroidissement excessif tout en améliorant leur efficacité. Cependant, tous les travaux concernant ces systèmes ont été limités aux tests sur des mannequins thermiques et à peu de tests sur des individus en laboratoire. Le contrôle automatique de l'apparition de la vapeur autour du réseau tubulaire pour diminuer les risques de brûlures cutanées dans des environnements humides, l'utilisation des suspensions de PCM pour améliorer la dissipation thermique sans une augmentation apparente de la puissance de la pompe, sont des exemples

d'autres concepts proposés pour l'optimisation des performances des vêtements refroidissants par circulation de fluide opérant généralement avec l'eau froide. Toutefois, des essais dans les milieux opérationnels sont encore nécessaires pour valider ces concepts. Bien qu'un nombre élevé d'études soient consacrées aux vêtements refroidissants par circulation de fluide, la présente analyse a relevé seulement deux études ayant été effectuées dans un milieu opérationnel.

Afin de profiter du poids relativement faible et de la capacité de refroidissement élevée des vêtements refroidissants par expansion de gaz, tout en contournant les limites concernant la faible durée d'opération et l'échappement de gaz, des travaux très récents ont proposé certaines optimisations pour les utiliser dans les milieux chauds et humides. Ces résultats restent encore à confirmer dans des conditions d'exploitation réelles. Par ailleurs, des modifications de design sont encore nécessaires pour faciliter leur usage sous les équipements de protection. La revue de la littérature a également permis d'observer que malgré une plus grande efficacité des vêtements refroidissants par projection d'air, utilisant un compresseur d'air, la grande majorité des travaux avaient privilégié le refroidissement par ventilation pour une meilleure portabilité du système. Bien que les ventilateurs permettent de bien diminuer l'humidité du microclimat proche de la peau, leur performance semble être influencée par la température ou par l'humidité de l'air ambiant et, selon certaines études, leur effet bénéfique est apparent pour la T_s locale, sans une influence remarquable pour la T_s totale ou la T_{cl} . Malgré les travaux d'optimisation en matière d'emplacement des ventilateurs et des ouvertures supplémentaires dans le vêtement ou des modes de refroidissement par intermittence, aucun avantage particulier n'a pu être observé dans les études analysées. Par ailleurs, le peu d'études consacrées au vêtement refroidissant thermoélectrique semble limité aux preuves de concept et montre une consommation d'énergie électrique relativement élevée dans leur état actuel. Toutefois, les recherches sur la miniaturisation des modules thermoélectriques, associées aux récentes études sur la conception des modules thermoélectriques flexibles, peuvent constituer des avenues intéressantes pour de futurs travaux visant la conception d'éléments thermoélectriques portables ayant une capacité de chauffage ou de refroidissement.

Afin de contourner la faible efficacité des vêtements refroidissants par évaporation portés sous les équipements de protection denses et dans les environnements humides, l'introduction d'un mécanisme de ventilation pour évacuer l'humidité, ou des dispositifs motorisés de compression de vapeur associés aux conduites réfrigérantes, ont été proposés. Dans leur état actuel, ces concepts sont encombrants et peu pratiques à porter au travail. Des travaux pour réduire les dimensions de tels dispositifs, tout en préservant leur efficacité, sont donc nécessaires. Malgré la capacité refroidissante élevée des vêtements refroidissants à dessiccateur sous vide, considérés comme étant une solution impliquant des matériaux hygroscopiques pouvant améliorer la performance de vêtements refroidissants par évaporation, très peu d'études leur ont été consacrées. Des travaux de recherche sont en cours pour proposer de nouvelles structures ou de nouveaux types de matériaux desséchants plus efficaces (Yang, Yifan, 2016). S'agissant de systèmes

passifs, leur durée d'opération demeure limitée et leur performance amoindrie dans des climats humides.

Malgré les études comparatives et l'établissement de tableaux génériques de comparaison de performances des divers systèmes refroidissants, la sélection du système le plus approprié est parfois un travail complexe. Cette difficulté repose entre autres sur les lacunes des méthodes d'essais utilisés pour évaluer les divers types de vêtements refroidissants personnels. De nombreuses études ont utilisé des mannequins thermiques. Bien qu'ils soient utiles pour une première ébauche, les mannequins ne peuvent pas simuler adéquatement le comportement thermique spatial et transitoire de l'humain ou les réponses thermophysologiques réalistes, telles que le changement de T_{cl} et de T_{sk} . Ils sont aussi limités par l'absence de réponse vasoconstrictrice initiée dans la peau humaine lorsqu'elle est refroidie (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014). De plus, les tests sur des sujets humains sont majoritairement limités à un nombre et à un sexe. En outre, les différences dans les méthodologies (c.-à-d. la durée et l'intensité de l'exercice), les caractéristiques du sujet (c.-à-d. le sexe, la forme physique, l'acclimatation et le degré d'hydratation) et les propriétés du système refroidissant (c.-à-d. la durée du refroidissement, le nombre d'éléments refroidissants et leur emplacement) portent parfois à confusion concernant les résultats présentés dans la littérature. En effet, la diversité des expérimentations et des méthodes a parfois mené à des résultats différents qui ne se confirment pas nécessairement et sont parfois opposés. Par exemple, l'impact d'une technologie sur les paramètres physiologiques peut varier d'une étude à l'autre. De plus, l'application des résultats de laboratoire sur le terrain peut être compromise par des problèmes ergonomiques dans un environnement réel de travail, en raison de la variété et de la complexité des mouvements qui y sont effectués, en comparaison aux essais de simulations de type 'course sur tapis roulant' adoptés dans de nombreuses études. Afin de faciliter le choix du système approprié, quelques méthodes universelles ont été proposées pour le calcul théorique de la performance du vêtement refroidissant en fonction du climat et de la nature de l'activité. Cependant, ces méthodes ne prennent pas en compte la perte de chaleur corporelle ainsi que l'impact du refroidissement sur les aspects physiologiques du corps qui peuvent, en effet, varier d'une personne à l'autre.

Devant la complexité de la sélection de la meilleure stratégie en fonction de différents environnements et activités, et pour contourner les limites des différents systèmes, certains experts ont proposé des technologies refroidissantes hybrides. Parmi ces concepts explorés dans un nombre limité d'études, on retrouve : l'association de la circulation de liquide et de la ventilation d'air pour favoriser l'évacuation de l'humidité accumulée dans les vêtements FCG à l'eau, des pochettes de gel congelé accompagnées de ventilateurs pour une diminution plus grande des contraintes physiologiques dans les phases d'activité, ou encore la circulation d'eau froide à travers des pochettes à PCM pour accroître la durée d'opération. Cependant, plus de travaux sont nécessaires pour une meilleure compréhension de l'efficacité de ces systèmes et pour optimiser leur performance.

Cette revue de la littérature a cependant permis de recenser plusieurs études portant sur des vêtements refroidissants hybrides, associant des acteurs à PCM à des ventilateurs (PCM/ventilateurs) afin de favoriser la perte de chaleur par évaporation et ainsi créer un effet synergique pour de meilleures performances dans des climats chauds et humides, tout en assurant une certaine portabilité. L'introduction de couches isolantes afin de réduire la chaleur environnementale absorbée par le PCM dans les versions optimisées de vêtements à PCM/ventilateurs a permis d'augmenter la durée totale de la fusion du PCM et la durée effective de refroidissement. Malgré un grand potentiel, la condensation de l'humidité sur les surfaces des pochettes de PCM, réduisant l'efficacité du système, et le poids des pochettes s'avèrent être deux limites majeures de ce type de vêtements refroidissants hybrides. Par ailleurs, aucun système hybride à PCM/ventilateurs n'a été exploré jusqu'à maintenant dans une structure d'équipements de protection. Des travaux sont donc attendus sur l'optimisation de ces systèmes et leur intégration dans des équipements de protection appropriés.

De plus, la conception de couches de haute conductivité thermique à base de matériaux avancés ou de textiles conducteurs pour améliorer l'échange thermique du vêtement, le mélange du PCM avec des matériaux conducteurs pour créer un effet de perte de chaleur répétée, ou encore l'utilisation de matériaux réversiblement sensibles à l'humidité ou à la température n'ont pas été explorés en association avec des systèmes actifs dans la conception de vêtements refroidissants hybrides. Ces types de matériaux seraient aussi à étudier afin d'optimiser la performance thermique des équipements de protection individuels. Au vu des progrès réalisés et de l'utilisation de nouvelles technologies dans la conception de vêtements refroidissants personnels, le verdict sur l'efficacité ou l'inefficacité de ces nouveaux systèmes dans la réduction du stress thermique du corps nécessite davantage d'études, de modélisations ou de simulations, et ce, afin de juger des performances dans des conditions particulières. Dans les démarches visant à adapter des vêtements refroidissants personnels à divers secteurs, il est également nécessaire d'introduire des tests de simulations de tâches typiques du métier ciblé lors de l'évaluation du système. Ce genre de pratique a été à ce jour limité au secteur de la lutte contre l'incendie.

Comme pour la revue de la littérature, la recherche sur les produits contenant des acteurs refroidissants s'est principalement concentrée sur les dispositifs actifs. Toutefois, les analyses ont démontré que près de la moitié des produits répertoriés utilisent des principes de refroidissement passifs de type PCM ou par évaporation. Similairement à la littérature scientifique, la majorité des vêtements refroidissants à base de circulation de liquide ou d'air comprimé sont stationnaires et non destinés aux travailleurs ayant à se déplacer fréquemment. Malgré une conception relativement simple des vêtements refroidissants à ventilateurs, aucun équipement de protection contenant des ventilateurs intégrés n'a pu être identifié dans les analyses. Les systèmes par expansion de gaz ou thermoélectriques semblent encore en développement et peu répandus sur le marché. En dépit de nombreux travaux de recherche dédiés aux systèmes hybrides, des produits associant deux types de technologies sont peu

nombreux. De plus, aucun de ces produits ne combine un système actif par ventilateur avec un système passif par PCM, une combinaison pourtant encensée par la littérature scientifique. En outre, aucun de ces produits n'est doté de systèmes de régulation de la température basés sur la rétroaction des paramètres personnels de l'individu. Bien que la tête et le cou soient connus pour offrir la meilleure efficacité d'évacuation de la chaleur devant le torse, les bras et les jambes (Mokhtari Yazdi et Sheikhzadeh, 2014), seulement un produit recensé est intégré dans un casque.

CONCLUSION

Malgré les normes qui régissent les conditions de travail ainsi que les avancées dans le développement d'équipements de protection plus performants, les contraintes thermiques demeurent un problème majeur de santé au travail. Dans un tel contexte, les systèmes de thermorégulation qui rendent les textiles capables de détecter, de réagir et de s'adapter aux stimuli thermiques, présentent un grand potentiel pour améliorer la performance des équipements de protection individuels lors des expositions aux températures extrêmes.

Dès lors, la présente étude a été conduite afin de mieux documenter l'ensemble des connaissances actuelles sur les technologies facilitant une gestion thermique intelligente en dressant l'état de l'art des systèmes actuellement disponibles dans le commerce et des développements effectués dans le cadre de travaux de recherche antérieurs.

Une attention particulière a été portée à la collecte d'information scientifique et technique de systèmes potentiellement intégrables aux équipements de protection individuels pour une gestion thermique intelligente et soutenue tout au long de l'exécution des tâches.

Afin de mieux expliquer les différents types de moyens à mettre en œuvre pour faciliter la gestion thermique intelligente dans les équipements de protection individuels, les résultats de l'étude ont été classés en 4 catégories : (i) détection du stress thermique en temps réel, (ii) capteur de température, (iii) actuateur chauffant et (iv) actuateur refroidissant.

À travers une revue de la littérature, plus de 230 publications scientifiques ont été retenues pour une analyse détaillée des avancées réalisées au cours des dix dernières années. À partir des informations disponibles dans chaque publication examinée, les détails techniques ont été extraits et classés sous forme de tableaux. Le degré de maturité technologique de chacun des concepts présentés dans la littérature a également été évalué selon l'échelle de maturité technologique TRL. Ainsi, une base exhaustive de données a été créée pour faciliter l'analyse de l'état actuel des connaissances.

Des données techniques sur les systèmes disponibles dans le commerce ont principalement été collectées à partir des sites internet des fabricants (ou des distributeurs) et des fiches techniques des produits. Des appels téléphoniques et des rencontres par vidéoconférence avec les fabricants ont permis de compléter les informations. En ce qui concerne les dispositifs facilitant la détection du stress thermique en temps réel et les capteurs de température portables ou intégrés aux structures textiles, des tableaux d'analyse détaillés ont été réalisés. Les produits commerciaux équipés d'actuateurs thermiques ont été analysés d'une manière plus générale. Devenus une technologie courante dans le domaine des textiles intelligents, les actuateurs permettant la gestion thermique active, et plus particulièrement les éléments chauffants, sont actuellement utilisés dans divers types de vêtements. Enfin, les données collectées ont été complétées avec une analyse des dépôts de demande de brevet concernant la gestion thermique intelligente. L'ensemble des tableaux d'analyse des travaux de recherche antérieurs et des produits commercialisés sont disponibles à l'IRSST sur

demande pour les experts et les chercheurs du domaine de la santé et de la sécurité du travail.

Pour chaque concept ou produit, les dernières avancées réalisées, les avantages et les limites ont été discutés. Les travaux encore à réaliser ainsi que les stratégies de développement ou d'adaptation à déployer pour une application aux équipements de protection individuels ont été présentés à partir des connaissances réunies et des discussions sur les lacunes identifiées des études et des produits commercialisés. Au vu de l'émergence de ces technologies et de la variété de solutions disponibles, de vastes perspectives pour l'optimisation des systèmes actuels ou pour leur adaptation sont envisageables. En se basant sur les analyses de la présente étude, des axes de recherche pouvant être suggérés pour les travaux futurs sont :

- L'optimisation des méthodes de détection indirectes de la température centrale du corps à partir de la fréquence cardiaque pour s'affranchir des méthodes intrusives telles que la thermométrie rectale ou la pilule avalable téléométrique ;
- La mise en place de plateformes multicapteurs ou une adaptation des outils actuels pour la collecte d'un ensemble de données multiparamétriques afin de faciliter la détection du stress thermique ;
- L'application spécifique des techniques d'intelligence artificielle afin de prévenir d'une situation de stress thermique à partir de signes avant-coureurs extraits des données collectées ;
- L'exploitation des avantages des textiles intelligents et des matériaux avancés dans l'élaboration de capteurs de température intégrés ou sous forme de dispositifs portables afin d'optimiser les performances ou d'obtenir des solutions mieux intégrées ;
- L'optimisation des performances des systèmes intra-auriculaires peu intrusifs, relativement faciles à porter et qui permettent de mesurer plusieurs paramètres physiologiques ;
- La mise en place d'actuateurs chauffants ou refroidissants avec des contrôles de température modulables et dotés de systèmes de régulation de la température basés sur la rétroaction des paramètres personnels de l'individu ;
- L'optimisation des actuateurs refroidissants dans une configuration hybride en associant plusieurs technologies de refroidissement pour créer un effet synergique, tout en préservant la portabilité du système et le confort du travailleur ;
- L'utilisation de matériaux avancés ou de matériaux fonctionnels en association avec des technologies actives de refroidissement ou de chauffage dans l'élaboration de systèmes hybrides procurant des performances améliorées ;

- L'introduction de tests de simulation des tâches typiques au métier ciblé dans les tests d'évaluation des systèmes, la vérification des résultats de nombreuses études effectuées en laboratoire et l'évaluation de certains produits récemment développés dans l'industrie, à l'aide d'études sur le terrain.

L'ensemble de ces pistes met en évidence la nécessité de réaliser des travaux de recherche qui permettront de mieux préparer l'intégration des technologies facilitant une gestion thermique intelligente aux équipements de protection individuels et leur implémentation dans les milieux de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- Acar, G., Ozturk, O., Golparvar, A. J., Elboshra, T. A., Böhringer, K. et Yapici, M. K. (2019). Wearable and flexible textile electrodes for biopotential signal monitoring: A review. *Electronics*, 8(5), 479.
- Adam-Poupart, A., Labrèche, F., Smargiassi, A., Duguay, P., Busque, M.-A., Gagné, C. et Zayed, J. (2012). *Impacts des changements climatiques sur la santé et la sécurité des travailleurs* (Rapport n° R-733). : IRSST.
- Adam-Poupart, A., Smargiassi, A., Busque, M.-A., Duguay, P., Fournier, M., Zayed, J. et Labrèche, F. (2015). *Température estivale, concentrations d'ozone et lésions professionnelles acceptées au Québec*. : IRSST.
- Addison, P. S., Watson, J. N., Mestek, M. L., Ochs, J. P., Uribe, A. A. et Bergese, S. D. (2015). Pulse oximetry-derived respiratory rate in general care floor patients. *Journal of clinical monitoring and computing*, 29(1), 113-120.
- Ahmed, Z., Wei, Y., Torah, R. et Tudor, J. (2016). Actively actuated all dispenser printed thermochromic smart fabric device. *Electronics Letters*, 52(19), 1601-1603.
- Akbar, A. R., Kamruzzaman, M., Xu, W., Gull, S., Ahmed, W. et Khalid, J. (2016). Development of weft knitted heating pads on v-bed hand flat knitting machine by using conductive yarns. *American Journal of Polymer Science & Engineering*, 4(1), 133-141.
- Al Sayed, C., Vinches, L., Dupuy, O., Douzi, W., Dugue, B. et Hallé, S. (2019). Air/CO2 cooling garment: Description and benefits of use for subjects exposed to a hot and humid climate during physical activities. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(6), 899-903.
- Al Sayed, C., Vinches, L. et Hallé, S. (2016). Towards optimizing a personal cooling garment for hot and humid deep mining conditions. *Open Journal of Optimization*, 5(01), 35.
- Al Sayed, C., Vinches, L. et Hallé, S. (2017). Validation of a wearable biometric system's ability to monitor heart rate in two different climate conditions under variable physical activities. *E-Health Telecommunication Systems and Networks*, 6(02), 19.
- Al Sayed, C., Vinches, L. et Hallé, S. (2019). Novel portable cooling system for hot and humid environments using atmospheric discharge of high-pressure carbon dioxide. *Thermal Science and Engineering Progress*, 11 1-7.
- Aliane, A., Fischer, V., Galliari, M., Tournon, L., Gwoziecki, R., Serbutoviez, C., . . . Coppard, R. (2014). Enhanced printed temperature sensors on flexible substrate. *Microelectronics Journal*, 45(12), 1621-1626.
- Andrew, T. L., Zhang, L., Cheng, N., Baima, M., Kim, J. J., Allison, L. et Hoxie, S. (2018). Melding Vapor-Phase Organic Chemistry and Textile Manufacturing To Produce Wearable Electronics. *Accounts of Chemical Research*, 51(4), 850-859. doi: 10.1021/acs.accounts.7b00604

- Annaheim, S., Saiani, F., Grütter, M., Fontana, P., Camenzind, M. et Rossi, R. (2015). *Internal and external heat load with fire fighter protective clothing: data from the lab and the field*. Communication présentée à Extreme Physiology & Medicine (vol. 4, p. A100).
- Arbury, S., Jacklitsch, B., Farquah, O., Hodgson, M., Lamson, G., Martin, H. et Profitt, A. (2014). Heat illness and death among workers—United States, 2012–2013. *MMWR. Morbidity and mortality weekly report*, 63(31), 661.
- Asghar, A., Ahmad, M. R., Yahya, M. F., Hassan, S. Z. U. et Kashif, M. (2018). Characterization based on the thermal capabilities of metallized fabrics equipped with hybrid conductive yarns for protective clothing. *The Journal of The Textile Institute*, 109(11), 1434-1444.
- Ashtekar, S., Mishra, S., Kapadia, V., Nag, P. et Singh, G. (2019). Workplace heat exposure management in Indian construction workers using cooling garment. *Workplace Health Saf*, 67(1), 18-26. doi: 10.1177/2165079918785388
- Bach, A. J. E., Maley, M. J., Minett, G. M., Zietek, S. A., Stewart, K. L. et Stewart, I. B. (2019). An evaluation of personal cooling systems for reducing thermal strain whilst working in chemical/biological protective clothing. *Frontiers in physiology*, 10(APR). doi: <http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2019.00424>
- Bachnak, R., Itani, M., Ghaddar, N. et Ghali, K. (2018). Performance of hybrid PCM-Fan vest with deferred fan operation in transient heat flows from active human in hot dry environment. *Building and Environment*, 144 334-348.
- Bai, Y., Li, H., Gan, S., Li, Y., Liu, H. et Chen, L. (2018). Flexible heating fabrics with temperature perception based on fine copper wire and fusible interlining fabrics. *Measurement*, 122 192-200.
- Baratchi, M., Teunissen, L., Ebben, P., Teeuw, W., Laarhuis, J. et van Steen, M. (2016). *Towards decisive garments for heat stress risk detection*. Communication présentée à Proceedings of ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct (p. 1095-1100).
- Barr, D., Gregson, W., Sutton, L. et Reilly, T. (2009). A practical cooling strategy for reducing the physiological strain associated with firefighting activity in the heat. *Ergonomics*, 52(4), 413-420.
- Bartkowiak, G., Dabrowska, A. et Marszalek, A. (2014). Assessment of the human responses to the influence of personal liquid cooling system in the hot environment. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 26(2), 145-163. doi: <https://doi.org/10.1108/IJCST-03-2013-0024>
- Bartkowiak, G., Dabrowska, A. et Marszalek, A. (2017). Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment. *Applied ergonomics*, 58 182-189.
- Bartkowiak, G. y., Dabrowska, A. et Włodarczyk, B. (2015). Construction of a garment for an integrated liquid cooling system. *Textile research journal*, 85(17), 1809-1816. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/0040517515576324>

- Barwood, M. J., Davey, S., House, J. R. et Tipton, M. J. (2009). Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions. *European journal of applied physiology*, 107(4), 385.
- Barwood, M. J., Newton, P. S. et Tipton, M. J. (2009). Ventilated vest and tolerance for intermittent exercise in hot, dry conditions with military clothing. *Aviation, space, and environmental medicine*, 80(4), 353-359.
- Basu, A., Jain, S. et Khoiwal, V. S. (2019). *Development of Smart Textiles for Medical Care*, Singapore (p. 101-106).
- Belding, H. et Hatch, T. (1955). Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, piping and air conditioning*, 27(8), 129-136.
- Bell, D. G., Tikuisis, P. et Jacobs, I. (1992). Relative intensity of muscular contraction during shivering. *Journal of Applied Physiology*, 72(6), 2336-2342.
- Bielska, S., Sibinski, M. et Lukasik, A. (2009). Polymer temperature sensor for textronic applications. *Materials Science and Engineering: B*, 165(1-2), 50-52.
- Boano, C. A., Lasagni, M. et Römer, K. (2013). *Non-invasive measurement of core body temperature in marathon runners*. Communication présentée à IEEE International Conference on Body Sensor Networks (p. 1-6).
- Boano, C. A., Lasagni, M., Romer, K. et Lange, T. (2011). *Accurate temperature measurements for medical research using body sensor networks*. Communication présentée à 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (p. 189-198).
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*.
- Bröde, P. et Kampmann, B. (2017). *Q10 effect and thermal cardiac reactivity related to the interrelation between heart rate and oxygen consumption under heat stress*. Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 45).
- Bu, Y., Wu, W., Zeng, X., Koehl, L. et Tartare, G. (2015). *A wearable intelligent system for real time monitoring firefighter's physiological state and predicting dangers*. Communication présentée à IEEE 16th International Conference on Communication Technology (p. 429-432).
- Budd, G. M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT)-its history and its limitations. *Journal of science and medicine in sport*, 11(1), 20-32.
- Buller, M., Tharion, W., Cheuvront, S. N., Montain, S. J., Kenefick, R. W., Castellani, J., . . . Jenkins, O. C. (2013). Estimation of human core temperature from sequential heart rate observations. *Physiological measurement*, 34(7), 781.
- Buller, M., Tharion, W., 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. doi: 10.1080/00140139.2015.1036792
- Buller, M., Tharion, W., Hoyt, R. W. et Jenkins, O. C. (2010). *Estimation of human internal temperature from wearable physiological sensors*. Communication présentée à Twenty-Second IAAI Conference.
- Butts, C. L., Smith, C. R., Ganio, M. S. et McDermott, B. P. (2017). Physiological and perceptual effects of a cooling garment during simulated industrial work in the heat. *Applied ergonomics*, 59(Pt A), 442-448. doi: 10.1016/j.apergo.2016.10.001
- Cadarette, B. S., Cheuvront, S. N., Kolka, M. A., Stephenson, L. A., Montain, S. J. et Sawka, M. N. (2006). Intermittent microclimate cooling during exercise-heat stress in US army chemical protective clothing. *Ergonomics*, 49(2), 209-219.
- Cao, H. (2013). Smart technology for personal protective equipment and clothing. Dans R. A. Chapman (Édit.), *Smart Textiles for Protection* (p. 229-243): Woodhead Publishing.
- Carek, A. M. et Inan, O. T. (2016). A temperature-controlled glove with non-invasive arterial pulse sensing for active neuro-vascular assessment. *Conference proceedings - IEEE engineering in medicine and biology society, 2016* 619-622. doi: 10.1109/embc.2016.7590778
- Caretti, D. M. et Barker, D. J. (2014). Effects of respirator ambient air cooling on thermophysiological responses and comfort sensations. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 11(5), 269-281. doi: 10.1080/15459624.2013.858819
- Carey , B. (2012). Globe's WASP physiological and location monitoring on the fireground. Tiré de <http://www.backstepfirefighter.com/2012/04/25/globes-waspphysiological-and-location-monitoring-on-the-fireground/>
- Carlsson, I. K. et Dahlin, L. B. (2014). Self-reported cold sensitivity in patients with traumatic hand injuries or hand-arm vibration syndrome-an eight year follow up. *BMC musculoskeletal disorders*, 15(1), 83.
- Carrillo, A., Cheung, S. et Flouris, A. (2011). *Heart rate variability during neurally mediated syncope by heat stress*. Communication présentée à 14th International Conference on Environmental Ergonomics, Nafplio , Greece.
- Castano, L. M. et Flatau, A. B. (2014). Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review. *Smart Materials and Structures*, 23(5), 053001.
- Chaglla, E., Celik, N. et Balachandran, W. (2018). Measurement of core body temperature using graphene-inked infrared thermopile sensor. *Sensors*, 18(10), 3315.
- Chan, A., Wong, F., Li, Y., Wong, D. P. et Guo, Y. P. (2015). Evaluation of a cooling vest in four industries in Hong Kong. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, 2, 677-691.
- Chan, A., Yang, Y., Wong, D., Lam, E. et Li, Y. (2013). Factors affecting horticultural and cleaning workers' preference on cooling vests. *Building and Environment*, 66 181-189.

- Chan, A., Yang, Y., Wong, F. K. W., Yam, M. C. H., Wong, D. P. et Song, W. F. (2019). Reduction of physiological strain under a hot and humid environment by a hybrid cooling vest. *J Strength Cond Res*, 33(5), 1429-1436. doi: 10.1519/jsc.0000000000001837
- Chan, A. P., Zhang, Y., Wang, F., Wong, F. F. et Chan, D. W. (2017). A field study of the effectiveness and practicality of a novel hybrid personal cooling vest worn during rest in Hong Kong construction industry. *Journal of Thermal Biology*, 70 21-27.
- Chen, W., Dols, S., Oetomo, S. B. et Feijs, L. (2010). *Monitoring body temperature of newborn infants at neonatal intensive care units using wearable sensors*. Communication présentée à Proceedings of the Fifth International Conference on Body Area Networks (p. 188-194).
- Cheung, S. S., Lee, J. K. et Oksa, J. (2016). Thermal stress, human performance, and physical employment standards. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 41(6), S148-S164.
- Cheuvront, S. N., Montain, S. J., Stephenson, L. A. et Sawka, M. N. (2009). *Optimization of liquid microclimate cooling systems: importance of skin temperature*. Communication présentée à Proceedings 13th International Conference on Environmental Ergonomics (p. 247-251).
- Coca, A., Roberge, R. J., Powell, J. B., Kim, J.-H. et Williams, W. J. (2009). *Evaluation of five colling conditions wearing a prototype firefighter ensemble* Communication présentée à Proceedings of 13th international conference on environmental ergonomics (p. 265-268).
- Coca, A., Roberge, R. J., Williams, W. J., Landsittel, D. P., Powell, J. B. et Palmiero, A. (2010). Physiological monitoring in firefighter ensembles: wearable plethysmographic sensor vest versus standard equipment. *Journal of occupational and environmental hygiene*. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1080/15459620903455722>
- Codau, T.-C., Onofrei, E., Bedek, G., Dupont, D. et Cochrane, C. (2015). Embedded textile heat flow sensor characterization and application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 235 131-139.
- Courbat, J., Kim, Y., Briand, D. et De Rooij, N. (2011). *Inkjet printing on paper for the realization of humidity and temperature sensors*. Communication présentée à 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (p. 1356-1359).
- Daanen, H. A., Van De Vliert, E. et Huang, X. (2003). Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments. *Applied ergonomics*, 34(6), 597-602.
- Dankoco, M., Tesfay, G., Bènevent, E. et Bendahan, M. (2016). Temperature sensor realized by inkjet printing process on flexible substrate. *Materials Science and Engineering: B*, 205 1-5.
- Davey, S., Richmond, V., Griggs, K. E., Gerrett, N. et Havenith, G. (2013). *The use of non-invasive measures to predict thermal strain: How accurate are universal models?* Communication présentée à Proceedings of the 15th Conference on Environmental Ergonomics, Queenstown, New Zealand.

- De Mey, G., Özçelik, M., Schwarz, A., Kazani, I., Hertleer, C., Van Langenhove, L. et Gursoy, N. Ç. (2014). Designing of conductive yarn knitted thermal comfortable shirt using battery operated heating system. *Tekstil Ve Konfeksiyon*, 24(1), 26-29.
- Decaens, J. et Vermeersch, O. (2016). Wearable technologies for personal protective equipment: Embedded textile monitoring sensors, power and data transmission, end-life indicators. Dans *Smart Textiles and their Applications* (p. 519-537) : Elsevier.
- Deming, G. et Casey, S. (2009). *Personal cooling system control algorithm development and system optimization*. : NIOSH. Tiré de <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2019100547.xhtml>
- Dessureault et Doucet, M. (2003). *Évaluation des indices de contrainte thermique en mines profondes* (Rapport n° R-350). : IRSST.
- Dessureault et Gressard, B. (2006). *Cueillette de données et vérification de la concordance entre la température de l'air corrigée et l'indice WBGT sous des ambiances thermiques extérieures* (Rapport n° R-476). : IRSST.
- Dessureault, Oupin, P. et Bourassa, M. (2014). *Pertinence et conditions d'utilisation des indices thermiques dans le contexte québécois* (Rapport n° R-824). : IRSST.
- Dessureault et Tellier, A. (2008). *L'autosurveillance de l'astreinte thermique des jeunes travailleurs affectés à l'engrangement du foin* (Rapport n° R-580). : IRSST.
- Dias, D. et Cunha, J. P. S. (2018). Wearable health devices-vital sign monitoring, systems and technologies. *Sensors*, 18(8), 2414.
- Doganay, D., Coskun, S., Genlik, S. P. et Unalan, H. E. (2016). Silver nanowire decorated heatable textiles. *Nanotechnology*, 27(43), 435201.
- Dolez, P., Decaens, J., Buns, T., Lachapelle, D., Vermeersch, O. et Mlynarek, J. (2018). *Analyse du potentiel d'application des textiles intelligents en santé et en sécurité au travail* (Rapport n° R-1029). : IRSST.
- Dolez, P. et Mlynarek, J. (2016). Smart materials for personal protective equipment: Tendencies and recent developments. Dans V. Koncar (Édit.), *Smart Textiles and their Applications* (p. 497-517). Oxford: Woodhead Publishing.
- Donelan, C. et Park, H. (2016). Evaluation of passive cooling garments for thermal comfort based on thermal manikin tests. *AATCC Journal of Research*, 3(5), 1-11. doi: <https://doi.org/10.14504/ajr.3.5.1>
- Duguay, P., Prud'homme, P., Boucher, A., Busque, M.-A. et Lebeau, M. (2016). *Identification des risques mécaniques et physiques reliés à certains métiers*. : Institut de recherche Robert Sauvé en santé et en sécurité du travail.
- Dunne, J. P., Stouffer, R. J. et John, J. G. (2013). Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), 563.

- Dupler, E., Gagliardi, N., Foo, E., Ozbek, S., Utset-Ward, S. et Dunne, L. (2019). *Toward textile-based heating devices for the distal extremities: experimental characterization of system design parameters*. Communication présentée à Design of Medical Devices Conference.
- Duval, C. (2016). Quand l'EPI devient intelligent *Travail & sécurité*(768), 26-27. Tiré de <http://www.travail-et-securite.fr/dms/ts/ArticleTS/TI-TS768page26-27>
- Elson, J. et Eckels, S. (2015). An objective method for screening and selecting personal cooling systems based on cooling properties. *Applied ergonomics*, 48 33-41.
- Elson, J. C., McCullough, E. A. et Eckels, S. (2013). *Evaluation of personal cooling systems for military use*. Communication présentée à 15th International Conference on Environmental Ergonomics, Queenstown, New Zealand (p. 281-284).
- Emploi et Développement social Canada. (2018). *Le stress thermique dans les lieux de travail* (Rapport n° LT-313-11-18F). :
- Enescu, D. et Virjoghe, E. O. (2014). A review on thermoelectric cooling parameters and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 903-916.
- Epstein, Y., Mazgaoker, S., Atias, D., Yanovich, R., Gabbay, U. et Heled, Y. (2015). *The cardiovascular reserve index (CVRI)-a surrogate index in predicting heat tolerance*. Communication présentée à Extreme physiology & medicine (vol. 4, p. A158).
- Ernst, T. C. et Garimella, S. (2009). Wearable engine-driven vapor-compression cooling system for elevated ambients. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 1(2), 025001.
- Ernst, T. C. et Garimella, S. (2013). Demonstration of a wearable cooling system for elevated ambient temperature duty personnel. *Applied Thermal Engineering*, 60(1-2), 316-324.
- Falzon, B. G., Robinson, P., Frenz, S. et Gilbert, B. (2015). Development and evaluation of a novel integrated anti-icing/de-icing technology for carbon fibre composite aerostructures using an electro-conductive textile. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 68 323-335.
- Feairheller, D. L. (2015). Blood pressure and heart rate responses in volunteer firefighters while wearing personal protective equipment. *Blood Pressure Monitoring*, 20(4), 194-198.
- Federal Emergency Management Agency, F. (2018). *Firefighter fatalities in the United States in 2017* :U.S. Fire Administration.
- Fernández-Caramés, T. et Fraga-Lamas, P. (2018). Towards the internet-of-smart-clothing: A Review on IoT wearables and garments for creating intelligent connected e-textiles. *Electronics*, 7(12), 405.
- Fletcher, O. M., Guerrina, R., Ashley, C. D. et Bernard, T. E. (2014). Heat stress evaluation of two-layer chemical demilitarization ensembles with a full face negative pressure respirator. *Ind Health*, 52(4), 304-312. doi: 10.2486/indhealth.2012-0197

- Florea, G., Dobrescu, R., Popescu, D. et Dobrescu, M. (2013). *Wearable system for heat stress monitoring in firefighting applications*. Communication présentée à Recent Advances in Computer Science and Networking : Proceedings of the 2nd International Conference on Information Technology and Computer Networks (p. 129-134).
- Flouris, A. D., Westwood, D. A. et Cheung, S. S. (2007). Thermal balance effects on vigilance during 2-hour exposures to -20 °C. *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(7), 673-679.
- Foo, E., Gagliardi, N. R., Schleif, N. et Dunne, L. E. (2017). *Toward the development of customizable textile-integrated thermal actuators*. Communication présentée à Proceedings of the ACM International Symposium on Wearable Computers (p. 29-32).
- Frank, A., Moran, D., Epstein, Y. et Shapiro, Y. (1996). The estimation of heat tolerance by a new cumulative heat strain index.
- Gagliardi, N., Foo, E., Dupler, E., Ozbek, S. et Dunne, L. (2018). *Design of a Stitched Textile-Based Thermal Actuator Garment to Attenuate Peripheral Microclimate Experience*. Communication présentée à 2018 Design of Medical Devices Conference (p. V001T010A016-V001T010A016).
- Galloway, S. et Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(9), 1240-1249.
- Gao, T., Yang, Z., Chen, C., Li, Y., Fu, K., Dai, J., . . . Song, J. (2017). Three-dimensional printed thermal regulation textiles. *ACS Nano*, 11(11), 11513-11520.
- Gaura, E., Kemp, J. et Brusey, J. (2013). Leveraging knowledge from physiological data: On-body heat stress risk prediction with sensor networks. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 7(6), 861-870.
- Giansanti, D., Maccioni, G. et Bernhardt, P. (2009). Toward the design of a wearable system for contact thermography in telemedicine. *Telemedicine and e-Health*, 15(3), 290-295.
- Giuliani, A., Placidi, M., Di Francesco, F. et Pucci, A. (2014). A new polystyrene-based ionomer/MWCNT nanocomposite for wearable skin temperature sensors. *Reactive and Functional Polymers*, 76 57-62.
- Glitz, K., Seibel, U., Rohde, U., Gorges, W., Witzki, A., Piekarski, C. et Leyk, D. (2015). Reducing heat stress under thermal insulation in protective clothing: microclimate cooling by a 'physiological' method. *Ergonomics*, 58(8), 1461-1469.
- Grandjean, A. C. et Grandjean, N. R. (2007). Dehydration and cognitive performance. *Journal of the American College of Nutrition*, 26(sup5), 549S-554S.
- Gubernot, D. M., Anderson, G. B. et Hunting, K. L. (2014). The epidemiology of occupational heat exposure in the United States: a review of the literature and assessment of research needs in a changing climate. *International journal of biometeorology*, 58(8), 1779-1788.

- Gulzar, U., Goriparti, S., Miele, E., Li, T., Maidecchi, G., Toma, A., . . . Zaccaria, R. P. (2016). Next-generation textiles: from embedded supercapacitors to lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(43), 16771-16800.
- Gunga, H.-C., Werner, A., Stahn, A., Steinach, M., Schlabs, T., Koralewski, E., . . . Sattler, F. (2009). The Double Sensor-a non-invasive device to continuously monitor core temperature in humans on earth and in space. *Respiratory physiology & neurobiology*, 169 S63-S68.
- Guo, T., Shang, B., Duan, B. et Luo, X. (2015). Design and testing of a liquid cooled garment for hot environments. *Journal of Thermal Biology*, 49 47-54.
- Hadid, A., Fuks, Y., Erlich, T., Yanovich, R., Heled, Y., Azriel, N. et Moran, D. (2009). *Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing body-armour*. Communication présentée à Proceedings 13th International Conference on Environmental Ergonomics (p. 252-254).
- Hamdani, S., Potluri, P. et Fernando, A. (2013). Thermo-mechanical behavior of textile heating fabric based on silver coated polymeric yarn. *Materials*, 6(3), 1072-1089.
- Hamdani, S. T. A., Fernando, A., Hussain, M. D. et Potluri, P. (2016). Study of electro-thermal properties of pyrrole polymerised knitted fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 46(3), 771-786.
- Hamdani, S. T. A., Fernando, A. et Maqsood, M. (2016). Thermo-mechanical behavior of stainless steel knitted structures. *Heat and Mass Transfer*, 52(9), 1861-1870.
- Hancock, P. A., Ross, J. M. et Szalma, J. L. (2007). A meta-analysis of performance response under thermal stressors. *Human factors*, 49(5), 851-877.
- Hao, L., Xin, W., Jin, L., Weimin, K., Bowen, C., Lei, H. et Yan, X. (2015). Fabrication and characterization of nano-S iC/thermoplastic polyurethane hybrid heating membranes based on fine silver filaments. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(8).
- Hao, L., Yi, Z., Li, C., Li, X., Yuxiu, W. et Yan, G. (2012). Development and characterization of flexible heating fabric based on conductive filaments. *Measurement*, 45(7), 1855-1865.
- Hasegawa, K., Negishi, C., Nakagawa, F. et Ozaki, M. (2012). Core temperatures during major abdominal surgery in patients warmed with new circulating-water garment, forced-air warming, or carbon-fiber resistive-heating system. *Journal of anesthesia*, 26(2), 168-173.
- Héder, M. (2017). From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation. *The Innovation Journal*, 22(2), 1-23.
- Hertleer, C., Odhiambo, S. et Van Langenhove, L. (2013). Protective clothing for firefighters and rescue workers. Dans R. A. Chapman (Édit.), *Smart Textiles for Protection* (p. 338-363): Woodhead Publishing.
- Heus, R., Daanen, H. A. et Havenith, G. (1995). Physiological criteria for functioning of hands in the cold: a review. *Applied ergonomics*, 26(1), 5-13.

- Honda, W., Harada, S., Arie, T., Akita, S. et Takei, K. (2014a). *Printed wearable temperature sensor for health monitoring*. Communication présentée à SENSORS, IEEE (p. 2227-2229).
- Honda, W., Harada, S., Arie, T., Akita, S. et Takei, K. (2014 b). Wearable, human-interactive, health-monitoring, wireless devices fabricated by macroscale printing techniques. *Advanced Functional Materials*, 24(22), 3299-3304.
- Hong, S., Gu, Y., Seo, J. K., Wang, J., Liu, P., Meng, Y. S., . . . Chen, R. (2019). Wearable thermoelectrics for personalized thermoregulation. *Science advances*, 5(5), eaaw0536.
- Hong, Y., Cao, X., Chen, Y., Pan, Z., Chen, Y. et Zeng, X. (2019). A conceptual wearable monitoring system for physiological indices and clothing microclimate measurement. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 31(3), 318-325. doi:10.1108/IJCST-10-2016-0116
- Hou, J., Yang, Z., Xu, P. et Huang, G. (2019). Design and performance evaluation of novel personal cooling garment. *Applied Thermal Engineering*, 154 131-139.
- House, J. R., White, D., Harwood, A. et Cook, H. (2017). *Comparison of constant vs. intermittent forced-air ventilation under body armour and the impact on heat strain, thermal perception and thermal comfort*. Communication présentée à The 17th International Conference on Environmental Ergonomics Kobe, Japan (p. 129).
- Hu, J., Meng, H., Li, G. et Ibekwe, S. I. (2012). A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications. *Smart Materials and Structures*, 21(5), 053001.
- Hu, J. et Murugesh babu, K. (2009). The use of smart materials in cold weather apparel. Dans J. T. Williams (Édit.), *Textiles for Cold Weather Apparel* (p. 84-112): Woodhead Publishing.
- Huang, C.-C., Kao, Z.-K. et Liao, Y.-C. (2013). Flexible miniaturized nickel oxide thermistor arrays via inkjet printing technology. *ACS applied materials & interfaces*, 5(24), 12954-12959.
- Hughes-Riley, T. et Dias, T. (2018). *Novel electronic textile sensors for the creation of health monitoring devices*. European Union:
- Hughes-Riley, T., Lugoda, P., Dias, T., Trabi, C. et Morris, R. (2017). A Study of thermistor performance within a textile structure. *Sensors*, 17(8), 1804.
- Hunt, A. P., Buller, M. J., Maley, M. J., Costello, J. T. et Stewart, I. B. (2019). Validity of a noninvasive estimation of deep body temperature when wearing personal protective equipment during exercise and recovery. *Military Medical Research*, 6(1), 2.
- Husain, M. et Kennon, R. (2013). Preliminary investigations into the development of textile based temperature sensor for healthcare applications. *Fibers*, 1(1), 2-10.
- Husain, M. D., Kennon, R. et Dias, T. (2014). Design and fabrication of temperature sensing fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 44(3), 398-417.

- Izenson, M., Weibo, C. et Bue, G. (2013). *Evaporative cooling and dehumidification garment for portable life support systems*. Communication présentée à 43rd International Conference on Environmental Systems.
- Jacklitsch, B., Williams, J., Musolin, K., Coca, A., Kim, J.-H. et Turner, N. (2016). *Criteria for a recommended standard: occupational exposure to heat and hot environments*. : The national institute for occupational safety and health. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2016-106/pdfs/2016-106.pdf>
- Jahid, M. A., Hu, J. et Zhuo, H. (2019). Stimuli-responsive polymers in coating and laminating for functional textile. Dans W. C. Smith (Édit.), *Smart Textile Coatings and Laminates (Second Edition)* (p. 155-173): Woodhead Publishing.
- Javadpour, A., Memarzadeh, H. et Saghafi, F. (2015). *A temperature monitoring system incorporating an array of precision wireless thermometers*. Communication présentée à International conference on smart sensors and application (ICSSA) (p. 155-160).
- Jeon, J., Lee, H. B. R. et Bao, Z. (2013). Flexible wireless temperature sensors based on Ni microparticle-filled binary polymer composites. *Advanced Materials*, 25(6), 850-855.
- Jussila, K., Rissanen, S. et Rintamäki, H. (2017). *Heated gloves for rewarming and sustaining hand temperatures at cold work*. Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 72).
- Jussila, K., Rissanen, S., Rintamäki, H. et Hyvärinen, V. (2013). *Clothing and skin temperatures and heat flow while wearing far infrared heating vest in the cold-a thermal manikin and test subject study*. Communication présentée à Proceedings of 15th International Conference on Environmental Ergonomics, Queenstown, New Zealand (p. 237).
- Kang, Z., Wan, X. et Wang, F. (2018). A new hybrid personal cooling system (HPCS) incorporating insulation pads for thermal comfort management: Experimental validation and parametric study. *Building and Environment*, 145 276-289.
- Kang, Z., Wan, X., Wang, F., Raj, U. et Yang, B. (2018). Numerical analysis on the cooling performance of a hybrid personal cooling system (HPCS) under different Hot environments. *Industrial & Manufacturing Engineering*. doi: 10.20944/preprints201812.0034.v1
- Kara, S., Yesilpinar, S., Senol, Y. et Akkan, T. (2017). Design of an electronically equipped sailing garment for improved safety. *Industria Textila*, 68(1), 23-30.
- Kayacan, O., Bulgun, E. et Sahin, O. (2009). Implementation of steel-based fabric panels in a heated garment design. *Textile research journal*, 79(16), 1427-1437.
- Kayacan, O. et Kurbak, A. (2010). Effect of garment design on liquid cooling garments. *Textile research journal*, 80(14), 1442-1455.
- Kayacan, O. et Yazgan Bulgun, E. (2009). Heating behaviors of metallic textile structures. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 21(2/3), 127-136.

- Kelly, O., Wright, H., Breynton, A. et Kenny, G. (2011). *ECG performance of a multi-parameter monitor suitable for harsh environments*. Communication présentée à 14th International Conference on Environmental Ergonomics, Nafplio, Greece (p. 66).
- Khan, Y., Ostfeld, A. E., Lochner, C. M., Pierre, A. et Arias, A. C. (2016). Monitoring of vital signs with flexible and wearable medical devices. *Advanced Materials*, 28(22), 4373-4395.
- Kim, D.-E. et LaBat, K. (2010). Design process for developing a liquid cooling garment hood. *Ergonomics*, 53(6), 818-828.
- Kim, J.-H., Coca, A., Williams, W. J. et Roberge, R. J. (2011a). Effects of liquid cooling garments on recovery and performance time in individuals performing strenuous work wearing a firefighter ensemble. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 8(7), 409-416.
- Kim, J.-H., Coca, A., Williams, W. J. et Roberge, R. J. (2011b). Subjective perceptions and ergonomics evaluation of a liquid cooled garment worn under protective ensemble during an intermittent treadmill exercise. *Ergonomics*, 54(7), 626-635.
- Kim, S. et Lee, J.-Y. (2015). *Evaluation of firefighters' heat strain using heart rate during breaks at work*. Communication présentée à Extreme physiology & medicine (vol. 4, p. A52).
- Kim, S. et Lee, J.-Y. (2017). *Maximum heart rate as a correction factor in predicting firefighters' rectal temperature using heart rate*. Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 160).
- Kimberger, O., Thell, R., Schuh, M., Koch, J., Sessler, D. et Kurz, A. (2009). Accuracy and precision of a novel non-invasive core thermometer. *British journal of anaesthesia*, 103(2), 226-231.
- Kitamura, K.-I., Zhu, X., Chen, W. et Nemoto, T. (2010). Development of a new method for the noninvasive measurement of deep body temperature without a heater. *Medical engineering & physics*, 32(1), 1-6.
- Kjellstrom, T. et Weaver, H. J. (2009). Climate change and health: impacts, vulnerability, adaptation and mitigation. *New South Wales public health bulletin*, 20(2), 5-9.
- Kong, D., Le, L. T., Li, Y., Zunino, J. L. et Lee, W. (2012). Temperature-dependent electrical properties of graphene inkjet-printed on flexible materials. *Langmuir*, 28(37), 13467-13472. doi: 10.1021/la301775d
- Kumar, A., Singla, M. L., Kumar, A. et Rajput, J. K. (2015). POMANI-Mn₃O₄ based thin film NTC thermistor and its linearization for overheating protection sensor. *Materials Chemistry and Physics*, 156 150-162. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.02.042>
- Lai, D., Wei, F., Lu, Y. et Wang, F. (2017). Evaluation of a hybrid personal cooling system using a manikin operated in constant temperature mode and thermoregulatory model control mode in warm conditions. *Textile research journal*, 87(1), 46-56.

- Launay, J.-C. et Savourey, G. (2009). Cold adaptations. *Ind Health*, 47(3), 221-227.
- Lee, J.-W., Han, D.-C., Shin, H.-J., Yeom, S.-H., Ju, B.-K. et Lee, W. (2018). PEDOT: PSS-based temperature-detection thread for wearable devices. *Sensors*, 18(9), 2996.
- Lee, J.-Y., Kim, S., Park, J. et Tochiara, Y. (2015). *A real-time heat strain index using foot temperature and heart rate while wearing personal protective equipment in hot environments*. Communication présentée à Extreme Physiology & Medicine (vol. 4, p. A104).
- Lee, J., Nio, A., Ang, W. H., Johnson, C., Aziz, A. R., Lim, C. L. et Hew-Butler, T. (2011). First reported cases of exercise-associated hyponatremia in Asia. *International journal of sports medicine*, 32(04), 297-302.
- Li, H., Yang, H., Li, E., Liu, Z. et Wei, K. (2012). Wearable sensors in intelligent clothing for measuring human body temperature based on optical fiber Bragg grating. *Optics express*, 20(11), 11740-11752.
- Li, L., Au, W.-m., Ding, F., Hua, T. et Wong, K. S. (2014). Wearable electronic design: electrothermal properties of conductive knitted fabrics. *Textile research journal*, 84(5), 477-487.
- Li, L., Au, W. M., Hua, T. et Wong, K. S. (2011). Design of a conductive fabric network by the sheet resistance method. *Textile research journal*, 81(15), 1568-1577.
- Li, L., Au, W. M., Wan, K. M., Wan, S. H., Chung, W. Y. et Wong, K. S. (2010). A resistive network model for conductive knitting stitches. *Textile research journal*, 80(10), 935-947.
- Li, L., Liu, S., Ding, F., Hua, T., Au, W. M. et Wong, K.-S. (2012). Electromechanical analysis of length-related resistance and contact resistance of conductive knitted fabrics. *Textile research journal*, 82(20), 2062-2070.
- Li, Z., Ke, Y., Wang, F. et Yang, B. (2018). A study of thermal comfort enhancement using three energy-efficient personalized heating strategies at two low indoor temperatures. *Building and Environment*, 143 1-14.
- Linlin, C., Jitian, H., Lian, D. et Chong, H. (2017). Design and experiment study of a new thermoelectric cooling helmet. *Procedia Engineering*, 205 1426-1432. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.339>
- Liu, H., Li, J., Chen, L., Liu, L., Li, Y., Li, X., . . . Yang, H. (2016). Thermal-electronic behaviors investigation of knitted heating fabrics based on silver plating compound yarns. *Textile research journal*, 86(13), 1398-1412.
- Liu, Y., Wang, H., Zhao, W., Zhang, M., Qin, H. et Xie, Y. (2018). Flexible, stretchable sensors for wearable health monitoring: sensing mechanisms, materials, fabrication strategies and features. *Sensors*, 18(2), 645.
- Liu, Z., Mo, F., Li, H., Zhu, M., Wang, Z., Liang, G. et Zhi, C. (2018). Advances in flexible and wearable energy-storage textiles. *Small Methods*, 2(11), 1800124.

- Looney, D. P., Buller, M. J., Gribok, A. V., Leger, J. L., Potter, A. W., Rumpler, W. V., . . . Hoyt, R. W. (2018). Estimating resting core temperature using heart rate. *Journal for the Measurement of Physical Behaviour*, 1(2), 79-86.
- Lu, Y., Wei, F., Lai, D., Shi, W., Wang, F. et Gao, C. (2015). *A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans*. Communication présentée à Extreme physiology & medicine (vol. 4, p. A136).
- Lu, Y., Wei, F., Lai, D., Shi, W., Wang, F., Gao, C. et Song, G. (2015). A novel personal cooling system (PCS) incorporated with phase change materials (PCMs) and ventilation fans: an investigation on its cooling efficiency. *Journal of Thermal Biology*, 52 137-146.
- Lu, Y., Xiao, X., Liu, Y., Wang, J., Qi, S., Huan, C., . . . Xu, G. (2020). Achieving multifunctional smart textile with long afterglow and thermo-regulation via coaxial electrospinning. *Journal of Alloys and Compounds*, 812 152144.
- Lu, Y., Xu, F. et Ma, N. (2017). *The development of smart heating gloves and performance evaluation*. Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 71).
- Lucas, R., Buller, M. J., Weiss, I., Peraza, S. et Wegman, D. H. (2017). *Validation of core body temperature estimation from heart rate in sugarcane harvesters* Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 87).
- Lucas, R., Epstein, Y. et Kjellstrom, T. (2014). Excessive occupational heat exposure: a significant ergonomic challenge and health risk for current and future workers. *Extreme physiology & medicine*, 3(1), 14.
- Lugoda, P., Dias, T., Hughes-Riley, T. et Morris, R. (2017). Refinement of temperature sensing yarns. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2(3), 123.
- Lugoda, P., Dias, T. et Morris, R. (2015). Electronic temperature sensing yarn. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies*, 1(1).
- Lugoda, P., Hughes-Riley, T., Morris, R. et Dias, T. (2018). A Wearable Textile Thermograph. *Sensors*, 18(7), 2369.
- Lugoda, P., Hughes-Riley, T., Oliveira, C., Morris, R. et Dias, T. (2018). Developing novel temperature sensing garments for health monitoring applications. *Fibers*, 6(3), 46.
- Lundgren, K., Kuklane, K., Gao, C. et Holmer, I. (2013). Effects of heat stress on working populations when facing climate change. *Ind Health*, 51(1), 3-15.
- MacRae, B. A., Annaheim, S., Spengler, C. M. et Rossi, R. M. (2018). Skin temperature measurement using contact thermometry: a systematic review of setup variables and their effects on measured values. *Frontiers in physiology*, 9 29.
- Majumder, S., Mondal, T. et Deen, M. (2017). Wearable sensors for remote health monitoring. *Sensors*, 17(1), 130.

- Maley, M., Minett, G., Bach, A., Zietek, S. et Stewart, I. (2017). *Evaluation of commercial cooling systems to minimise thermal strain while wearing chemical-biological protective clothing* Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 86).
- Mansor, H., Shukor, M. H. A., Meskam, S. S., Rusli, N. Q. A. M. et Zamery, N. S. (2013). *Body temperature measurement for remote health monitoring system*. Communication présentée à 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA) (p. 1-5).
- Marchand, D., Gauvin, C., Brien-Breton, A., Aubertin-Leheudre, M., Tessier, D. et Sadier, Y. (2015). *Évaluation de nouvelles technologies visant à réduire le stress thermophysique associé au port de vêtements individuels de protection pour les pompiers* (Rapport n° R-891). : IRSST.
- Matzeu, G., Pucci, A., Savi, S., Romanelli, M. et Di Francesco, F. (2012). A temperature sensor based on a MWCNT/SEBS nanocomposite. *Sensors and Actuators A: Physical*, 178 94-99.
- McCann, J. (2013). Smart protective textiles for older people. Dans R. A. Chapman (Édit.), *Smart Textiles for Protection* (p. 244-275): Woodhead Publishing.
- McFarlin, B. K., Henning, A. L., Venable, A. S., Williams, R. R. et Best Sampson, J. N. (2016). A shirt containing multistage phase change material and active cooling components was associated with increased exercise capacity in a hot, humid environment. *Ergonomics*, 59(8), 1019-1025. doi: 10.1080/00140139.2015.1108460
- McLellan, T. M., Daanen, H. A. et Cheung, S. S. (2013). Encapsulated environment. *Comprehensive Physiology*, 3(3), 1363-1391.
- Meyer-Heim, A., Rothmaier, M., Weder, M., Kool, J., Schenk, P. et Kesselring, J. (2007). Advanced lightweight cooling-garment technology: functional improvements in thermosensitive patients with multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis Journal*, 13(2), 232-237.
- Miah, M. A., Kabir, M. H., Tanveer, M. S. R. et Akhand, M. (2015). *Continuous heart rate and body temperature monitoring system using Arduino UNO and Android device*. Communication présentée à 2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies (EICT) (p. 183-188).
- Michalak, M. et Krucińska, I. (2016). A smart fabric with increased insulating properties. *Textile research journal*, 86(1), 97-111.
- Milici, S., Amendola, S., Bianco, A. et Marrocco, G. (2014). *Epidermal RFID passive sensor for body temperature measurements*. Communication présentée à IEEE RFID technology and applications conference (RFID-TA) (p. 140-144).
- Min, S.-H., Yoon, S., Yoon, S.-H., Bahk, J.-H. et Seo, J.-H. (2018). Randomised trial comparing forced-air warming to the upper or lower body to prevent hypothermia during thoracoscopic surgery in the lateral decubitus position. *British journal of anaesthesia*, 120(3), 555-562.

- Miozzi, C., Amendola, S., Bergamini, A. et Marrocco, G. (2017). *Reliability of a re-usable wireless epidermal temperature sensor in real conditions*. Communication présentée à IEEE 14th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN) (p. 95-98).
- Mokhtari Yazdi, M. et Sheikhzadeh, M. (2014). Personal cooling garments: a review. *The Journal of The Textile Institute*, 105(12), 1231-1250.
- Morabito, M., Cecchi, L., Crisci, A., Modesti, P. A. et Orlandini, S. (2006). Relationship between work-related accidents and hot weather conditions in Tuscany (central Italy). *Ind Health*, 44(3), 458-464.
- Moran, D. S., Shitzer, A. et Pandolf, K. B. (1998). A physiological strain index to evaluate heat stress. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 275(1), R129-R134.
- normalisation, O. i. d. (2017). *Ergonomie des ambiances thermiques* Tiré de <https://www.iso.org/fr/standard/67188.html>
- O'Flynn, B., Brahmi, I., Oudenhoven, J., Nackaerts, A., Pereira, E., Agrawal, P., . . . Dils, C. (2018). First responders occupancy, activity and vital signs monitoring-SAFESENS. *International Journal on Advances in Networks and Services*, 11(1-2), 22-32.
- Oğuz, P. et Ertaş, G. (2013). *Wireless dual channel human body temperature measurement device*. Communication présentée à International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO) (p. 52-55).
- Okutani, C., Yokota, T., Matsukawa, R. et Someya, T. (2020). Suppressing the negative temperature coefficient effect of resistance in polymer composites with positive temperature coefficients of resistance by coating with parylene. *Journal of materials chemistry C*, 8(22), 7304-7308.
- Oliveira, A., Gehin, C., Massot, B., Ramon, C., Dittmar, A. et McAdams, E. (2010). *Thermal parameters measurement on fire fighter: Improvement of the monitoring system*. Communication présentée à Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology (p. 6453-6456).
- Olszewski, S. (2018). Electrodynamics of the Joule-Lenz law applied to the energy emission done by a free electron or harmonically-oscillating microparticle. *Journal of Quantum Information Science*, 8(3), 121-130.
- Opwis, K., Knittel, D. et Gutmann, J. S. (2012). Oxidative in situ deposition of conductive PEDOT: PTSA on textile substrates and their application as textile heating element. *Synthetic metals*, 162(21-22), 1912-1918.
- Paiva, J. S., Rodrigues, S. et Cunha, J. P. S. (2016). *Changes in ST, QT and RR ECG intervals during acute stress in firefighters: A pilot study*. Communication présentée à 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (p. 3378-3381).

- Pang, E., Pickering, S., Chan, A. et Wong, K. (2013). Use of recycled carbon fibre as a heating element. *Journal of Composite Materials*, 47(16), 2039-2050.
- Parsons, K. (2006). Heat stress standard ISO 7243 and its global application. *Ind Health*, 44(3), 368-379.
- Pengbo, W., Jiajing, S., Qian, J. et Ting, L. (2017). Cooling-controlled and reliable driving module for low-level light therapy LED helmet. *Microelectronics Reliability*, 78 370-373. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.09.021>
- Petruzzello, S. J., Gapin, J., 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.
- Pienimäki, T. (2002). Cold exposure and musculoskeletal disorders and diseases. A review. *International journal of circumpolar health*, 61(2), 173-182.
- Poboroniuc, M., Curteza, A., Cretu, V. et Macovei, L. (2014, 16-18 Oct. 2014). *Designing wearable textile structures with embeded conductive yarns and testing their heating properties*. Communication présentée à International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE) (p. 778-783). doi: 10.1109/ICEPE.2014.6970016
- Pokora, I. et Żebrowska, A. (2016). Application of a physiological strain index in evaluating responses to exercise stress—A comparison between endurance and high intensity intermittent trained athletes. *Journal of human kinetics*, 50(1), 103-114.
- Polanský, R., Soukup, R., Řeboun, J., Kalčík, J., Moravcová, D., Kupka, L., . . . Hamáček, A. (2017). A novel large-area embroidered temperature sensor based on an innovative hybrid resistive thread. *Sensors and Actuators A: Physical*, 265 111-119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.08.030>
- Popovic, Z., Momenroodaki, P. et Scheeler, R. (2014). Toward wearable wireless thermometers for internal body temperature measurements. *IEEE Communications Magazine*, 52(10), 118-125.
- Quinn, T., Kim, J.-H., Seo, Y. et Coca, A. (2018). Comparison of thermal manikin modeling and human subjects' response during use of cooling devices under personal protective ensembles in the heat. *Prehospital and disaster medicine*, 33(3), 279-287.
- Rahman, M. A., Barai, A., Islam, M. A. et Hashem, M. A. (2012). *Development of a device for remote monitoring of heart rate and body temperature*. Communication présentée à 15th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT) (p. 411-416).
- Ramesh Babu, V. et Arunraj, A. (2018). Thermo regulated clothing with phase change materials. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 4(5).
- Rhodes, R., Bue, G., Meginnis, I., Hakam, M. et Radford, T. (2013). *Thermal performance testing of EMU and CSAFE liquid cooling garments*. Communication présentée à 43rd International Conference on Environmental Systems.

- Richmond, V. L., Davey, S., Griggs, K. et Havenith, G. (2015). Prediction of core body temperature from multiple variables. *Annals of occupational hygiene*, 59(9), 1168-1178.
- Roberge, R. J., Kim, J. H. et Benson, S. (2012). N95 filtering facepiece respirator deadspace temperature and humidity. *Journal of occupational and environmental hygiene*. Tiré de <http://dx.doi.org/10.1080/15459624.2012.660428>
- Roh, J.-S. et Kim, S. (2016). All-fabric intelligent temperature regulation system for smart clothing applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(9), 1165-1175.
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 11(5), 77-90.
- Roossien, C., Heus, R., Reneman, M. et Verkerke, G. (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.
- Šahta, I., Baltina, I., Truskovska, N., Blums, J. et Deksnis, E. (2014). Selection of conductive yarns for knitting an electrical heating element. *High Performance and Optimum Design of Structures and Materials*, 137 91.
- Salaün, F. (2019). Phase change materials for textile application. Dans *Textile Industry and Environment* : IntechOpen.
- Sandulescu, V. et Dobrescu, R. (2015, 19-21 Nov. 2015). *Wearable system for stress monitoring of firefighters in special missions*. Communication présentée à E-Health and Bioengineering Conference (EHB) (p. 1-4). doi: 10.1109/EHB.2015.7391578
- Sarkar, S. et Kothari, V. (2014). Cooling garments—A review.
- Schulte, P. A. et Chun, H. (2009). Climate change and occupational safety and health: establishing a preliminary framework. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6(9), 542-554.
- Seeberg, T. M., Hjelstuen, M., Austad, H. O., Larsson, A. et Storholmen, H. F. (2011). Smart textiles-safety for workers in cold climate. *Ambiance'11 Proceedings* 50.
- Seeberg, T. M., Vardøy, A.-S. B., Austad, H. O., Wiggen, Ø., Stenersen, H. S., Liverud, A. E., . . . Færevik, H. (2013). *Protective jacket enabling decision support for workers in cold climate*. Communication présentée à 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) (p. 6498-6501).
- Seoane, F., Mohino-Herranz, I., Ferreira, J., Alvarez, L., Buendia, R., Ayllón, D., . . . Gil-Pita, R. (2014). Wearable biomedical measurement systems for assessment of mental stress of combatants in real time. *Sensors*, 14(4), 7120-7141.
- Shih, W.-P., Tsao, L.-C., Lee, C.-W., Cheng, M.-Y., Chang, C., Yang, Y.-J. et Fan, K.-C. (2010). Flexible temperature sensor array based on a graphite-polydimethylsiloxane composite. *Sensors*, 10(4), 3597-3610.

- Shirish, A., Kapadia, V., Kumar, S., Kumar, S., Mishra, S. et Singh, G. (2016). Effectiveness of a cooling jacket with reference to physiological responses in iron foundry workers. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 22(4), 487-493. doi: 10.1080/10803548.2016.1181484
- Sim, S., Lee, W., Baek, H. et Park, K. (2012). *A nonintrusive temperature measuring system for estimating deep body temperature in bed*. Communication présentée à Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (p. 3460-3463).
- Smith, D., Liebig, J., Steward, N. et Fehling, P. (2010). *Sudden cardiac events in the fire service: understanding the cause and mitigating the risk* : Skidmore College, Health and Exercise Sciences, First Responder Health and
- Smith, D. L., Petruzzello, S. J., Kramer, J. et Misner, J. (1997). The effects of different thermal environments on the physiological and psychological responses of firefighters to a training drill. *Ergonomics*, 40(4), 500-510.
- Song, W., Lai, D. et Wang, F. (2015). Evaluating the cold protective performance (CPP) of an electrically heated garment (EHG) and a chemically heated garment (CHG) in cold environments. *Fibers and Polymers*, 16(12), 2689-2697.
- Song, W. et Wang, F. (2016). The hybrid personal cooling system (PCS) could effectively reduce the heat strain while exercising in a hot and moderate humid environment. *Ergonomics*, 59(8), 1009-1018.
- Song, W., Wang, F. et Wei, F. (2016). Hybrid cooling clothing to improve thermal comfort of office workers in a hot indoor environment. *Building and Environment*, 100 92-101.
- Soukup, R., Hamacek, A., Mracek, L. et Reboun, J. (2014). *Textile based temperature and humidity sensor elements for healthcare applications*. Communication présentée à Proceedings of the 37th International Spring Seminar on Electronics Technology (p. 407-411).
- Stoppa, M. et Chiolerio, A. (2014). Wearable electronics and smart textiles: a critical review. *Sensors*, 14(7), 11957-11992.
- Sullivan, J., Schulz, M., Vemaganti, K., Bhattacharya, A., Jetter, B. J., Shanov, V., . . . Kim, J. (2015). Carbon nanotube fabric cooling system for firefighters and first responders: modeling and simulation. *Journal of Fiber Bioengineering and informatics*. Tiré de <http://dx.doi.org/10.3993/jfbi03201501>
- Sun, Y. et Jasper, W. J. (2015). Numerical modeling of heat and moisture transfer in a wearable convective cooling system for human comfort. *Building and Environment*, 93 50-62.
- Tanaka, K., Nagao, D., Okada, K. et Nakamura, K. (2017). Cooling effects of wearer-controlled vaporization for extravehicular activity. *Aerosp Med Hum Perform*, 88(4), 418-422. doi: 10.3357/amhp.4583.2017

- Tanaka, K., Nakamura, K. et Katafuchi, T. (2014). Self-perspiration garment for extravehicular activity improves skin cooling effects without raising humidity. *Acta Astronautica*, 104(1), 260-265.
- Tao, X., Jia, H., He, Y., Liao, S. et Wang, Y. (2017). Ultrafast paper thermometers based on a green sensing ink. *ACS sensors*, 2(3), 449-454.
- Tardif, R., Charest-Tardif, G., Truchon, G. et Brochu, M. (2008). Influence de la charge de travail sur les indicateurs biologiques d'exposition de cinq solvants. *Rapport final présenté à l'IRSST (IRSST 099-170)*.
- Tawatsupa, B., Lim, L.-Y., Kjellstrom, T., Seubsman, S.-a., Sleigh, A. et Thai Cohort Study Team. (2010). The association between overall health, psychological distress, and occupational heat stress among a large national cohort of 40,913 Thai workers. *Global Health Action*, 3(1), 5034.
- Teunissen, L. P., Wang, L.-C., Chou, S.-N., Huang, C.-h., Jou, G.-T. et Daanen, H. A. (2014). Evaluation of two cooling systems under a firefighter coverall. *Applied ergonomics*, 45(6), 1433-1438.
- Thilagavathi, G., Muthukumar, N. et Kannaian, T. (2017). Development and characterization of electric heating fabric based on silver coated nylon yarn. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 1(6), 00036.
- Tian, M., Sukang, Z. et Ning, P. (2011). Simulation of efficiency of liquid cooling garments. *Advanced Materials Research*, 331 636-639. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.331.636>
- Tian, Y., Li, D. et Liu, H. (2014, 2014). *The relationship between active heating power and temperature of the fingers in EVA glove*. Communication présentée à International Conference on Human-Computer Interaction (p. 123-128). doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-07857-1_22
- Tikusis, P., Mclellan, T. M. et Selkirk, G. (2002). Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(9), 1454-1461.
- Tochihara, Y., Ohkubo, C. et Komine, H. (1995). Physiological reaction and manual performance during work in cold storages. *Applied human science*, 14(2), 73-77.
- Tokizawa, K., Son, S.-y., Oka, T. et Yasuda, A. (2017). Effects of combined practical cooling prior to and during exercise on thermoregulatory responses. *The FASEB Journal*, 31(1_supplement), 1085.1081-1085.1081.
- Tokizawa, K., Son, S.-Y., Oka, T. et Yasuda, A. (2019). Effectiveness of a field-type liquid cooling vest for reducing heat strain while wearing protective clothing. *Ind Health* 2018-0182.
- Tong, J.-h., Liu, S., Yang, C.-x. et Li, L. (2015). Modeling of package-free flexible conductive fabric with thermal regulation where temperature can be customized. *Textile research journal*, 85(6), 590-600.

- Tong, J., Ding, F., Tao, X., Au, W. M. et Li, L. (2014). Temperature effect on the conductivity of knitted fabrics embedded with conducting yarns. *Textile research journal*, 84(17), 1849-1857.
- Truchon, G., Zayed, J., Bourbonnais, R., Lévesque, M., Deland, M., Busque, M.-A. et Duguay, P. (2013). *Contraintes thermiques et substances chimiques, Bilan des connaissances et emplois les plus à risque au Québec* (Rapport n° R-799). : IRSST.
- Tyurin, I., Getmantseva, V. et Andreeva, E. (2018). Analysis of innovative technologies of thermoregulating textile materials. *Fibre Chemistry*, 50(1), 1-9.
- Udayraj, Wang, F., Song, W., Ke, Y., Xu, P., Chow, C. S. W. et Noor, N. (2019). Performance enhancement of hybrid personal cooling clothing in a hot environment: PCM cooling energy management with additional insulation. *Ergonomics*, 62(7), 928-939. doi: 10.1080/00140139.2019.1596318
- Van Broock, L. et de León, P. (2012). *Development of a liquid cooling garment for the NDX-1 prototype*. Communication présentée à 42nd International Conference on Environmental Systems, San Diego, California.
- Vaz, A., Ubarretxena, A., Zalbide, I., Pardo, D., Solar, H., Garcia-Alonso, A. et Berenguer, R. (2010). Full passive UHF tag with a temperature sensor suitable for human body temperature monitoring. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 57(2), 95-99.
- Vernieuw, C. R., Stephenson, L. A. et Kolka, M. A. (2007). Thermal comfort and sensation in men wearing a cooling system controlled by skin temperature. *Human factors*, 49(6), 1033-1044.
- Wan, X. et Wang, F. (2018). Numerical analysis of cooling effect of hybrid cooling clothing incorporated with phase change material (PCM) packs and air ventilation fans. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126 636-648.
- Wang, F., Gao, C. et Holmér, I. (2010). Effects of air velocity and clothing combination on heating efficiency of an electrically heated vest (EHV): a pilot study. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 7(9), 501-505.
- Wang, F., Gao, C., Kuklane, K. et Holmér, I. (2010). A review of technology of personal heating garments. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 16(3), 387-404.
- Wang, F. et Lee, H. (2009). Evaluation of an electrically heated vest (EHV) using a thermal manikin in cold environments. *Annals of occupational hygiene*, 54(1), 117-124.
- Wang, F. et Lee, H. (2010). *Evaluation of the performances of electrically heated clothing*. (Department of Design Sciences, Lund University).
- Wang, F. et Song, W. (2017). An investigation of thermophysiological responses of human while using four personal cooling strategies during heatwaves. *Journal of Thermal Biology*, 70 37-44.

- Wang, S., Li, Y., Hu, J., Tokura, H. et Song, Q. (2006). Effect of phase-change material on energy consumption of intelligent thermal-protective clothing. *Polymer Testing*, 25(5), 580-587.
- Wang, T., Liang, W., Lizhan, B., Guiping, L., Xueqin, B., Xiangyang, L. et Guanghui, X. (2015). Experimental study on the performance of a liquid cooling garment with the application of MEPCMS. *Energy Conversion and Management*, 103 943-957. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.043>
- Wang, Y., Gordon, S., Yu, W. et Wang, F. (2018). Structural architecture of wearable materials based on tri-component elastic-conductive composite yarn: toward a joule heating application. *Textile research journal* 0040517518811937.
- Webb, R. C., Bonifas, A. P., Behnaz, A., Zhang, Y., Yu, K. J., Cheng, H., . . . Kim, Y.-S. (2013). Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin. *Nature materials*, 12(10), 938.
- White, D. J. (2014). *Brevet*.
- Wilkins, E. L. et Havenith, G. (2017). External heating garments used post-warm-up improve upper body power and elite sprint swimming performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P (Journal of Sports Engineering and Technology)*, 231(2), 91-101. doi: <http://dx.doi.org/10.1177/1754337116650322>
- Williams-Bell, F. M., Boisseau, G., McGill, J., Kostiuk, A. et Hughson, R. L. (2010). Air management and physiological responses during simulated firefighting tasks in a high-rise structure. *Applied ergonomics*, 41(2), 251-259.
- Winslow, C.-E., Herrington, L. P. et Gagge, A. P. (1937). Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures. *American Journal of Physiology-Legacy Content*, 120(1), 1-22.
- Wu, J., Fu, M., Tong, X. et Qin, Y. (2017). Heat stress evaluation at the working face in hot coal mines using an improved thermophysiological model. *International Journal of Heat and Technology*, 35(1), 67-74.
- Wu, J., Fu, M., Tong, X. et Qin, Y. (2017). *Heat stress evaluation of miners in hot underground coal mines using an improved predicted heat strain model and an improved thermophysiological model* Communication présentée à 17th International Conference on Environmental Ergonomics, Kobe, Japan (p. 99).
- Xiang, Z., Wan, L., Gong, Z., Zhou, Z., Ma, Z., OuYang, X., . . . Chan, C. C. (2019). Multifunctional textile platform for fiber optic wearable temperature-monitoring application. *Micromachines*, 10(12), 866.
- Xu, X., Karis, A. J., Buller, M. et Santee, W. R. (2013). Relationship between core temperature, skin temperature, and heat flux during exercise in heat. *European journal of applied physiology*, 113(9), 2381-2389.
- Yan, C., Wang, J. et Lee, P. S. (2015). Stretchable graphene thermistor with tunable thermal index. *ACS Nano*, 9(2), 2130-2137. doi: 10.1021/nn507441c

- Yang, C., Wang, J. et Li, L. (2017). A novel approach for developing high thermal conductive artificial leather by utilizing smart electronic materials. *Textile research journal*, 87(7), 816-828.
- Yang, H. (2017). *Research on application of carbon fiber heating material in clothing*. Communication présentée à IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (vol. 81, p. 012042).
- Yang, J., Wei, D., Tang, L., Song, X., Luo, W., Chu, J., . . . Du, C. (2015). Wearable temperature sensor based on graphene nanowalls. *Rsc Advances*, 5(32), 25609-25615.
- Yang, J., Weng, W., Wang, F. et Song, G. (2017). Integrating a human thermoregulatory model with a clothing model to predict core and skin temperatures. *Applied ergonomics*, 61 168-177.
- Yang, L., Lu, K., Diaz-Olivares, J. A., Seoane, F., Lindecrantz, K., Forsman, M., . . . Eklund, J. A. (2018). Towards smart work clothing for automatic risk assessment of physical workload. *IEEE Access*, 6 40059-40072.
- Yang, Y. (2016). *Vacuum desiccant cooling for personal heat stress management*. (Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- Yang, Y., Lin, Z.-H., Hou, T., Zhang, F. et Wang, Z. L. (2012). Nanowire-composite based flexible thermoelectric nanogenerators and self-powered temperature sensors. *Nano Research*, 5(12), 888-895.
- Yang, Y., Stapleton, J., Diagne, B. T., Kenny, G. P. et Lan, C. Q. (2012). Man-portable personal cooling garment based on vacuum desiccant cooling. *Applied Thermal Engineering*, 47 18-24.
- Yazdi, M. et Sheikhzadeh, M. (2013). A new method for assessing the performance of a phase change material cooling garment. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 6(1), 47-53.
- Yi, W., Zhao, Y. et Chan, A. P. C. (2017). Evaluating the effectiveness of cooling vest in a hot and humid environment. *Ann Work Expo Health*, 61(4), 481-494. doi: 10.1093/annweh/wxx007
- Young, A. J., Sawka, M. N., Epstein, Y., Decristofano, B. et Pandolf, K. B. (1987). Cooling different body surfaces during upper and lower body exercise. *Journal of Applied Physiology*, 63(3), 1218-1223.
- Zarma, I. (2017). *Thermal Energy Storage in Phase Change Materials:-Applications, Advantages and Disadvantages*. Communication présentée à International Conference of Chemical, Energy and Environmental Engineering, Smouha, Alexandria, Egypt.
- Zhai, Y., Liu, X., Wang, Y. et Li, X. (2014). Progress in preparation and application of fabric electrodes. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2(06), 598.

- Zhang, C., Lai, D., Lu, Y., Wang, F. et Kuklane, K. (2015). *Smart heating sleeping bags for improving wearers' thermal comfort at the feet*. Communication présentée à Extreme physiology & medicine (vol. 4, p. A92).
- Zhang, L., Baima, M. et Andrew, T. L. (2017). Transforming commercial textiles and threads into sewable and weavable electric heaters. *ACS applied materials & interfaces*, 9(37), 32299-32307. doi: 10.1021/acsami.7b10514
- Zhang, X. A., Yu, S., Xu, B., Li, M., Peng, Z., Wang, Y., . . . Ouyang, M. (2019). Dynamic gating of infrared radiation in a textile. *Science*, 363(6427), 619-623.
- Zhang, Y., Bishop, P. A., Green, J. M., Richardson, M. T. et Schumacker, R. E. (2010). Evaluation of a carbon dioxide personal cooling device for workers in hot environments. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 7(7), 389-396.
- Zhao, D., Lu, X., Fan, T., Wu, Y. S., Lou, L., Wang, Q., . . . Yang, R. (2018). Personal thermal management using portable thermoelectrics for potential building energy saving. *Applied energy*, 218 282-291.
- Zhao, M., Gao, C., Li, J. et Wang, F. (2015). Effects of two cooling garments on post-exercise thermal comfort of female subjects in the heat. *Fibers and Polymers*, 16(6), 1403-1409.
- Zhao, M., Gao, C., Wang, F., Kuklane, K., Holmér, I. et Li, J. (2013). A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 43(3), 232-237.
- Zhao, M., Kuklane, K., Lundgren, K., Gao, C. et Wang, F. (2015). A ventilation cooling shirt worn during office work in a hot climate: cool or not? *International journal of occupational safety and ergonomics*, 21(4), 457-463. doi: 10.1080/10803548.2015.1087730
- Zhao, T., Zhang, G., Zhou, F., Zhang, S. et Deng, C. (2018). Toward tailorable Zn-Ion textile batteries with high energy density and ultrafast capability: building high-performance textile tlectrode in 3D herarchical branched design. *Small*, 14(36), 1802320.
- Zhao, Y., Tong, J., Yang, C., Chan, Y.-f. et Li, L. (2016). A simulation model of electrical resistance applied in designing conductive woven fabrics. *Textile research journal*, 86(16), 1688-1700.
- Zhao, Y., Yi, W., Chan, A. P. C., Wong, F. K. W. et Yam, M. C. H. (2017). Evaluating the physiological and perceptual responses of wearing a newly designed cooling vest for construction workers. *Ann Work Expo Health*, 61(7), 883-901. doi: 10.1093/annweh/wxx055
- Zhong, Y., Zhang, F., Wang, M., Gardner, C. J., Kim, G., Liu, Y., . . . Chen, R. (2017). Reversible humidity sensitive clothing for personal thermoregulation. *Sci Rep*, 7 44208. doi: 10.1038/srep44208
- Ziegler, S. et Frydrysiak, M. (2009). Initial research into the structure and working conditions of textile thermocouples. *Fibres Text. East. Eur*, 17 84-88.

ANNEXE A

Tableau 6. Systèmes commerciaux de détection de signes biométriques facilitant la détection de stress thermique, sous la forme d'accessoires portables ou de textiles intelligents (dernière consultation : avril 2020)

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
Athos	Sport	FC, activité musculaire, dépense calorique, intensité d'activité	Vêtement biométrique	Capteurs (ECG, EMG) intégrés dans un chandail (https://shop.liveathos.com/)
AIQ	Sport, santé	FC, ECG	Vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un chandail (http://www.aiqsmartclothing.com/)
Biopeak	Sport, santé, SST	ECG; T _s sous surfacique ; bio-impédance multifréquence, réponse cutanée galvanique, activité	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG intégrées dans une sangle pectorale en textile (http://biopeak.com/biofusion-psm)
Cardiosport	Sport	FC, VFC	Ceinture thoracique connectée	Électrodes ECG (à base d'un tissu conducteur) intégrées dans une ceinture thoracique (https://www.cardiosport.com/)
Coospo	Sport	FC, VFC	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (http://coospo.com/index.html)
Cosinuss ^o (Cosinuss ^o One)	Sport, santé, SST	FC, VFC, fréquence respiratoire, SpO ₂ , température tympanique, variation de la pression artérielle	Intra-auriculaire portable	Capteurs de type pléthysmographie (par pression et par voie optique) et thermomètre de type RTD intégrés dans un appareil intra-auriculaire (https://www.cosinuss.com/en/)
Cosmed	Sport	Paramètres métaboliques (FC, VO ₂ , VCO ₂ , ventilation, dépense énergétique)	Système métabolique portable	Système métabolique portable monté avec un harnais sur le dos du porteur (https://www.cosmed.com/fr/)
Equivital	Sport, santé, SST, militaire	ECG, fréquence respiratoire, T _s , T _c , détection des chutes, SpO ₂ , réponse cutanée galvanique, GPS	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (à base de fibres conductrices) intégrées dans une sangle à bretelles ; boîtier électronique connecté à une pilule avalable de T _c , à un patch de T _s et à un capteur de réponse galvanique cutanée (https://www.equivital.com/)
Garmin (HRM-Dual™, HRM-Run™)	Sport	FC, VFC	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://buy.garmin.com/fr-CA/CA/c14662-p1.html)

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
Hexoskin	Sport, santé	ECG (FC, VFC, événements QRS, récupération de FC), fréquence respiratoire, intensité de l'activité, pas, cadence	Vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un chandail (3 dérivations ECG) (https://www.hexoskin.com/)
MOOV NOW™	Sport	FC	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://store.moov.cc/collections/moov-hr)
Myontec	Sport, santé, SST	FC, activité musculaire	Vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un chandail (https://www.myontec.com/)
Nuubo	Santé, médical	Surveillance de l'ECG à long terme	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (encres conductrices imprimées sur le textile) intégrées dans une sangle à bretelles associées aux traces conductrices extensibles (https://www.nuubo.com/index.php/es)
Polar (POLAR H10)	Sport	FC, VFC	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://www.polar.com/ca-en)
QardioCore	Sport, santé	ECG, FC, VFC, fréquence respiratoire, T _s , intensité de l'activité	Sangle pectorale connectée	Électrodes à base de laiton chromé (un canal unique d'ECG) intégrées dans une sangle (https://www.getqardio.com/fr)
Sensoria	Sport, santé	FC, pas, cadence, contact avec le pied	Vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un chandail (https://www.sensoriafitness.com/)
Shanren (Beat 20)	Sport	ECG, FC, alerte de vibration de surmenage précoce	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://www.shanrentech.com/)
SKIIN (par Myant)	Santé	Intensité de l'activité, niveau de stress	Sous-vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un vêtement (https://skiin.com/)
Smartex	Santé, bien-être	ECG, VFC, fréquence respiratoire, activité	Vêtement biométrique	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans un chandail (http://www.smartex.it)
Suunto (Smart sensor)	Santé	FC	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://www.suunto.com/)
Vitaljacket	Sport, santé	ECG	Vêtement biométrique	Électrodes sèches ECG (5 canaux) connectées avec un réseau de fils conducteurs intégré dans le vêtement (http://www.vitaljacket.com/)
Wahoo (TICKR X)	Sport	FC, VFC et calories brûlées	Sangle pectorale connectée	Électrodes ECG (en silicone conducteur) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://www.wahoofitness.com/)
Xco (XPS™ Technology)	Sport, santé	FC, mouvement, équilibre, cognitif	Ceinture connectée	Boîte de traitement et de transmission de signaux vissée sur une ceinture dans le dos (https://xco.io/)
Xenoma (e-skin ECG shirt)	Sport, santé	ECG, FC	Vêtement biométrique connecté	Électrodes sèches de 4 dérivations ECG intégrées dans un chandail et associées aux traces conductrices extensibles imprimées (https://xenoma.com/)

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
Zephyr	Sport, SST, militaire	HxM SMART™ : FC, VFC, intervalle R-R, niveau de stress, intensité de l'activité, calories brûlées	Sangle pectorale	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans une sangle pectorale en textile (https://www.zephyranywhere.com/system/hxm)
		BioModule™ : FC, VFC, taux de respiration, estimation de la T _c à partir de la FC, calories brûlées	Ceinture, chandail, harnais ou e-patch connectés	Électrodes textiles (à base de fils conducteurs) intégrées dans l'habillement (https://www.zephyranywhere.com/system/components)

Tableau 7. Produits commerciaux de détection des signes biométriques facilitant la détection de stress thermique sous forme de patches intelligents (dernière consultation : avril 2020)

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
Cardiac insight Inc. (Cardea SOLO™)	Médical	Surveillance à long terme de l'ECG	Patch textile connecté	Patch textile jetable à usage unique avec électrodes imprimées (2 dérivation ECG) connectées au boîtier d'un microprocesseur (https://www.cardiacinsightinc.com/)
Cardiomo Care	Médical	ECG, VFC, fréquence respiratoire, T _s , position corporelle, détection de chute	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable (2 dérivation ECG) fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau (https://cardiomo.com/)
Inomedis (myAngel VitalSigns®)	Sport, santé, médical	ECG, VFC, fréquence respiratoire, T _s , intensité de l'activité, SpO ₂ , position corporelle	Patch textile connecté	Patch textile jetable (à usage unique) avec des électrodes imprimées (3 dérivation ECG), un oxymètre PPG et un thermomètre optique, tous connectés au boîtier de microprocesseur (https://inomedis.com/)
Isansys (Lifetouch)	Médical	ECG, FC, VFC, fréquence respiratoire, T _s	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable (avec 2 dérivation ECG, un capteur PPG et un thermomètre optique) fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau (https://www.isansys.com)
Kenzen	Stress thermique (sport, santé, SST)	FC, estimation de la T _c à partir de la FC, taux de sueur, activité	Patch électronique connecté	Dispositif électronique réutilisable (avec 1 dérivation ECG, un capteur électrochimique, un capteur PPG, un capteur de flux thermique, un thermomètre optique, un capteur de bio-impédance) fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau (https://kenzen.com/)
Mc10 (BioStamp nPoint®)	Médical	FC, VFC, EMG, posture, activité, fréquence respiratoire	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau (https://www.mc10inc.com/)
Rithm (ePatch®)	Médical	FC	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable (avec 1, 2 ou 3 dérivation ECG), fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau (http://www.rithm.se/)
Vitalconnect	Médical	ECG, FC, VFC, taux de respiration, SpO ₂ , T _s , activité, posture, détection de chute	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable (avec 1 dérivation ECG, une thermistance) fixé à l'aide d'un patch jetable sur la peau (https://vitalconnect.com/)
Vivomi (Puulse)	Médical, bien-être	ECG, FC, VFC	Patch électronique connecté	Capteur électronique réutilisable (avec 2 dérivation ECG) fixé à l'aide d'un patch jetable sur la peau (https://vivomi.com/)
Vivonics (AWARE)	Médical, santé	ECG, FC, VFC, SpO ₂ , T _s	Patch électronique connecté	Dispositif électronique réutilisable (avec 2 dérivation ECG, un capteur PPG, un thermomètre optique) fixé à l'aide d'un patch jetable sur la peau (https://www.vivonics.com/technologies//aware)

Tableau 8. Produits commerciaux de détection en temps réel des températures corporelles, microclimatiques ou environnementales, à porter par un individu (dernière consultation : avril 2020)

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
PST Sensors	Santé, transport et logistique, énergie, procédé (http://www.pstsensors.com/)	Température surfacique	1) Thermistance imprimée à base de silicone conducteur ; 2) Élément chauffant de température contrôlée	1) Puce électronique associée à un circuit analogique entièrement imprimé ; 2) Élément chauffant imprimé, associé à une thermistance imprimée
Printed Electronics Russia	Électronique portable, approvisionnement alimentaire, électroménagers, robotique, dissipateurs de chaleur (https://www.printedelectronics.ru/en/products.html?id=30)	Température surfacique	Thermistance imprimée	Puce électronique associée à un circuit analogique entièrement imprimé
Flextrapower (anciennement Bonbouton)	Santé, sport (https://www.flextrapower.com/)	Température du pied, pression	Thermistance imprimée à base de graphène, intégrée dans une semelle connectée	Semelles intelligentes composées d'une couche d'éthylène-acétate de vinyle, d'une couche de capteur de panneau souple et d'une couche de coussin
Ohmatex	SST (https://www.ohmatex.dk/project/viking-life-saving-equipment/)	Température environnementale, température microclimatique	Thermistances intégrées dans un équipement de protection individuel	Capteurs thermiques intégrés dans les couches internes et externes d'une combinaison de pompier et connectés à un écran DEL qui avertit lorsque la température dépasse un seuil
TeckniSolar-Seni (Balsan)	SST (https://www.tecknisolar.com/)	Température environnementale, température microclimatique, gaz nocif, activité	Caméra thermique associé à des capteurs intégrés de température et d'humidité	Caméra thermique miniature intégrée dans le casque et capteurs de température et d'humidité intégrés dans une veste de pompier, qui déclenchent une alarme sonore et visuelle lorsque la température dépasse un certain seuil
Cosinuss° (Degree)	Santé, sport, SST (https://www.cosinuss.com/degree/)	Température tympanique	Capteur portable IR intra-auriculaire	Thermomètre optique intégré dans un appareil intra-auriculaire portable
Blue Spark Technologies Inc. (TempTraq)	Santé (https://temptraq.healthcare/)	Température cutanée	Patch électronique connecté avec capteur (par contact) de température intégré	Patch flexible jetable à usage unique, avec un circuit imprimé lié à une notification audiovisuelle de l'augmentation de la température par une application mobile

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
VivaLNK (Fever scout)	Santé (https://www.vivalnk.com/feverscout)	Température cutanée	Patch électronique connecté avec capteur de température IR intégré	Capteur électronique réutilisable fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sous l'aisselle, lié à une notification de l'augmentation de la température par une application mobile
Medisana (TM 735)	Santé (https://www.medisana.fr/fr/Contacter-le-de-la-sant/Thermomètres/TM-735-Thermomètre-Bluetooth.html)	Température cutanée	Patch électronique connecté avec capteur de température IR intégré	Dispositif électronique réutilisable (avec un capteur de température IR), fixé à l'aide de rubans adhésifs jetables sur la peau
GreenTEG (gSKIN® XU, gSKIN® BodyTemp Patch, CORE™)	(gSKIN® XU) Électronique portable (https://greenteg.com/template/userfiles/files/gSKIN_Heat_Flux_Sensors_OEM_XU_Datasheet%20V4.1.pdf)	Flux de la chaleur	Capteur à intégrer aux appareils portables	Élément de capteur de flux de chaleur passif de type thermoélectrique
	(gSKIN® BodyTemp) Santé, Sport, SST (https://www.greenteg.com/template/userfiles/files/BodyTemp-Patch-datasheet%281%29.pdf)	Flux de la chaleur, température cutanée, activité	Patch électronique connecté avec capteur (par contact) de température intégré	Dispositif électronique réutilisable fixé à l'aide de mousses adhésives jetables sur la peau avec 2 configurations possibles : (a) 2 canaux de flux de chaleur, 2 canaux de température cutanée, accélération X, Y, Z ; (b) 1 canal de température cutanée, 1 canal de température corporelle, accélération X, Y, Z
	(CORE™) Santé, sport, SST (https://corebodytemp.com/)	Température cutanée, déduction indirecte de la T _c	Appareil portable connecté avec capteur (par contact) de température intégré	Appareil intégrable à la conception d'une sangle ou d'un patch connecté
Empatica (Embrace2, E4)	(Embrace2) Recherche (https://www.empatica.com/en-int/research/#)	Température cutanée, activité électrodermique, position, activité	Bracelet connecté avec capteur de température optique IR	Capteur optique de température, capteur d'activité électrodermique, accéléromètre et gyroscope intégrés dans un bracelet connecté
	(E4) Santé, médical (https://www.empatica.com/en-int/research/e4/)	Température cutanée, activité électrodermique, activité, pouls de volume sanguin	Bracelet connecté avec thermopile IR	Thermopile IR, capteur de réponse galvanique cutanée, accéléromètre et capteur PPG intégrés dans un bracelet connecté

Fabricant (produit)	Secteur	Paramètres mesurés	Principe technologique	Méthode d'intégration
Philips (VitalSense)	Santé, sport, SST (http://www.actigraphy.com/solutions/vitalsense/)	T _c (température de l'appareil digestif)	Pilule téléométrique avalable	Pilule téléométrique en association avec un patch connecté, à placer sur la peau de la personne pour mesurer la température environnementale et la température cutanée
American Thermal Instruments (Endicate™)	Pharmaceutique, équipement médical, procédés industriels, chaîne d'approvisionnement alimentaire (https://www.americanthermal.com/electronic-solutions/visual-indication)	Température environnementale	Appareil portable avec écran d'affichage permettant d'assurer la traçabilité de la variation de la température environnementale	Capteur de température numérique intégré dans un dispositif portable, comprenant un écran d'affichage et 4 alarmes audiovisuelles programmables
Maxim Integrated (MAX30205)	Santé, sport (https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/sensor-interface/MAX30205.html/tb_tab_0)	Température corporelle	Capteur de température numérique à intégrer aux appareils portables	Dispositif permettant de convertir les mesures de température sous forme numérique à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique
Sensry (Kallisto® platform)	Santé, sport, industrie (http://sensry.net/en/our-solution/)	Température environnementale, humidité relative, pression barométrique, activité, position	Kit de solution de capteurs pour internet des objets (module de base PCB)	Plateforme multicapteur (accéléromètre, gyroscope, capteur géomagnétique, température, humidité, pression atmosphérique sur un module de base PCB)

Tableau 9. Échelle de maturité technologique TRL définie par « Innovation, Sciences et Développement économique Canada », qui s’inspire de l’échelle élaborée par la NASA (Héder, 2017)

Échelle de maturité technologique	
Niveau 1	Observation et consignation des principes de base du concept
Niveau 2	Concept technologique ou application déterminée
Niveau 3	Fonction critique et analytique expérimentale ou validation de principe
Niveau 4	Validation des éléments ou des conditions d'essai en laboratoire
Niveau 5	Validation des éléments ou des conditions d'essai en environnement simulé
Niveau 6	Démonstration d'un modèle ou d'un prototype du système ou du sous-système dans un environnement simulé
Niveau 7	Prototype prêt pour la démonstration dans un environnement opérationnel approprié
Niveau 8	Technologie actuelle mise au point et qualifiée par des essais et des démonstrations
Niveau 9	Validation de la technologie réelle par le déploiement réussi dans un contexte opérationnel